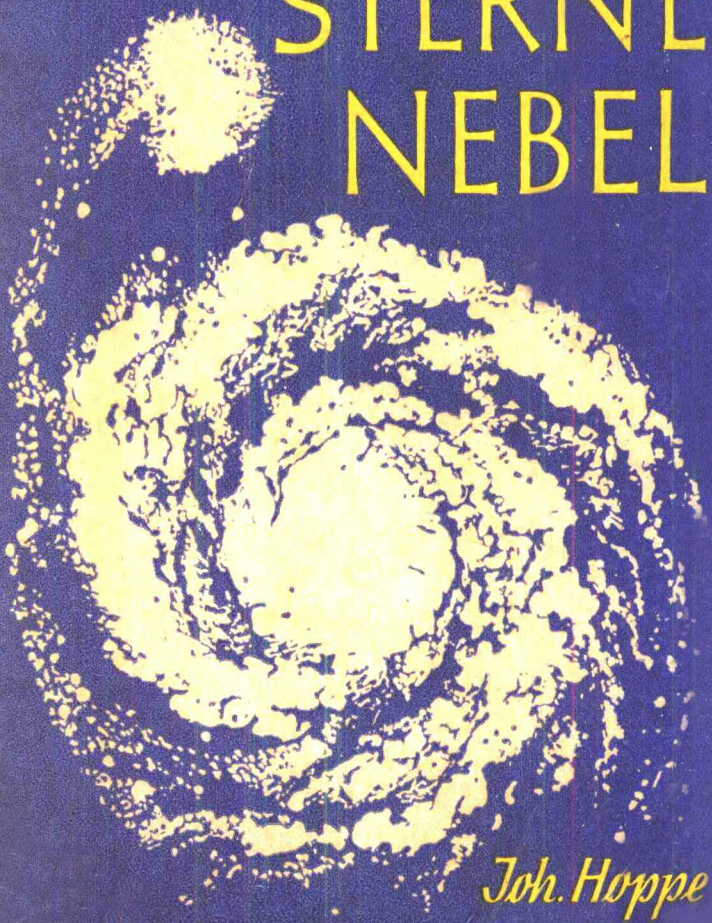
TASCHENBUCH

PLANETEN STERNE NEBEL



Joh. Hoppe

TASCHENBUCH · BAND 6/7

PROF. DR. JOHANNES HOPPE

PLANETEN, STERNE, NEBEL

Astronomie für jedermann

VEB VERLAG ENZYKLOPÄDIE
LEIPZIG

Dieses Taschenbuch enthält 59 Textabbildungen und 16 Kunstdrucktafeln

1961 · Alle Rechte vorbehalten
Gesamtherstellung: Druckerei Sächsische Zeitung, Dresden
Umschlaggestaltung: K. Wernicke, Leipzig

Verlagslizenz 434 130/27/61

INHALTSVERZEICHNIS

Erste Orientierung 8

Grundlagen der Astronomie 22
Astronomische Koordinatensysteme 23
Bewegung der Himmelskörper und Zeitrechnung . 29
Vom Kalender 40
Der Himmel in anderen Breiten 44
Refraktion, Aberration, Parallaxe, Präzession, Polverschiebung 45

Der Mond 49
Bewegung des Mondes 49
Mond- und Sonnenfinsternisse 54
Gezeiten 62
Oberflächenformen 63

Planetensystem 70
Die Gesetze der Planetenbewegung 71
Physikalischer Aufbau und stofflicher Bestand der Planeten 75
Unsere Nachbarplaneten 80
Kleine Planeten oder Planetoiden 91
Die Planeten vom Jupitertyp 95
Die Kometen 109
Meteore und Meteorite 120
Zodiakallicht 127

Das Milchstraßensystem 133
Verteilung der Fixsterne an der Sphäre 133
Räumlicher Aufbau des Sternsystems 140
Scheinbare und räumliche Bewegung der Sterne . 155
Die Physik der Sterne 160
Die Sonne als strahlender Stern 179
Veränderliche Sterne 187
Mehrfache Sterne und Sternhaufen 192
Gas und Staub zwischen den Sternen 197

Die extragalaktischen Nebel und das Universum 201
Die extragalaktischen Nebel als Sternsysteme 201
Rotverschiebung der Spektrallinien 211
Verteilung der Nebel im Raum 217
Struktur des beobachtbaren Universums 223

Kosmogonie 232
Arbeitsmethoden 232
Gedanken zur Entstehung der Sternsysteme 233
Entstehung und Entwicklung der Sterne 236
Kosmogonie des Planetensystems 240

Kurzer geschichtlicher Überblick 242

VORWORT

Seit Jahrtausenden strebt der Mensch nach Erkenntnis der Welt der Gestirne. Die Vorstellungen, die er sich auf Grund der Beobachtungen bilden konnte, entwickelten sich im allgemeinen kontinuierlich, gelegentlich aber auch sprunghaft weiter. So formten sich die zahlreichen und den verschiedenen Teilgebieten entstammenden Erkenntnisse zum heutigen astronomischen Weltbild, das selbst auch nur ein Durchgangsstadium sein kann.

Im vorliegenden Büchlein ist versucht worden, dem astronomisch interessierten Leser eine Skizze dieses Bildes zu entwerfen. Dabei mußten zahlreiche Einzelheiten, die über den Rahmen eines 300seitigen, allgemeinverständlichen Taschenbuches hinausgehen, unterdrückt werden. Da die Astronomie der älteste Zweig der exakten Naturwissenschaften ist, werden in diesem Büchlein auch nur Ergebnisse und Probleme aus diesem Bereich der menschlichen Erkenntnis behandelt. Es soll somit helfen, eine Vorstellung von der Materie im Universum zu verbreiten, die frei von Voreingenommenheit und Aberglauben ist und sich auf gesicherte Beobachtungstatsachen zurückführen läßt.

Dem Verlag schließlich gebührt mein Dank für die gute Ausstattung des Buches.

Jena, Universitäts-Sternwarte
16. Dezember 1960 *Johannes Hoppe*

ERSTE ORIENTIERUNG

Wenn die Sonne hinter den Bäumen und Hügeln des westlichen Horizontes untergegangen ist, die Schatten der Nacht sich über die Erde ausbreiten und der Lärm des Tages allmählich verstummt, treten aus dem blaugrauen Himmelsgrunde die Sterne hervor. Wie viele Male haben wir dieses Naturschauspiel schon erlebt! Wir bemerken im Zimmer, daß die Dämmerung naht, und ersetzen das immer schwächer werdende Licht des scheidenden Tages durch künstliches Licht. Wir haben ja so wenig Zeit für die Vorgänge in der Natur. Wir erleben das Dunkelwerden auch auf der Straße und sehen flüchtig zwischen den hellen Lampen und erleuchteten Fenstern hier und dort einen Stern, einen winzigen Lichtpunkt, etwas bläulich funkelnd. Manchmal sind es auch ein ruhig leuchtender Planet oder die zunehmende Mondsichel, die in unseren Gedankenkreis eindringen möchten, aber wir registrieren ihre Anwesenheit kaum und hasten weiter.

Heute jedoch haben wir uns Zeit genommen für die Sterne, sind auf eine kleine Anhöhe gestiegen, von der aus wir den Horizont ringsum überblicken können. Die *helle Abenddämmerung*, oft auch als *bürgerliche Dämmerung* bezeichnet, hat ihre Farbenpracht entfaltet: über der schwarzblauen Silhouette des fernen Höhenrückens hat der westliche Himmel eine rotgelbe Färbung angenommen, die mit zunehmender Höhe verblaßt und über gelblich und bläulichweiß schließlich in ein sattes Blau übergeht. Die jetzt noch von den Strahlen der bereits untergegangenen Sonne zur hellen Rotglut entfachten feinen Wolkenstreifen werden sich in kurzer Zeit als dunkle Striche vom Himmel abheben. Am gegenüberliegenden östlichen Himmelsrand zeigt sich als dunkelblaues Kreissegment der in die untersten, meist dunsterfüllten Schichten unserer Lufthülle hineinragende Schatten der Erde. Solange sich die Sonne weniger als einen Grad unter dem Horizont befindet, der Beobachter also selbst noch ungefähr in der Grenzfläche zwischen Tag und Nacht steht, erscheint die obere Begrenzung des *Erdschattens*

scharf. Je tiefer die Sonne sinkt, desto höher steigt der Erdschatten, desto mehr verschwimmt seine obere Grenze. Er überschreitet dann den Scheitelpunkt des Himmelsgewölbes, den *Zenitpunkt*, und bewegt sich weiter auf den westlichen Dämmerungshimmel zu, wo er das helle, nunmehr fast farblos gewordene Segment des erloschenen Tages auf einen wenige Grad breiten Streifen zusammendrückt, wenn die Sonne eine Tiefe von 6° unter dem Horizont erreicht hat. Um eine Vorstellung zu haben, welcher Größe am Himmel der Winkel von 1° entspricht, sei hervorgehoben, daß der Durchmesser von Sonne und Mond — man nennt ihn im Gegensatz zum wirklichen meist den scheinbaren — rund $^1/_2$° beträgt. Die über dem Beobachtungsstandpunkt befindliche Schicht der Erdlufthülle, in der sich die hauptsächlichsten Wettervorgänge abspielen, die *Troposphäre*, wird nun nicht mehr von den Strahlen der Sonne getroffen. Das Ende der hellen Dämmerung ist erreicht, die *astronomische Dämmerung* beginnt.

Ein großer Teil der Sterne ist schon zu sehen. Die hellsten von ihnen wurden sogar bereits gegen Ende der hellen Dämmerung sichtbar. Im Süden steht ein besonders strahlender Stern mit auffällig ruhigem Licht; es ist gewiß ein Planet. Schwach angedeutet kann man auch schon einige neblig schimmernde Sternwolken im Bogen der Milchstraße erkennen, die sich vom Nordpunkt des Horizontes in halber Zenithöhe über West bis nach Südsüdwest hinzieht.

Die Sterne über uns leuchten heute noch so wie vor Hunderten, ja Tausenden von Jahren. Wer sie betrachtet und zum Nachdenken kommt, stößt auf dieselben Fragen, mit denen sich die Menschen vor zehntausend Jahren und noch früher auseinandergesetzt haben. Was sind die Sterne? Warum bewegen sie sich in bestimmter gesetzmäßiger Weise? Wie entsteht der Wechsel der Jahreszeiten? Wie ist das Weltall aufgebaut? Welche Stellung nimmt darin die Erde ein und damit schließlich der Mensch selbst? Fragen und Fragezeichen. Sie standen an der Schwelle jener ersten großen Zeitenwende, da der Mensch sich aus dem Tierreich erhob. Sie begleiteten ihn durch die Jahrtausende bis zur

Gegenwart. Die ersten Antworten mochten aus der Phantasie gewachsen und weitab von der Wirklichkeit gelegen sein. Aber irgendwann war die Erkenntnis da, daß die ersten groben Feststellungen durch sorgfältigere Beobachtungen verbessert werden können. Der Mensch begann, sich die Welt zu erobern.

So entstand die Astronomie, die wir heute als die Zusammenfassung der Erkenntnisse über die Gestirne betrachten. Sie ist somit eine der ältesten Naturwissenschaften und als solche eine Erfahrungswissenschaft; ihre einzige sichere Wissensquelle ist die Beobachtung. Was nicht der Beobachtung zugänglich ist, hat in der Astronomie keinen Platz und bleibt als Spekulation stets unsicher. Die Beobachtungen allein machen aber noch keine Wissenschaft aus; sie müssen in einen großen Zusammenhang eingeordnet und zu einem in sich widerspruchsfreien Bild verarbeitet werden. Niemals weiß man, ob die Genauigkeit der Beobachtungen ausreicht und ob alle wesentlichen Beobachtungen zur Lösung eines Problems im gegenwärtigen Augenblick schon gemacht sind. So bleibt immer die Möglichkeit des Fortschritts, des Tiefereindringens ins Innere der Natur, hier ins Weltall und seine Gesetzmäßigkeiten.

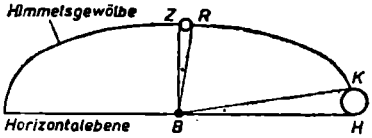
Wir sehen heute immer noch dieselben Gestirne wie die Menschen vor Jahrtausenden, aber wir sehen sie anders. Unsere Messungen liefern genauere Werte, und unsere Instrumente gestatten uns, einen viel größeren Bereich des Weltalls zu überblicken. So ist unser astronomisches Weltbild ein anderes als das früherer Zeiten.

Inzwischen ist es ganz dunkel geworden, die Sonne hat eine Tiefe von 18° unter dem Horizont erreicht, die astronomische Dämmerung ist zu Ende, die völlige Nachtdunkelheit angebrochen. Da wir uns an einem von irdischen Lichtquellen freien Platz befinden — nur in großer Ferne sieht man vereinzelt rötliche Lichtflecke, erleuchtete Fenster —, können wir uns nun ungestört der Betrachtung des gestirnten Himmels hingeben. Unzählbar erscheint uns das Heer der Sterne. Wie leicht wird oft das Wort *Millionen Sterne* hingeworfen. Diesmal aber nicht vom Astronomen, der sonst

nicht zögert, sehr große, „astronomische Zahlen" zu nennen. Die Sterne sind gezählt; der Astronom weiß, daß bis zu der für ein normales menschliches Auge noch wahrnehmbaren Sternhelligkeit am ganzen Himmel nur etwa 6 000 Sterne vorhanden sind. Da durchschnittlich die Hälfte dieser Sterne unterhalb des Horizontes steht, sind also nur rund 3 000 mit unbewaffnetem Auge als einzelne Lichtpunkte zu erkennen. Diese 3 000 Sterne haben verschiedene Helligkeit und verteilen sich auf die verschiedenen Größenklassen so, daß ihre Anzahl um so größer wird, je schwächere Sterne man betrachtet. Nach alter Gewohnheit bezeichnet man die hellsten als Sterne erster Größe, die schwächsten als Sterne sechster Größe. Diese Einteilung der Sterne nach Helligkeitsklassen geht auf den griechischen Astronomen HIPPARCH (130 v. u. Z.) zurück und beruht letzten Endes auf der Lichtempfindlichkeit der Netzhautelemente des menschlichen Auges, die von WEBER und FECHNER eingehend untersucht und in dem *psychophysischen Gesetz* mathematisch formuliert worden ist. Die heutigen Größenklassenangaben beruhen auf exakten Messungen der Strahlungsintensität und könnten auch in einer anderen Maßeinheit ausgedrückt werden, z. B. in Watt pro Quadratzentimeter (W/cm^2).
Die mit bloßem Auge sichtbaren Sterne sind an der Himmelssphäre nicht gleichmäßig verteilt. Wären sie es, so müßten zwei Sterne im Durchschnitt fast 3° Abstand voneinander haben. Zwischen den mit bloßem Auge wahrnehmbaren Sternen liegt also stets ein Stück Himmelsfläche. Bei genauem Hinschauen bemerken wir, daß dieser Himmelsuntergrund keineswegs dunkel ist, sondern eine beachtliche Lichtmenge aussendet. Nur wenn man aus einem erleuchteten Zimmer hinausschaut oder in der Nähe einer hellen Laterne den Himmel betrachtet, erscheint er uns fast kohlschwarz. Dieses Leuchten des Himmelshintergrundes stammt aus den verschiedensten Quellen: direktes Licht der jenseits der Grenze der Wahrnehmbarkeit liegenden schwachen Sterne, in der Erdatmosphäre gestreutes Sternlicht, Polarlicht, im interplanetaren Raum gestreutes Sonnenlicht oder Tierkreislicht und ein schwaches Leuchten der Schichten der Ionosphäre,

das durch eindringende kosmische Staubmassen und durch die Tageseinstrahlung der Sonne angeregt wird.

Das Himmelsgewölbe kann man ungefähr als hohle Halbkugel ansehen, deren Innenseite die leuchtenden Sternpunkte trägt. Am Tage empfindet man den Himmel je nach der Sichtklarheit und dem Bewölkungsgrad stärker oder schwächer abgeplattet (Abb.).



Der Himmel erscheint uns abgeplattet; Z Zenit, H Horizont, B Beobachter, $\sphericalangle ZBR = \sphericalangle KBH$, $ZR < HK$

Die Folge davon ist, daß die Sonne und der Mond in Horizontnähe wesentlich größer erscheinen, als wenn sie hoch am Himmel stehen. Es handelt sich also hierbei um eine besondere Art der optischen Täuschung und nicht, wie schon Ptolemäus gemeint hat und heute noch vielfach behauptet wird, um eine Wirkung der Strahlenbrechung. Aber auch der nachtdunkle Sternhimmel wird nicht als Halbkugel empfunden, wie eine genaue Betrachtung zeigt. Eine bekannte Sterngruppe wirkt in Horizontnähe immer größer als in Zenitnähe.

Man hat früher viel über die Gestalt des Himmels gestritten. Der Streit ist unnütz, denn er berührt das astronomische Problem der Sternsphäre nicht. Der Messung zugänglich ist hier nur die Richtung, aus der die Sternstrahlung zu uns gelangt. Also genügt die Angabe zweier Winkel zu ihrer eindeutigen Festlegung. Mit den Beziehungen zwischen den Richtungswinkeln, die von irgendeinem Punkte aus gemessen werden können, beschäftigt sich die *sphärische Trigonometrie*. Die für die Astronomie aus praktischen Gründen einzig vernünftige Darstellung des Himmels ist also die Sphäre, d. h. die Kugeloberfläche, wobei der Radius der Kugel beliebig gewählt werden kann.

Den Unterschied zwischen Fixstern und Planet kannten die Menschen schon vor rund drei Jahrtausenden. Die Bezeichnung *Fixstern* besagt soviel wie feststehender Stern. In bezug auf die Sternsphäre verhalten sich die Fixsterne so,

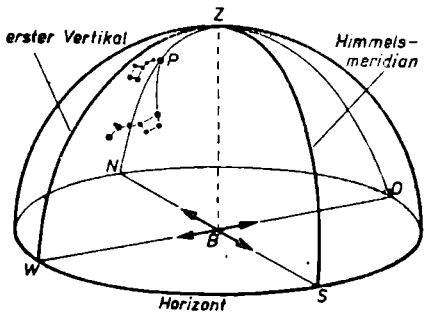
als wären sie auf deren Innenseite befestigt, behalten also zueinander dieselbe Lage bei, wenn man keine zu hohe Genauigkeit fordert. Die Bezeichnung *Planet* ist aus dem Griechischen abgeleitet und bedeutet Wandelstern. Im Altertum wurden auch die Sonne und der Mond als Planeten bezeichnet, weil auch sie ihren Ort unter den Fixsternen verändern. Zusammen mit den mit bloßem Auge sichtbaren Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn hatte man also sieben Wandelsterne. Rein äußerlich kann man die Planeten von den Fixsternen dadurch unterscheiden, daß sie zu den hellsten Gestirnen gehören und außerdem ein im wesentlichen ruhiges Licht zeigen. Im Gegensatz zu den Planeten funkeln oder szintillieren alle Fixsterne; die *Szintillation* wird durch die turbulenten Durchmischungsvorgänge in der Erdatmosphäre hervorgerufen, und die dabei mitwirkenden Turbulenzelemente besitzen eine bestimmte Ausdehnung, die kleiner ist als die Planetenscheiben, aber größer als die Fixsternscheibchen. So wird das Licht der Fixsterne fortwährend periodisch geschwächt und flackert. Bei den Planeten ist nur gelegentlich bei besonders großer Luftunruhe und in Horizontnähe ein geringfügiges Schwanken der Helligkeit zu bemerken.

Aus praktischen Gründen wurden, unterstützt von einer lebhaften Phantasie, schon frühzeitig die hellen Sterne oder charakteristische Gruppierungen zu bestimmten Figuren zusammengefaßt. Die Gestalten waren der Sage entlehnt oder bezogen sich auf wichtige und markante Ereignisse des Lebens, wobei Tiergestalten stets eine große Rolle spielten. Die heute noch vorhandenen 88 *Sternbilder* am gesamten Sternhimmel besitzen genau definierte Abgrenzungen und dienen nur zur bequemen Bezeichnung der den Sternbildern zugemessenen Himmelsfelder und außerdem, wie in alten Zeiten, natürlich auch zur leichten Orientierung an der Sternsphäre.

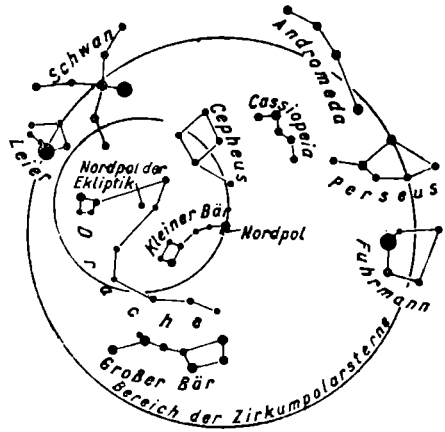
Von den Sternen und Sternbildern sind einige in jeder wolkenlosen Nacht zu sehen. Zu diesen gehört als wohl bekanntestes Sternbild der *Große Himmelswagen*, gebildet von sieben Sternen etwa 2. Größe. Der kleine Stern 4. Größe

über dem mittleren Stern der Wagendeichsel heißt im Volksmund *Reiterlein*. Manche nennen ihn auch den *Augenprüfer*; denn nur wer gute Augen hat, kann ihn erkennen. Mit Hilfe des Großen Wagens kann man leicht die Himmelsrichtungen bestimmen. Diese Orientierungsmöglichkeit kann von praktischer Bedeutung sein, wenn man in sternklarer Nacht beim Umherstreifen im Gelände die Wegrichtung verloren hat. Verlängert man die Strecke zwischen den Hinterrädersternen des Großen Wagens nach der Richtung, nach der die Deichsel durchgebogen ist, so trifft man in etwa fünffachem Abstand nach Durchqueren eines relativ sternarmen Himmelsfeldes auf einen Stern ebenfalls 2. Größe, den *Polarstern*, auch *Nordstern* genannt (Abb.). Seinen Namen verdankt er dem Umstande, daß er seit etwa 400 Jahren dem Nordpol des Himmels sehr nahe steht. Wird keine besondere Genauigkeit gefordert, so kann man ihn selbst als Himmelsnordpol betrachten, obwohl er sich in Wirklichkeit gegenwärtig um den Pol auf einem Kreise bewegt, dessen Durchmesser knapp vier Vollmondbreiten beträgt. Fällt man vom Himmelsnordpol *P* das Lot auf den Horizont, so trifft man auf den Nordpunkt *N* und hat mit der Nordrichtung zugleich die Orientierung im Gelände gewonnen (*O* Ost-, *W* West-, *S* Südrichtung).

Der Polarstern bezeichnet das vordere Ende der Deichsel des Kleinen Wagens, von dessen sieben Sternen nur zwei in ihrer Helligkeit etwa den Sternen des Großen Wagens gleichkommen. Die fachliche Bezeichnung der beiden eben betrachteten Sternbilder ist nach internationaler Übereinkunft: Große und Kleine Bärin, woraus der Volksmund irrtümlich die männlichen Bezeichnungen



Großer Wagen, Polarstern P und Himmelsrichtungen N, O, S, W; Z Zenit, B Beobachter

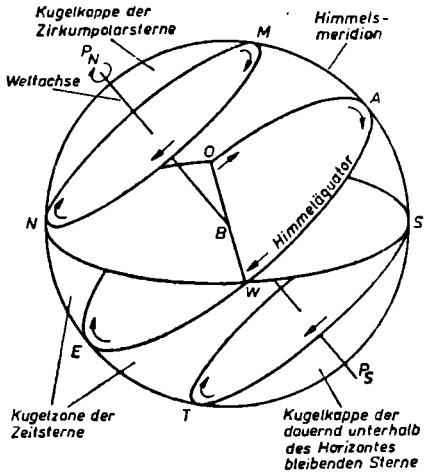


Die Zirkumpolarsterne in der geographischen Breite + 50°

Großer und Kleiner Bär gebildet hat. Diese Sternbilder sowie der Drache, die Leier, ein Teil des Schwans, der Cepheus, die Kassiopeia (auch Cassiopeia), der Perseus und der Fuhrmann gehen in unserer Breite (vgl. der Himmel in anderen Breiten) nie unter, sie sind in jeder sternklaren Nacht sichtbar. Solche um den Pol liegende Sterne werden *Zirkumpolarsterne* genannt (Abb.).

Um auch bei aufgelockerter Bewölkung den Nordpunkt nach der Stellung des Polarsterns mit Sicherheit auffinden zu können, muß man wenigstens die zirkumpolaren Sternbilder genau kennen. Man sollte sich daher nach der Abbildung nicht nur die Figuren der einzelnen Sternbilder, sondern auch ihre Lage zueinander gut einprägen. Eine kleine Wolkenlücke genügt dann oft schon, um den Ort des Polarsterns am Himmel festzulegen.

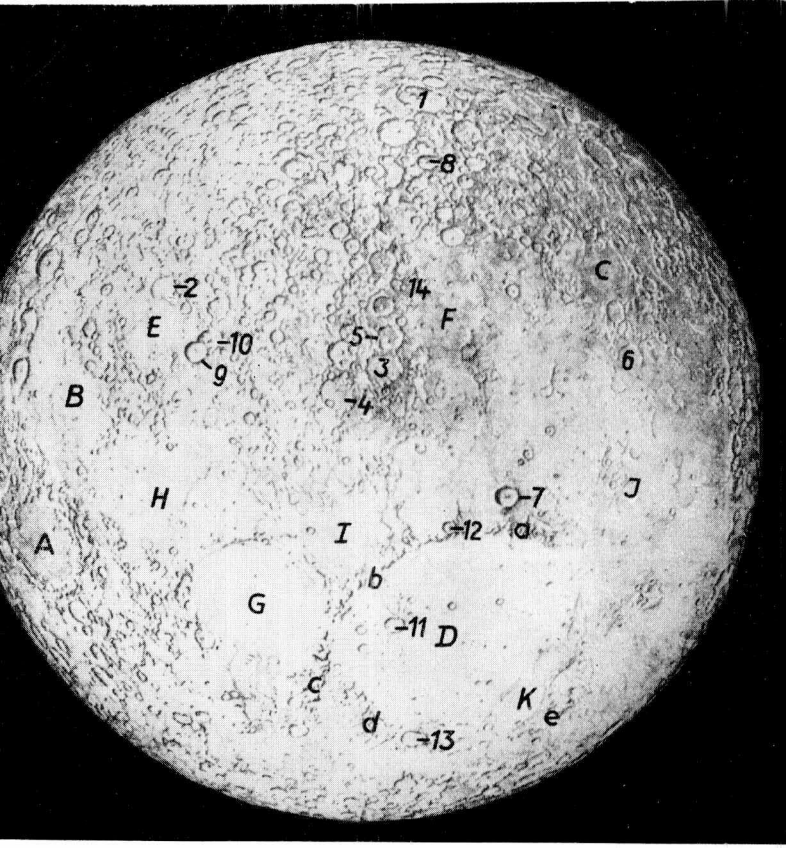
Außer den Zirkumpolarsternen, die wir eben kennengelernt haben, gibt es noch eine große Zahl anderer Fixsterne, die den östlichen, südlichen und westlichen Himmel bevölkern. Prägt man sich ihre Lage zum Horizont zu einer bestimmten Zeit ein und vergleicht ihre Stellung nach etwa einer halben oder ganzen Stunde, so kann man gewisse Veränderungen feststellen. Die Sterne am horizontnahen Osthimmel sind höher gestiegen, nicht senkrecht, sondern schräg in südlicher Richtung. Darunter sind nun vorher nicht sichtbare Sterne aufgetaucht. Außerdem erscheinen sie uns heller. Die Sterne des Südhimmels haben sich in westlicher Richtung um ein Bogenstück bewegt, das man bei ausgestrecktem Arm



Sichtbarkeit der Gestirne; B Beobachter, P_N, P_S Himmelsnordpol bzw. -südpol, O, S, W, N Himmelsrichtungen, A, M, E, T Punkte auf dem Meridian

mit dem Mittelfinger bedecken kann. Am Westhimmel sind die Sterne, die vorhin in Horizontnähe standen, verschwunden; andere, die höher standen, sind an ihre Stelle getreten und lichtschwächer geworden. Der Abstieg am Westhimmel erfolgt nicht senkrecht, sondern schräg in nördlicher Richtung. Am Nordhorizont haben sich schließlich die Sterne in östlicher Richtung um etwa eine Fingerlänge weiterbewegt. Wegen der am Osthorizont auftauchenden und am westlichen Himmelsrand verschwindenden Sterne muß man die über der Horizontalebene befindliche sichtbare Himmelskugel zur Vollkugel ergänzen (Abb.), wenn man die Bewegungs- und Sichtbarkeitsverhältnisse vernünftig deuten will. Die Gesamtheit der beobachteten Sternbewegungen läßt sich ungezwungen nur darstellen durch eine von Ost nach West gerichtete Drehung der Sternsphäre um eine schräg zum Himmelsnordpol weisende Achse, die *Weltachse*. Man erhält sie, wenn man den Nordpol P_N des Himmels über den Beobachtungsort B mit dem Südpol P_S verbindet.

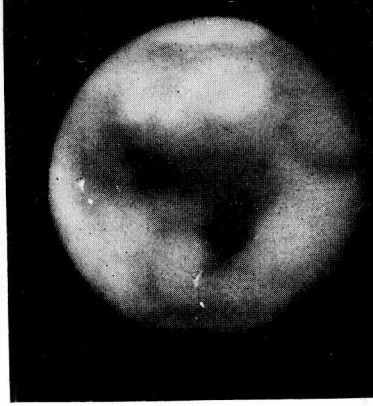
Wie wir heute wissen, steht die Weltachse in engster Beziehung zur Rotationsachse der Erde; gelegentlich wird auch die Erde als Welt bezeichnet, etwa in dem Ausdruck Weltmeer. In bezug auf die Fixsterne fällt die Weltachse des Beobachtungsortes mit der Rotationsachse der Erde zusammen, weil der Durchmesser des Planeten Erde gegenüber



Tafel III

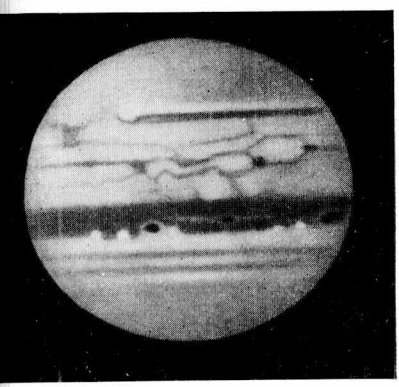
Mondübersichtskarte *A Mare Crisium, B Mare Foecunditatis, C Mare Humorum, D Mare Imbrium, E Mare Nectaris, F Mare Nubium, G Mare Serenitatis, H Mare Transquillitatis, I Mare Vaporum, J Oceanus Procellarum, K Sinus Iridum — a Karpaten, b Apenninen, c Kaukasus, d Alpen, e Jura — 1 Wallebene Clavius, 2 Wallebene Fracastorius, 3 Wallebene Ptolemäus, 4 Wallebene Hipparchus, 5 Wallebene Alphonsus, 6 Wallebene Letronne — 7 Ringgebirge Copernicus, 8 Ringgebirge Tycho, 9 Ringgebirge Theophilus, 10 Ringgebirge Cyrillus, 11 Ringgebirge Archimedes, 12 Ringgebirge Eratosthenes, 13 Ringgebirge Plato — 14 Steilhang Lange Wand*

Venus kurz vor der unteren Konjunktion

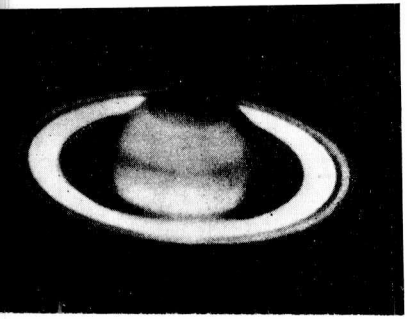


Mars, südliche Polkappe und große Syrte

Tafel IV



Jupiter, nach einer Zeichnung von Graff



Saturn mit weit geöffnetem Ring

den Fixsternentfernungen verschwindend klein ist. Für die Beobachtung und Messung der scheinbaren Bewegungen von Sonne, Mond, Planeten und Kometen ist zu beachten, daß die Weltachse unseres Beobachtungsortes parallel zur Erdachse steht, und zwar in einem Abstand, der abhängig ist vom Erdradius und der geographischen Breite des Beobachtungsortes.

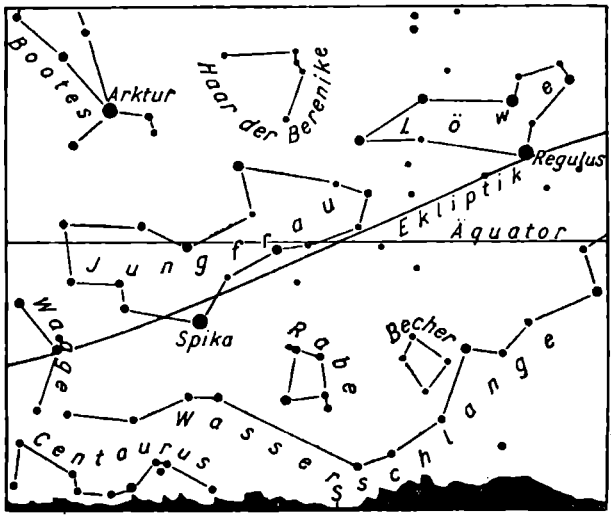
Ein Stern, der im Ostpunkt O aufgeht, beschreibt die Bahn $OAWEO$ und zeigt in seiner Bewegung alle Eigenschaften der täglichen Drehung der Sternsphäre. Diese Sternbahn nennt man, weil sie die Himmelssphäre in zwei gleiche Halbkugeln teilt, auch *Himmelsäquator*. Oberhalb und unterhalb der Ebene des Himmelsäquators gibt es zwei parallele Ebenen, die durch den Nordpunkt N bzw. den Südpunkt S des Horizontes hindurchgehen. Die Schnittkreise dieser Ebenen mit der Sternsphäre grenzen die Kugelkappe NP_NM der im Beobachtungsort B stets sichtbaren bzw. die Kugelkappe SP_ST der stets unsichtbaren Sterne von der Zone der sogenannten *Zeitsterne* ab, deren scheinbare Tagesbahn teils oberhalb, teils unterhalb des Horizontes liegt. Bei den Sternen, die oberhalb oder richtiger nördlich vom Himmelsäquator liegen, ist der sichtbare Teil der Tagesbahn größer als der unsichtbare. Die umgekehrten Verhältnisse findet man südlich vom Himmelsäquator.

Zwischen Aufgang und Untergang erreicht jeder Stern eine größte Höhe. Dieses Ereignis wird *Kulmination* genannt. Verbindet man die Kulminationspunkte aller Sterne, so erhält man einen Kreis, den *Himmelsmeridian*, der senkrecht auf dem Horizont steht und vom Südpunkt durch das Zenit über den Nordpol bis zum Nordpunkt verläuft. Kulmination bedeutet also gleichzeitig *Durchgang durch den Himmelsmeridian*. Da die Sonne gegen Mittag kulminiert, nennt man ihn auch *Mittagskreis*.

Die Zirkumpolarsterne, die weder auf- noch untergehen, können im Verlaufe eines Tages gewöhnlich zweimal im Himmelsmeridian beobachtet werden. Man unterscheidet die *obere Kulmination*, für die der Stern zwischen Nordpol und Südpunkt steht, von der *unteren Kulmination*, bei der

er den Meridian zwischen Nordpol und Nordpunkt überquert. Strenggenommen führt jeder Stern eine obere und untere Kulmination aus. Bei den Zeitsternen ist die untere Kulmination nicht beobachtbar, bei den nie sichtbaren Sternen um den Himmelssüdpol herum, die das Gegenstück zu den Zirkumpolarsternen bilden, sind beide Kulminationen in unseren Breiten nicht beobachtbar.

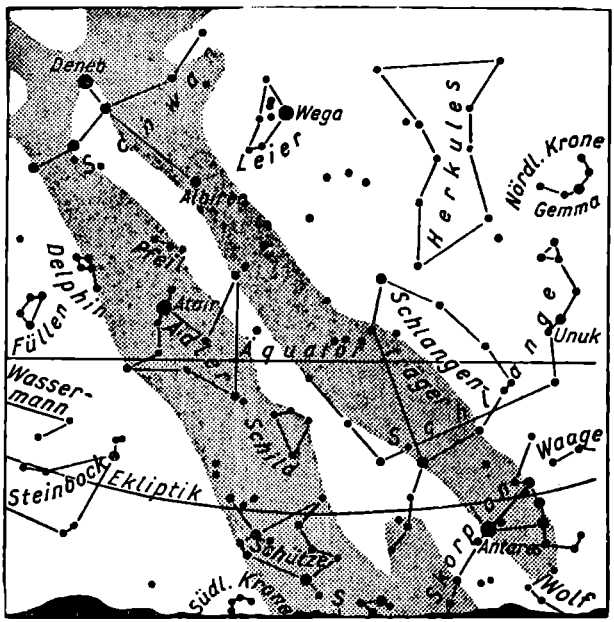
Die Ost-West-Bewegung der Sterne diente schon frühzeitig zur Bestimmung der Zeit. Diese Bewegung erfolgt mit einer von mechanischen Uhrwerken nicht zu erreichenden Gleichförmigkeit. Die Himmelsuhr ist, von den mit sehr viel technischem Aufwand betriebenen modernen Quarz- bzw. Atomuhren abgesehen, der genaueste Zeitanzeiger. Das Zifferblatt ist der Sternhimmel selbst oder einfacher: der in 24 Stunden geteilte Himmelsäquator. Der Zeiger ist der Himmelsmeridian. Selbst die mechanischen Präzisionsuhren in den Sternwarten gehen nicht so genau und werden in ihrem Gang durch Vergleich mit dem Sternhimmel laufend



Der mitternächtliche Himmel zu Beginn des Frühlings

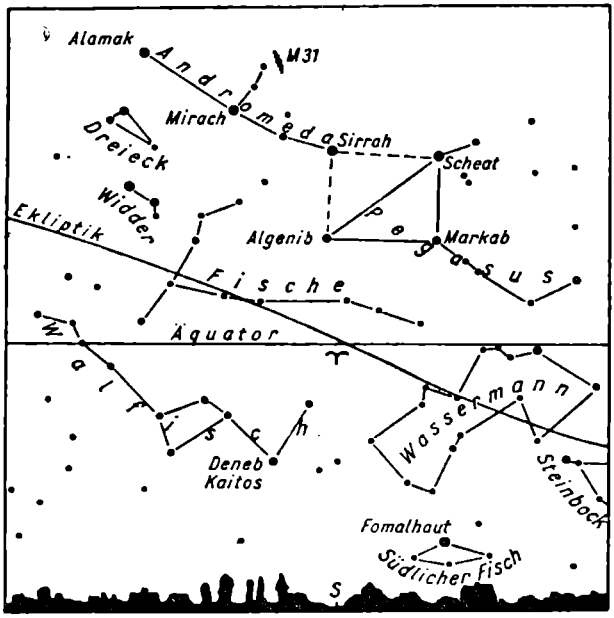
kontrolliert. Das Ablesen der Zeit geschieht, wie noch gezeigt wird, durch die Beobachtung von Sternen, die ihrer Lage am Himmel nach bekannt sind. Die Zeitbestimmung ist ein Beispiel für die praktische Bedeutung der Astronomie.

Zur Vervollständigung unserer Kenntnis des gestirnten Himmels werden in den folgenden vier Abbildungen die im Laufe des Jahres gegen Mitternacht am Südhimmel sichtbaren Zeitsterne gezeigt. Um die Zeit des Frühlingsanfangs finden wir dort das Frühlingsdreieck (Abb.), gebildet aus drei Sternen erster Größe: dem *Regulus* im Sternbild *Löwe*, dem *Arktur* im *Bootes* und der *Spika* in der *Jungfrau*. In den Sommermonaten ist an seine Stelle das wesentlich kleinere Sommerdreieck (Abb.) inmitten der steil aufsteigenden Sommermilchstraße getreten. Die zum Horizont gerichtete



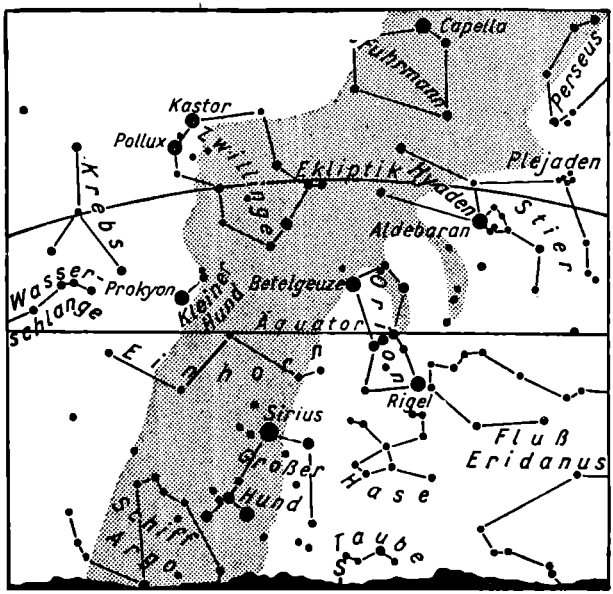
Der mitternächtliche Himmel zu Beginn des Sommers

Spitze des nahezu gleichschenkligen Dreiecks nimmt *Atair*, auch *Altair*, der hellste Stern des *Adlers*, ein, oben rechts finden wir die *Wega* im Sternbild *Leier* und links, etwa gleichhoch, den *Deneb* im *Schwan*. An dieser Stelle gabelt sich die Milchstraße nach unten; der östliche Zweig verläuft durch den *Adler* zum *Schützen*, der westliche durch den *Schlangenträger* oder *Ophiuchus* zum *Skorpion*. Wenn der Herbst beginnt, fehlen am südlichen Mitternachtshimmel (Abb.) auffällige Sternbilder mit hellen Sternen. Der hellste Stern im *Südlichen Fisch*, *Fomalhaut*, kommt wegen seiner Horizontnähe kaum zur Geltung. Auch der darüber befindliche *Wassermann* ist kein markantes Sternbild, desgleichen sind die *Fische* schwer aufzufinden. Am deutlichsten hebt sich der östlich stehende *Wallisch* hervor, auch der *Widder* ist leicht zu erkennen und das hochstehende Sternviereck,



Der mitternächtliche Himmel zu Beginn des Herbstes

das teils zum *Pegasus*, teils zur *Andromeda* gehört. Zur Zeit der Wintersonnenwende (Abb.) steigt der andere Ast des bei uns sichtbaren Teils der Milchstraße steil am Südhimmel auf, und wir finden eine der an hellen Sternen reichsten Gegenden des Himmels. Sechs Sternbilder ordnen sich mit ihren hellsten Sternen um die etwas exzentrisch gelagerte rötliche *Betelgeuze*, auch *Beteigeuze* genannt, zu einem nahezu regelmäßigen Sechseck. Die auffälligste Sterngruppe ist die Gestalt des Jägers *Orion*, begleitet von seinen beiden Hunden. *Sirius*, der Hauptstern im *Großen Hund*, ist der hellste Fixstern am ganzen Himmel. Der *Gürtel* oder *Jakobstab* im Orion — drei Sterne in gerader Linie bei etwa gleichem Abstand — weist nach unten zum Großen Hund, nach oben zum Stier, dessen hellster Stern der rötliche *Aldebaran* ist. Aldebaran gehört zu einer Sternfamilie, einem soge-



Der mitternächtliche Himmel zu Beginn des Winters

nannten *offenen Sternhaufen*, den *Hyaden*. Zum Sternbild Stier gehört ein zweiter Sternhaufen, die *Plejaden* oder das *Siebengestirn*. In der Nähe des Scheitelpunktes des Himmels, zum Teil schon zum Bereich der Zirkumpolarsterne gehörend, finden wir den *Fuhrmann* mit *Kapella* (Capella) als hellstem Stern; zwischen ihm und dem hellsten Stern im Kleinen Hund, *Prokyon*, leuchten die *Zwillinge*, *Kastor* und *Pollux*. Die Milchstraße zieht sich vom *Perseus* kommend durch den Fuhrmann und die Zwillinge und zwischen den beiden Hunden zum Horizont hin, wobei Ausläufer auch den Stier und Orion streifen. Im Gegensatz zur Sommermilchstraße ist die Wintermilchstraße ungeteilt.
Wir haben die ersten Schritte zur Kenntnisnahme astronomischen Wissens getan und mit Hilfe von Abbildungen versucht, den Anblick des Himmels zu ersetzen. Dieser Ersatz ist aber nur bis zu einem gewissen Grade möglich. Zu einem wirklichen Verständnis gelangt man erst, wenn man die Mühe nicht scheut, die Sterne selbst zu betrachten und ihren Lauf zu verfolgen, kurz: sich von alldem mit eigenen Augen zu überzeugen, wovon hier gesprochen wurde.

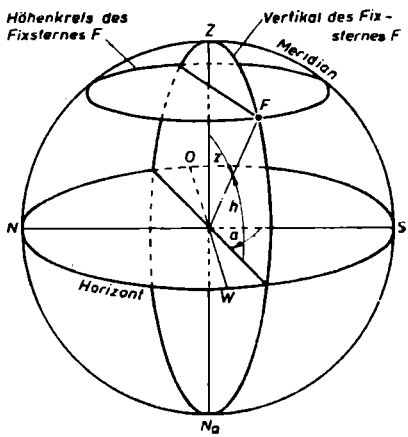
GRUNDLAGEN DER ASTRONOMIE

Der Mensch, der die Himmelskörper und ihre Bewegungen im Universum beobachtet, steht immer im Mittelpunkt der Welt. Das ist eine Erkenntnis, zu der man bereits vor Jahrtausenden gelangt ist. Die primitive Anwendung dieser Erkenntnis führt zum geozentrischen Standpunkt, den der Mensch seit einigen Jahrhunderten endgültig überwunden hat. Trotzdem ist vorläufig noch die Erde der Beobachtungsmittelpunkt der Welt. Zu den grundlegenden Teilgebieten der Himmelskunde gehört die *sphärische Astronomie*, deren Aufgaben die Beobachtung und Beschreibung der verwickelten Bewegungsvorgänge an der Sternsphäre und die Erarbeitung sowie die Bereitstellung der dazu erforderlichen Unterlagen sind.

Als exakte Naturwissenschaft gründet sich die Astronomie auf Messungen. In der sphärischen Astronomie sind es wesentlich Richtungs-, d. h. Winkelmessungen. Voraussetzung für solche Messungen ist ein Koordinatensystem, das nach praktischen Gesichtspunkten auszuwählen ist. In der Astronomie sind die verschiedensten Koordinatensysteme gebräuchlich. Die Frage, welches Koordinatensystem zu verwenden ist, wird von dem gerade vorliegenden Problem aus verschieden zu beantworten sein.

Astronomische Koordinatensysteme

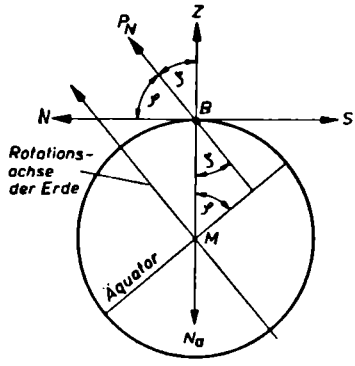
Horizontalsystem. Das natürliche Koordinatensystem der Astronomie ist das Horizontalsystem (Abb.). Die Grundebene, d. h. die *Horizontalebene*, wird durch die Oberfläche einer ruhenden Flüssigkeit, z. B. einer Menge in eine nicht zu kleine Schale gefüllten Quecksilbers, dargestellt. Ihre Schnittlinie mit der Sternsphäre ist der *Horizont*. Die Punkte *S*, *W*, *N*, *O* mögen die vier *Haupthimmelsrichtungen* in bezug auf den Beobachtungsort bezeichnen. Das in ihm errichtete Lot realisiert die Richtung zum *Zenit* Z bzw. zum Fußpunkt oder *Nadir Na*. Durch jeden Fixstern *F* an der Sphäre kann man zwei aufeinander senkrecht stehende Ebenen legen, eine Hauptebene *ZFNa*, die durch den Beobachtungsort und den Scheitelpunkt Z sowie den Fußpunkt *Na* hindurchgeht und gleichfalls senkrecht auf der Horizontalebene steht. Diese Ebene schneidet die Sternsphäre in einem Großkreis, der *Vertikal* genannt wird. Die zweite Ebene durch den Punkt *F* liegt parallel zur Horizontalebene



Horizontalsystem

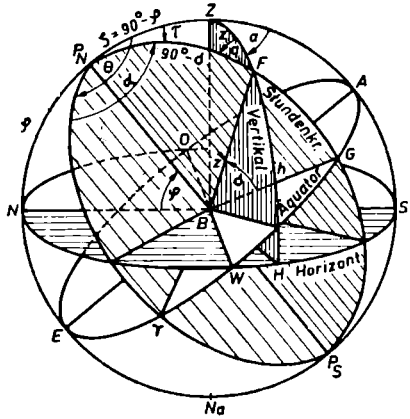
und schneidet die Sphäre in einem Nebenkreis, der als *Höhenkreis* bezeichnet wird. Der *Seiten-* und der *Höhenwinkel* sind die beiden Koordinaten, mit denen die Lage von *F* eindeutig bestimmt ist. Vereinbarungsgemäß zählt man den in der Horizontalebene liegenden Seitenwinkel vom Südpunkt *S* aus im Sinne der täglichen Drehung des Himmels und nennt ihn das *Azimut a* und rechnet den *Höhenwinkel h* in der Vertikalebene des Sternes vom Horizont aufwärts. Für viele Zwecke ist es praktischer, statt des Höhenwinkels die *Zenitdistanz* $z = 90° - h$ zu verwenden. Das Azimut wird von 0° bis 360° durchgezählt, die Höhe des Sternes an der sichtbaren Sphäre liegt zwischen 0° und 90°; unterhalb des Horizontes rechnet man die Höhe negativ von 0° bis —90°. Die Zenitdistanz ist ein Winkel zwischen 0° und 180°. Mit Hilfe eines Universalinstrumentes oder eines neuzeitlichen Theodoliten kann man die beiden Koordinaten leicht und mit hoher Genauigkeit bestimmen. Der Nachteil dieses Systems liegt darin, daß die gemessenen Koordinaten eines Gestirns zeitabhängig sind. Im Hinblick darauf, daß die geographischen Koordinaten eines Ortes auf der Erde unveränderliche Kennwerte sind, wird man danach streben, auch zu ähnlichen Gestirnkoordinaten zu gelangen. Dieses Ziel kann in zwei Schritten erreicht werden.

Äquatorsysteme. Die Bewegung der Sterne erfolgt, wie wir bereits wissen, parallel zu der senkrecht auf der Weltachse stehenden Hauptebene des Äquators. Da die tägliche Drehung der Sternsphäre das Spiegelbild der Erdrotation ist, muß die Höhe des Himmelsnordpols von der Lage des Beobachtungsortes auf der Erde abhängen. In der Abbildung zeigt ein



Die Polhöhe NBP_N ist gleich der geographischen Breite φ

Das Äquatorsystem



meridionaler Schnitt der Erdkugel durch den Beobachtungsort B dessen Horizontalebene NS und seine geographische Breite φ, die jeweils mit dem Winkel ζ einen rechten Winkel bildet, so daß hieraus das allgemeingültige Ergebnis folgt: *die Polhöhe NBP_N ist gleich der geographischen Breite φ.* Wird das Horizontalsystem im Himmelsmeridian um den Winkel ζ der Zenitdistanz des Nordpols gekippt, so geht es in das Äquatorsystem über.

Hier unterscheidet man zwei Varianten, je nachdem die Zählung der Längenkoordinate von einem festen oder beweglichen Nullpunkt aus gerechnet wird (Abb.). Im *festen Äquatorsystem* ist die Längenkoordinate der vom Meridian aus gezählte *Stundenwinkel* τ und die Breitenkoordinate die vom Äquator ab gerechnete Abweichung oder *Deklination* δ. Die Verknüpfung zwischen dem Horizontal- und dem Äquatorsystem liefert das *nautische Dreieck* P_NZF, dessen unveränderliche Seite $P_NZ = \zeta = 90° - \varphi$ ist. Die übrigen Seiten und Winkel sind die Zenitdistanz $z = ZF$ im *Vertikal* des Sternes F, die Poldistanz $\sigma = 90° - \delta = P_NF$ im *Stundenkreis* des Sternes F, der Stundenwinkel τ, der Zenitwinkel $180° - a$ und der parallaktische Winkel ZFP_N, der meist mit q bezeichnet wird. Die Umrechnung der Koordinaten der beiden Systeme ineinander führt auf die Berechnung des nautischen Dreiecks und ist eine Aufgabe der sphärischen Trigonometrie.

Von den beiden Koordinaten eines Sternes im festen Äquatorsystem ist die Deklination konstant, der Stundenwinkel τ aber eine Funktion der Zeit t, nämlich $\tau = \omega\,(t - t_K)$, wenn ω die *Rotationsfrequenz der Erde* — hier ausgedrückt

in Grad pro Stunde $\left[\frac{\circ}{h}\right]$ — und t_K die *Kulminationszeit* bzw. die Zeit des *Meridiandurchganges* des betrachteten Gestirns ist, sofern dieses keine merkliche Eigenbewegung besitzt. Um auch eine konstante Längenkoordinate zu erhalten, ist die Zählung auf einen mit der Sternsphäre bewegten Punkt zu beziehen. Als solchen hätte man irgendeinen beliebigen Stern auswählen können. Aus praktischen Gründen nahm man den *Frühlingspunkt*, in dem sich die Sonne zu Beginn des Frühlings befindet. Der Frühlingspunkt lag zur Zeit, als man ihn zum Nullpunkt erklärte, im Sternbild Widder. Man bezeichnet ihn deshalb meist heute noch mit dem Symbol des Widders ♈ und nennt ihn auch *Widderpunkt*. Nach ihm, der ein ausgezeichneter Punkt am Fixsternhimmel ist, wird die *Sternzeit* Θ als Stundenwinkel des Widderpunktes definiert. Der Umrechnungsfaktor von Winkel oder Bogen in Zeit ist der reziproke Wert der Rotationsfrequenz der Erde $\left(\frac{1}{\omega} = \frac{1}{15}\left[\frac{h}{\circ}\right]\right)$. Die nahezu konstante Längenkoordinate eines Sterns im *beweglichen Äquatorsystem* ist die vom Stundenkreis des Frühlingspunktes entgegen der täglichen Drehung der Sternsphäre gezählte *Rektaszension* α oder die *„gerade Aufsteigung"*, wie die durch allzu wörtliche Übersetzung des lateinischen Ausdruckes erhaltene unschöne Bezeichnung lautet. Eine sinnvollere Übersetzung des Wortes Rektaszension wäre *„rechtläufige Zählung"*, weil sie an den Begriff der rechtläufigen Bewegung der Planeten anknüpft. Von Außenstehenden wird angesichts der beiden Varianten des Äquatorsystems oft die Frage nach der Notwendigkeit dieser Doppelzählung gestellt. Jedes der beiden Systeme hat nicht nur seine historische, sondern auch seine praktische Bedeutung. Die Längenkoordinate des festen Systems, der Stundenwinkel, ist die Grundlage der *Zeitrechnung*; die des beweglichen, die Rektaszension, bildet zusammen mit der Deklination das *Fundamental-Koordinaten-System* und ist die Grundlage sowohl der Bahnbestimmung der planetarischen Körper als auch der Untersuchungen über den Aufbau unseres Sternsystems. Die beiden gegenläufig gerichteten

Zählungen sind die Folge der beiden Hauptbewegungsrichtungen an der Sternsphäre: der täglichen Drehung aller Gestirne und der entgegengesetzt ablaufenden langsameren Bewegungen von Mond, Sonne und Planeten. Sie dienen also letztlich zur bequemeren Bewältigung der in beiden Gebieten anfallenden Aufgaben. Die Verknüpfung zwischen den beiden Varianten des Äquatorsystems liefert eine einfache Beziehung, die man aus der Abbildung des Äquatorsystems am Himmelsnordpol leicht ablesen kann: $\Theta = \alpha + \tau$ oder in Worten: *Die Sternzeit ist gleich der Summe aus der Rektaszension und dem Stundenwinkel irgendeines Gestirns.* Neben der Fixierung des Gestirnortes durch seine Koordinaten an der Sphäre sind noch andere Arten der Kennzeichnung im Gebrauch. So haben helle und auffällige Erscheinungen meist einen Namen, z. B. *Sirius, Polarstern, Plejaden, Orionnebel.* Die Zuordnung der Sterne zu den Bereichen der *Sternbilder* war früher und ist noch heute üblich. So bezeichnete Kopernikus in seinem Sternkatalog den Stern χ im Bärenhüter mit „der nördliche von zweien am Jagdspieß unter der Schulter". Im Jahre 1603 führte Bayer in seinem Sternatlas die kleinen griechischen und lateinischen Buchstaben zur Bezeichnung der helleren Sterne ein. In der damaligen Sprache der Wissenschaftler wurden die Sternbilder mit lateinischen Namen und Abkürzungen bezeichnet (Tabelle), so Sirius als α CMa, der Polarstern als α UMi und das Reiterlein, der Alkor als g UMa. Später traten bei Bedarf noch die arabischen Zahlen hinzu. So bestimmte Bessel 1838/39 die Parallaxe von 61 Cyg. Nach Argelander werden veränderliche Sterne, sofern sie nicht bereits bezeichnet sind, wie z. B. Algol als β Per, Mira als o Cet und δ Cep, durch die großen Buchstaben R, S, T ... Z gekennzeichnet. Da diese bald nicht mehr ausreichten, erweiterte man die Bezeichnungen auf die Doppelbuchstaben RR, RS, RT ... RZ, SS, ST ... ZZ und weiter bis QQ. Sternhaufen und Nebel werden mit der Nummer und der Abkürzung des Kataloges bezeichnet. Der große Kugelsternhaufen im Herkules hat in dem von Messier im Jahre 1784 herausgegebenen Katalog die Nummer 13 und wird als

M 13, der Andromedanebel als M 31, der Orionnebel mit M 42 bezeichnet. Die Abkürzungen für den *neuen allgemeinen Katalog* „New General Catalogue" von DREYER (1888) mit den beiden Zusatzkatalogen „Index Catalogue" sind NGC, IC I und IC II. So kann man statt M 13 auch NGC 6205 und M 31 für NGC 224 schreiben.

Wichtige Sternbilder

lateinischer Name	Abkürzung	deutscher Name
Andromeda	And	Andromeda
Aquarius	Aqr	Wassermann
Aquila	Aql	Adler
Aries	Ari	Widder
Auriga	Aur	Fuhrmann
Bootes	Boo	Bärenhüter
Cancer	Cnc	Krebs
Canes Venatici	CVn	Jagdhunde
Canis Maior	CMa	Großer Hund
Canis Minor	CMi	Kleiner Hund
Capricornus	Cap	Steinbock
Cassiopeia	Cas	Kassiopeia
Cepheus	Cep	Cepheus
Cetus	Cet	Walfisch
Coma Berenices	Com	Haar der Berenike
Corona Borealis	CrB	Nördliche Krone
Cygnus	Cyg	Schwan
Draco	Dra	Drache
Gemini	Gem	Zwillinge
Hercules	Her	Herkules
Hydra	Hya	Wasserschlange
Leo	Leo	Löwe
Libra	Lib	Waage
Lyra	Lyr	Leier
Ophiuchus	Oph	Schlangenträger
Orion	Ori	Orion
Pegasus	Peg	Pegasus
Perseus	Per	Perseus
Pisces	Psc	Fische
Piscis Austrinus	PsA	Südlicher Fisch
Sagittarius	Sgr	Schütze
Scorpius	Sco	Skorpion
Serpens	Ser	Schlange
Taurus	Tau	Stier
Triangulum	Tri	Dreieck
Ursa Maior	UMa	Großer Bär
Ursa Minor	UMi	Kleiner Bär
Virgo	Vir	Jungfrau

Bewegung der Himmelskörper und Zeitrechnung

Die Welt, in der wir leben, die wir mit den naturwissenschaftlichen Methoden erforschen, ist voller Bewegung und Entwicklung. An dem Ablauf der Bewegung, an dem Fortschreiten der Entwicklung messen und erkennen wir die Zeit. Zur Ausführung von Messungen bedarf man eines Maßes, einer Maßeinheit, deren Wahl willkürlich ist. Der Mensch hat nach der ihm von der Natur dargebotenen Einheit gegriffen und den Tag als natürliche Einheit festgesetzt.

Da er jedoch ständig mit kürzeren Zeitabschnitten zu rechnen hat, wurde der Tag nach dem damals gebräuchlichen Zahlensystem willkürlich in 24 Stunden eingeteilt. Auch das reichte für wissenschaftliche Zwecke noch nicht aus, und man schuf noch kleinere Einheiten. Der sechzigste Teil der Stunde wurde als die *erste verkleinerte Zeiteinheit*, lateinisch als *pars prima minuta* bezeichnet. Der nächste Schritt führte zur *zweiten verkleinerten Zeiteinheit*, dem sechzigsten Teil der vorhergehenden neuen Einheit, lateinisch *pars secunda minuta*. Unlogik und Unbekümmertheit des Sprachgebrauchs brachten es zustande, daß sich für die erste Verkleinerte die Bezeichnung *minuta*, für die zweite das Wort *secunda* einbürgerten. Der Tag ist somit in 1440 Minuten bzw. 86400 Sekunden eingeteilt. Noch kleinere Zeitdifferenzen drückt man heute in meist dezimalen Bruchteilen einer Sekunde aus.

Sternzeit. Was aber ist ein Tag? Landläufig die Zeit vom Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang. Daran schließt sich die Nacht. Im astronomischen Sinne wird der Tag als das Ganze aufgefaßt, als der volle Umlauf der Gestirne um die Sphäre. Der Zeitpunkt des Auf- und Unterganges ist wegen der Unebenheiten des Himmelsrandes nicht genau zu erfassen. Schon frühzeitig legte man den Nullpunkt der Tageszählung in die Mitte der Tagesbahn, in den Himmelsmeridian, rechnete also von der Kulmination ab. Bis zum Jahre 1924 begann der astronomische Tag mit dem der Beobachtung unmittelbar zugänglichen Augenblick der oberen

Kulmination. Für die Astronomen hatte diese Zählung den Vorteil einer einheitlichen Datierung der Beobachtungsnächte. Der moderne Nautiker, für den astronomische Ortsbestimmungen auf See mit der Weiterentwicklung der Technik des Funkwesens nur noch zweitrangige Bedeutung haben, hat diese von der bürgerlichen Zeitzählung abweichende astronomische Zeiteinteilung offenbar als lästig empfunden und abgeschafft, doch nur in bezug auf die Sonne. Die nach dem Umlauf der Sterne gerechnete Zeit (vgl. Äquatorsysteme), der *Sterntag*, beginnt mit der *oberen Kulmination* des Widderpunktes und ist folglich die Zeit, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden oberen Kulminationen dieses Punktes der Sternsphäre vergeht. Die tägliche Drehung des Sternhimmels von Ost nach West ist das Spiegelbild der Erdrotation. Wegen der großen Masse der Erde erfolgt die Rotation sehr gleichförmig. Die in neuerer Zeit mit Hilfe von Quarzuhren nachgewiesenen geringfügigen kurz- und langperiodischen Schwankungen der Erdrotation und damit der Sternzeit erklären sich aus den relativ geringen geotektonischen Massenverlagerungen in der Erdkruste und im Erdmantel sowie aus den jahreszeitlich bedingten Massenverschiebungen auf der Erdoberfläche. Sie liegen in der Größenordnung einer hundertstel Sekunde und bestätigen somit die für die meisten Fälle auch der astronomischen Praxis benötigte große Gleichförmigkeit der Sternzeit. Dies ist einer der Gründe, weshalb auf einer Sternwarte mindestens eine Präzisionsuhr die Sternzeit anzeigt und erst an zweiter Stelle eine z. B. nach Mitteleuropäischer Zeit gehende Uhr aufgestellt ist. Wegen der Drehung der Sternsphäre müssen größere astronomische Beobachtungsinstrumente durch ein Uhrwerk dieser Bewegung nachgeführt werden. Kein Uhrwerk erfüllt diese Aufgabe über längere Zeit hin mit ausreichender Genauigkeit. Deshalb läßt man den Nachlauf der Fernrohre durch eine Sternzeituhr steuern, derart, daß eine Bremsung wirksam wird, wenn der Antrieb zu schnell ist. Die Genauigkeit der Präzisions-Sternzeituhr reicht wohl zur Regulierung des Uhrwerksantriebes aus, ist aber davon abgesehen selbst noch korrekturbedürftig.

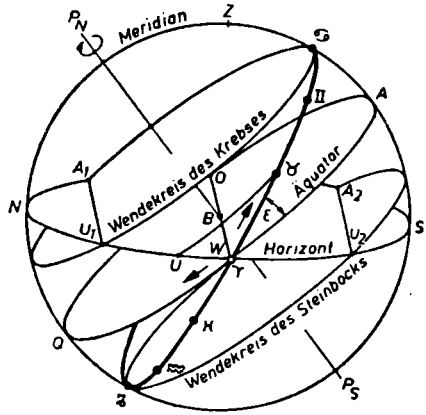
Die Sternsphäre mit ihrer gleichförmigen Rotation ist die genaueste Sternzeituhr der Praxis. Mit ihr werden die mechanischen Präzisionsuhren verglichen und der Zeitunterschied festgestellt. Diesen Arbeitsvorgang nennt man eine *Zeitbestimmung*. Zu diesem Zweck muß durch eine Sternbeobachtung die tatsächliche Zeit für einen mit Hilfe einer Uhr definierten Zeitpunkt festgestellt werden. Am einfachsten geschieht dies, indem der Zeitpunkt des Meridiandurchgangs eines bekannten Sternes mit der zu kontrollierenden Uhr bestimmt wird. Unter einem bekannten Stern versteht man hier einen solchen, dessen fundamentale Koordinaten α und δ mit höchster Genauigkeit bekannt sind. Das Beobachtungsinstrument wird hierfür in den Meridian eingerichtet. In der Mitte des meist kreisförmigen Gesichtsfeldes befindet sich ein vertikaler Faden, der — auf beobachtungstechnische Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden — den Himmelsmeridian darstellt. Nach der Formel $\Theta = \alpha + \tau$ ist die tatsächliche Sternzeit im Augenblick des Durchgangs des Sternes durch den Faden wegen $\tau = 0$ gleich der Rektaszension: $\Theta = \alpha$. Die für diesen Augenblick an der Uhr abgelesene Sternzeit sei Θ_a. Dann ist die Zeitdifferenz zwischen beiden $\Theta - \Theta_a = \Delta\Theta = \alpha - \Theta_a$ der sogenannte *Uhrstand* oder kurz der *Stand* so definiert, daß er, mit seinem Vorzeichen an die abgelesene Uhrzeit angebracht, die wirkliche Sternzeit $\Theta = \Theta_a + \Delta\Theta$ ergibt.

Die Sternzeit hängt eng mit der Stellung der Fixsternsphäre zusammen. Die gleiche Sternzeit an verschiedenen Tagen bedeutet, daß der Sternhimmel die gleiche Stellung zum Meridian und Horizont einnimmt. Genauso, wie man am Tage bei Kenntnis der Himmelsrichtungen aus der Stellung der Sonne ungefähr die Zeit angeben kann, so ist derjenige, der das Aussehen der Fixsternsphäre seinem Gedächtnis eingeprägt hat, in der Lage, aus dem bloßen Anblick des nächtlichen Sternhimmels die Sternzeit abzuschätzen. Diese kosmische Sternzeituhr hat im Gegensatz zu den üblichen mechanischen Uhren ein bewegliches Zifferblatt, die Sphäre, und einen feststehenden Zeiger, den Himmelsmeridian.

Sonnenzeit. In der Bewegung der Sonne liegen zwei Perioden, eine Tages- und eine Jahresperiode. Die Tagesperiode ist, wie bei den Fixsternen, eine Folge der Erdrotation. Die Jahresperiode ist das Spiegelbild der jährlichen Bewegung der Erde um die Sonne. Während die erste Periode wegen ihrer Kürze und wegen des eindrucksvollen Wechsels von Tag und Nacht jedem unmittelbar bewußt und daher allgemein bekannt ist, fehlt der zweiten Periode trotz der durchaus einschneidenden Nebenerscheinung des Wechsels der *Jahreszeiten* diese Unmittelbarkeit. Die meisten sind erstaunt, wenn sie hören, daß die Sonne auf einem rund 23° gegen den Himmelsäquator geneigten Großkreis *entgegen* der täglichen Bewegung des Himmels in einem Jahre scheinbar die Sphäre umläuft. Zufolge dieser Bewegung tritt der jahreszeitliche Wechsel im Aussehen des gestirnten Himmels ein, und zwar — wie man sich leicht überlegen kann — in der Weise, daß die am westlichen Abendhimmel sichtbaren Sterngruppen in der Folgezeit langsam, täglich um rund 1°, weiter in Richtung auf die Sonne (nach Westen) hinwandern, wogegen am östlichen Morgenhimmel die Fixsterne scheinbar von der Sonne abgestoßen, vor ihr (nach Westen) hergetrieben werden wie ein in die Flucht geschlagenes Heer. *Die Abendsonne zieht die Sterne an, die Morgensonne stößt sie ab.* Das ist eine alte Weisheit, die dem naturverbundenen Menschen des Altertums durchaus vertraut war

Den durch die scheinbare Jahresbewegung der Sonne bedingten Wechsel des Anblicks des Fixsternhimmels haben wir in bezug auf den mitternächtlichen Südhimmel bereits eingangs kennengelernt. In bezug auf die Zirkumpolarsterne wirkt sich die Verschiebung der Sternsphäre dahin aus, daß um Mitternacht im Frühling die Kassiopeia, im Sommer der Fuhrmann (Kapella), im Herbst der Große Bär und im Winter die Leier (Wega) am Nordhorizont stehen. Diese vier Mitternachtsstellungen des zirkumpolaren Sternhimmels erhält man am einfachsten durch viermaliges Weiterdrehen der Abbildung der Zirkumpolarsterne entgegen dem Uhrzeigersinn um Winkel von je 90°.

Die Einzelheiten der an der Sphäre beobachtbaren schein



Die scheinbare geozentrische Bewegung der Sonne an der Sphäre; B Beobachter, Z Zenit, $SU_2 \Upsilon U U_1 N A_1 A_2$ Horizont, AWOO Äquator, $P_N P_S$ Himmelsachse, ε Schiefe der Ekliptik

baren Bewegung der Sonne und ihre Bedeutung für die Zeitmessung werden am einfachsten verständlich, wenn man sich in das Äquatorsystem die scheinbare Jahresbahn der Sonne, *Ekliptik* oder *Tierkreis* genannt, einzeichnet. Die Bezeichnung Ekliptik entstammt dem Griechischen und bedeutet *Finsterniskreis*. Eine Sonnen- oder Mondfinsternis kommt, wie bereits im frühen Altertum bemerkt wurde, nur dann zustande, wenn zur Zeit des Neu- oder Vollmondes der Trabant der Erde in der Nähe dieses Kreises steht. Der Name Tierkreis ist insofern gerechtfertigt, als sieben von den zwölf längs der Ekliptik stehenden Sternbildern Tiergestalten sind. Im kalendermäßigen Frühling, also vom Frühlings- oder Widderpunkt beginnend, sind es: *Widder* (♈), *Stier* (♉), *Zwillinge* (♊), im Sommer: *Krebs* (♋), *Löwe* (♌), *Jungfrau* (♍), im Herbst: *Waage* (♎), *Skorpion* (♏), *Schütze* (♐), im Winter: *Steinbock* (♑), *Wassermann* (♒), *Fische* (♓).

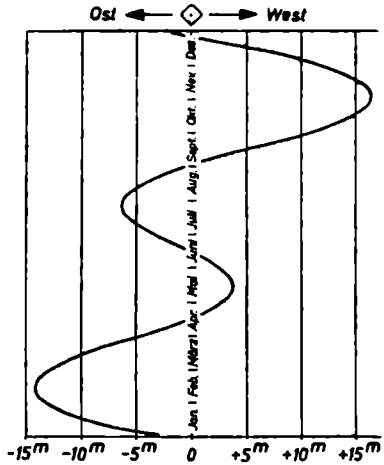
Auf dem Tierkreis als Grundebene bzw. Grundkreis wird analog zum Fundamentalsystem das sogenannte Ekliptikalsystem aufgebaut, dessen Koordinaten die *ekliptikale Länge* λ und *Breite* β sind. Die Länge der Sonne ändert sich vom Frühlingsanfang bis zum nächsten Frühlingsanfang von 0° bis 360°, die Breite der Sonne bzw. des Sonnenmittelpunktes ist in erster Näherung 0°. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt nennt man das *tropische Jahr*. Die geringfügige Abweichung

in Breite kommt daher, daß die Bahn um die Sonne nicht vom Erdmittelpunkt, sondern vom Schwerpunkt Erde–Mond durchlaufen wird. Davon abgesehen darf man vereinfachend sagen: die Sonne bewegt sich alljährlich einmal durch die Ekliptik.

Die Zeit wird, wie wir aus der Abbildung des Äquatorsystems ersehen, durch den Winkel τ am Himmelspol oder den Bogen am Äquator AG gemessen (vgl. Abb. „Das Äquatorsystem"). Nehmen wir einmal an, die Sonne würde sich in der um den Winkel $\varepsilon = 23° 26'$ gegen den Äquator geneigten Ekliptik mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen, so würde die vom Pol aus auf den Äquator projizierte Sonnenbewegung doch ungleichförmig ablaufen. Damit ist aber die Ungleichförmigkeit der Sonnenbewegung für die Zeitmessung noch nicht erschöpft; denn auch in der Ekliptik wandert die Sonne nicht gleichförmig. Der Umlauf der Erde in ihrer Bahn um die Sonne, dessen Spiegelbild die Jahresbewegung der Sonne in der Ekliptik ist, erfolgt in einer Ellipse und nach dem zweiten von Kepler (1609) gefundenen Gesetz der Planetenbewegung am schnellsten, wenn die Erde der Sonne am nächsten, also im *Perihel* steht, und am langsamsten, wenn sie das *Aphel* durchschreitet. Perihel und Aphel fallen ungefähr auf den 4. Januar bzw. auf den 4. Juli, wir haben also eine Geschwindigkeitsschwankung mit einer Jahresperiode.

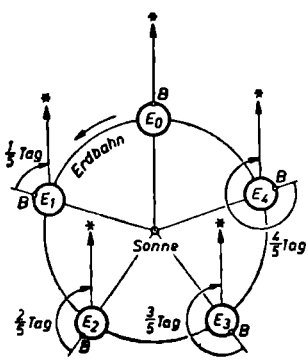
Diese beiden Ungleichheiten der Sonnenbewegung sind gleichzeitig wirksam, so daß die wirkliche oder — wie man meist sagt — die *wahre Sonne* bald schneller, bald langsamer läuft, wodurch sie als Gestirn für eine genaue Zeitmessung ungeeignet wird. Man kann den Sachverhalt auch noch anders ausdrücken. Für den nach der Sonne bestimmten Begriff Tag kann man eine ähnliche Definition wie für den Sterntag geben. Man geht hier allerdings aus praktischen Gründen heute nicht mehr von der oberen Kulmination aus, sondern setzt fest: *Ein Sonnentag ist die Zeit, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden unteren Kulminationen der Sonne verfließt.* Betrachtet man die Kulmination der wahren Sonne, so folgt aus ihrem ungleichförmigen Lauf, daß die einzelnen Tage des Jahres un-

Die Zeitgleichung im Laufe des Jahres



gleich lang sind. Man hilft sich nun durch Einführen des *mittleren Tages*, indem man über das ganze Jahr das Mittel der sämtlichen verschieden langen Tage bildet. Hierzu denkt man sich eine *mittlere Sonne*, für die wir das Zeichen ⊹ einführen, die im Laufe des Jahres, während die wirkliche Sonne ungleich schnell durch die Ekliptik wandert, sich mit völlig gleichmäßiger Geschwindigkeit längs des Äquators bewegt. Diese mittlere Sonne ist eine praktische Erfindung, sie ist aber nicht beobachtbar, sondern es kann nur ihr Ort auf dem Äquator, ihre Rektaszension $\alpha_{⊹}$ berechnet werden. Die Differenz $\alpha_{⊹} - \alpha_{\odot}$ bezeichnet man als *Zeitgleichung* und schreibt: $\zeta = \alpha_{⊹} - \alpha_{\odot}$. In den astronomischen Jahrbüchern oder Sternkalendern findet man die Zeitgleichung für jeden Tag des Jahres angegeben. Eine einfache Darstellung des Verlaufs der Zeitgleichung gibt die Abbildung. Die beiden Extremwerte $-14{,}3$ bzw. $+16{,}4$ Minuten werden Mitte Februar und Anfang November erreicht. Man kann die Abbildung auch anschaulich deuten, indem man die vertikale Nullinie als Meridian ansieht, in dem sich die mittlere Sonne gerade befindet. Es ist also der Augenblick des mittleren Mittags dargestellt. Dann gibt die Kurve der Zeitgleichung den für jedes Datum gültigen Ort der wahren Sonne relativ zur mittleren an. Man sieht z. B., daß von den letzten Tagen des Vorjahres bis Mitte April die wahre Sonne nach der mittleren kulminiert. Die oben gegebene Definition des Sonnentages bleibt richtig, wenn wir statt Sonnentag jetzt mittleren Tag und statt Sonne nunmehr mittlere Sonne sagen. Entsprechend ist die mittlere Zeit t gleich dem um

12 Stunden vermehrten Stundenwinkel $\tau_{\odot}$ der mittleren Sonne, also $t = \tau_{\odot} + 12^h$. Bedenkt man, daß die Rektaszension der Sonne vom Frühlingspunkt aus gerechnet wird und dessen Stellung an der Sphäre die Sternzeit Θ bestimmt, so folgt, daß zwischen der mittleren und der Sternzeit eine einfache Beziehung bestehen muß. Sie lautet: $\Theta = \alpha_{\odot} - 12^h + t$. Aus der täglichen Westverschiebung der Fixsterne relativ zur Sonne um rund 1°, die wir bereits kennengelernt haben, folgt, daß ein Sterntag etwa 4 Minuten kürzer ist als ein mittlerer Tag. Im Laufe eines Jahres macht dies gerade einen vollen Tag aus. Dieser Unterschied der beiden Zeitarten wird durch die beiden Umdrehungsperioden — die Erdrotation und den Erdumlauf um die Sonne — bewirkt. Die Nullage der Zeitrechnung bleibt wegen der großen Entfernungen in bezug auf die Fixsterne unabhängig von der Stellung der Erde in ihrer Bahn, die Sonne aber durchläuft infolge des Umlaufs der Erde eine volle Kreisbahn unter den Sternen entgegen der täglichen Bewegung. Das tropische Jahr hat nach Sonnenzeit einen Tag weniger als nach Sternzeit (Abb.). Daraus ergibt sich die Beziehung: 365,2422 mittlere Tage = 366,2422 Sterntage. Bezeichnen wir, wie üblich, den mittleren Tag mit ^{d}, den Sterntag mit $^d_*$, so wird $1^d_* = 0{,}997270^d$ oder $1^d = 1{,}002738^d_*$. Da die Zeit des täglichen Lebens die mittlere Zeit ist, drücken wir die Dauer eines Sterntages in diesem Zeitmaß aus und schreiben: $1^d_* = 23^h\,56^m\,4{,}09^s = 86\,164{,}09^s$. Gelingt es, in Verbindung mit einem feststehenden Fernrohr eine Präzisionsuhr



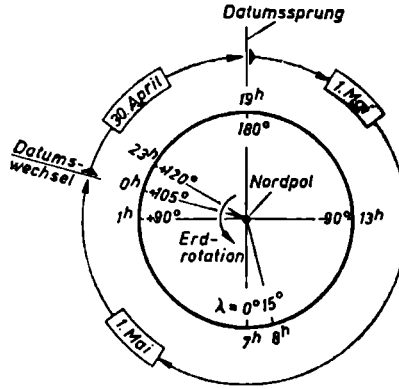
Das Jahr hat nach Sonnenzeit einen Tag weniger als nach Sternzeit. Die Erde E_0, E_1, E_2, E_3, E_4 auf ihrer Bahn um die Sonne; am Beobachtungsort B ist jeweils Mitternacht. In der Stellung E_0 kulminiert gleichzeitig ein bestimmter Fixstern: Sterntag und Sonnentag beginnen im selben Augenblick. Nach $^1/_5$ Jahr nimmt die Erde die Stellung E_1 ein, der Stern hat $^1/_5$ Tag Vorlauf; nach einem Jahr hat er genau einen Tag Vorlauf

so einzuregulieren, daß derselbe Stern nach $23^h\,56^m\,4^s$ sich wieder an der gleichen Stelle des Gesichtsfeldes — man nimmt praktisch die Mitte eines Fadenkreuzes — befindet, so geht diese Uhr nach mittlerer Zeit.

Zonenzeit. Die Zeitrechnung, soweit sie bisher behandelt wurde, ist durch den Stundenwinkel auf den Himmelsmeridian des Beobachtungsortes bezogen. Der Himmelsmeridian ist aber, wie man sich leicht überlegen kann, das Abbild des geographischen Ortsmeridians, das man erhält, wenn vom Erdmittelpunkt aus das Gradnetz der Erde an die Sternsphäre projiziert wird. Nun sieht man sofort, daß auch der Himmelsäquator die Projektion des Erdäquators an die Fixsternsphäre ist, daß die Himmelspole den beiden Rotationspolen der Erde entsprechen, der Zenitpunkt dem Beobachtungsort selbst. Das geographische Netz der Erde, die Längen- und Breitenkreise gehen über in die Stunden- und Deklinationskreise des festen Äquatorsystems. Jedem Punkt der Sphäre entspricht ein Ort auf der Erde. Die Punkte der Orte, die östlich von uns liegen, finden wir östlich vom Meridian, die nördlich vom Beobachtungsort gelegenen auf der Nordseite des ersten Vertikals. Man kann die Lage des Stundenkreises bezeichnen, der dem Görlitzer Meridian entspricht. Nehmen wir an, es wird in Leipzig beobachtet ($\varphi = +51{,}3°$, $\lambda = -12{,}4° = -49{,}5^m$, östliche Längen werden in astronomischer Zählweise negativ gerechnet). Hier entspricht der Stundenkreis $10{,}5^m$ östlich von der Mittagslinie dem Görlitzer Meridian. Steht die mittlere Sonne in diesem Stundenkreis, dann ist es 12^h (MEZ) = 12^h mittlere Zeit Görlitz. Am Beobachtungsort Leipzig muß man noch $10{,}5^m$ warten, bis die Sonne im Meridian steht. Jeder Ort hat also seine *Ortszeit*, die auf demselben Meridian liegenden Orte haben die gleiche Zeit. Früher zeigten die Uhren in den verschiedensten Orten tatsächlich nicht die gleiche Stunde an. Das spielte im Zeitalter des langsamen Verkehrs keine Rolle. Mit der Modernisierung des Verkehrs, der Einführung des Fernsprechers, mußte eine einheitliche Zeitrechnung zumindest für jedes Land eingeführt werden. Da die

Zeit von der geographischen Länge abhängig ist, teilte man die Erde in meridionale Zweiecke von je 1 Stunde Breite, und zwar so, daß die ganzzahligen Meridiane in der Mitte der Zonen liegen, und führte die Bezeichnung *Zeitzonen* ein. In der Praxis richtet man sich nicht nach den meridionalen, sondern nach den Staatsgrenzen. Die *Zonenzeit* bezieht sich auf einen bestimmten geographischen Meridian, so die MEZ auf den durch Görlitz verlaufenden Längengrad $\lambda = -15°$. Die Zonenzeit des Greenwicher Meridians nennt man heute allgemein *Weltzeit*, der frühere Ausdruck westeuropäische Zeit (WEZ) ist kaum noch gebräuchlich. In Deutschland wurde die MEZ im Jahre 1893 eingeführt. Zur Umrechnung von Ortszeit (t) in MEZ verwendet man die Formel $\text{MEZ} = t + (1^h + \lambda)$.
Die Größe in der runden Klammer ist eine für jeden Ort typische Konstante. So beträgt sie für Leipzig $10{,}5^m$. Bei den Orten, die in einer bestimmten Zeitzone liegen, unterscheidet man zwischen der (legalen) Zonenzeit und der Ortszeit. Alle Erscheinungen der Natur richten sich nach der Ortszeit, ja im Grunde genommen nach der wahren Ortszeit. So sind z. B. die meteorologischen Termine nicht nach MEZ, sondern nach mittlerer Ortszeit angesetzt, vor allem deshalb, weil die Wetterelemente, besonders die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur, einen mit dem Sonnenstand gekoppelten Gang zeigen.

Datumssprung. An der Grenze zwischen je zwei Zeitzonen tritt immer ein Zeitsprung von 1 Stunde ein, wenn nicht durch die Einführung von Sommerzeiten andere Voraussetzungen geschaffen werden. An der Grenze zwischen der Weltzeit und der mitteleuropäischen Zeit verliert man beim Übergang von West nach Ost gemäß der Uhranzeige 1 Stunde und gewinnt folglich in der umgekehrten Richtung 1 Stunde. Diese Zeitsprünge haben zur Folge, daß an irgendeiner Stelle ein *Datumssprung* eintreten muß. Aus praktischen Erwägungen heraus hat man diese Stelle in den Stillen Ozean gelegt, in der Hauptsache entlang dem 180. Längengrad. Wie dieser Datumssprung zustande kommt,



Zum Datumssprung; Blick auf den Nordpol der Erde am 1. Mai 8 Uhr MEZ

zeigt anschaulich die Abbildung. Wir blicken senkrecht auf den Nordpol der Erde und sehen die entgegen dem Uhrzeigersinn rotierende Erde. In Greenwich ($\lambda = 0°$) sei es gerade 7 Uhr. Dann ist es in Görlitz 1 Stunde später, also nach MEZ bereits 8 Uhr. Am Längenkreis $-90°$ ist es schon 13 Uhr und an der *Datumsgrenze* ($\lambda = 180°$) schließlich 19 Uhr. Wir schreiben den 1. Mai. Nun gehen wir nach Westen und finden bei $\lambda = +90°$ erst 1 Uhr des gleichen Datums. Bei der Länge $\lambda = +105°$ ist es 0 Uhr, also Mitternacht, und der 1. Mai beginnt dort gerade. Hier liegt also die Stelle des *Datumswechsels*, die im Laufe eines Tages die Erde einmal im Uhrzeigersinn umkreist. Die Orte, an denen sie sich im Augenblick befindet, haben nach mittlerer Ortszeit Mitternacht. Bei $\lambda = +120°$ muß folglich der 30. April 23 Uhr sein; denn in 1 Stunde wird auch dort der 1. Mai beginnen. Im Längenbereich $+105° < \lambda < +180°$ schreibt man im Augenblick noch den 30. April und bei der Datumsgrenze liegt gleichzeitig der *Datumssprung*. Östlich dieses Meridians ist die Zeitdatierung dauernd um einen ganzen Tag zurück. Dies ist auch der Fall, wenn der die Erde im Sinne des Uhrzeigers umlaufende Datumswechsel gerade die Datumsgrenze überquert. In diesem Moment hat die ganze Erde zwar nur *ein* Datum, aber am 180. Längengrad ist westlich der Anfang, östlich das Ende des betreffenden Tages.

Reist man auf einem Schiff oder in einem Flugzeug von Kalifornien nach Japan, so springt das Datum vom 30. April 19 Uhr auf den 1. Mai 19 Uhr, so daß man scheinbar 24 Stun-

den verioren hat. Der umgekehrte Fall tritt bei einer Reise von Japan nach der Westküste Amerikas ein: auf den 1. Mai 19 Uhr folgt noch einmal die gemäß Uhr- und Kalenderanzeige bereits gewesene Zeit vom 30. April 19 Uhr, so daß man 24 Stunden gewonnen zu haben scheint.

Vom Kalender

Als Abschluß der Betrachtungen über die Zeit wollen wir uns Gedanken machen über den Kalender. Ein Kalender ist die Aufgliederung des Jahres in bestimmte Zeitabschnitte, die den praktischen Bedürfnissen angepaßt sein müssen. An der Gestaltung unseres Kalenders sind die Rotationsperiode der Erde und ihre Umlaufperiode um die Sonne wesentlich beteiligt. Die Umlaufperiode des Mondes und die zufällige Zahl der Planeten des Altertums haben nur unbedeutenden Anteil. Wie wir bereits bei dem Vergleich von Sternzeit und mittlerer Zeit sahen, ist die Länge des Jahres kein ganzzahliges Vielfaches des Tages. Das Jahr hat außerdem etwa die Länge von 12 Mondumläufen (Monaten), und 1 Mondumlauf umfaßt rund 4×7 Tage, also 4 Wochen. So ist die wenig glückliche Einteilung des Jahres in ungleich lange Monate und rund 52 Wochen zustande gekommen.
Unser Kalender geht zurück auf das alte ägyptische Jahr von 12 Monaten zu je 29,5 Tagen. Das sind jedoch erst 354 Tage, und es mußte durch diesen Kalender eine zu starke und störende Verschiebung der Jahreszeiten gegen die festgelegte Zeitzählung um 11 Tage pro Jahr eintreten. Diese 11 Tage wurden nun als Schalttage eingefügt. So gelangte man zum neuen ägyptischen Jahr von 365 Tagen. Dieser Kalender wurde von den Römern übernommen. Da das wirkliche Jahr rund $^1/_4$ Tag länger ist als das Kalenderjahr, bleibt die Sonne in 4 Jahren um 1 Tag zurück, in 120 Jahren rund einen Monat. Tagundnachtgleichen sowie die Sonnenwende sind aber so eindrucksvolle und meist in festlicher Weise beachtete Naturerscheinungen, daß es auffallen mußte, wenn zur Zeit des kalendermäßigen Frühlingsbeginns die Sonne noch keineswegs im Ostpunkt aufging. Als diese Diskrepanz unerträglich wurde, fand die erste

Reform des römischen Kalenders unter JULIUS CÄSAR statt. Die Bezeichnung *Julianischer Kalender* erinnert noch an dieses Ereignis. Die wissenschaftliche Durchführung der Reform besorgten die Astronomen SOSIGENES und FLAVUS. Sie setzten auf Grund aller zur Verfügung stehenden Beobachtungen der damaligen Zeit die Länge des Jahres auf 365,25 Tage fest und beseitigten die damals vorhandene jahreszeitliche Verschiebung zwischen Kalender und Sonnenlauf. Wegen des Vierteltages mußte alle 4 Jahre 1 Tag eingeschaltet werden. Die Schaltregel lautete, daß jedes Jahr, dessen letzte beide Ziffern durch 4 teilbar sind, ein Schaltjahr von 366 Tagen sein soll.

Mit dem Julianischen Kalender war ein erheblicher Fortschritt für die damalige Zeit erreicht. Der Unterschied betrug nur noch rund $^1/_{128}$ Tag, d. h. erst in 128 Jahren gab es zwischen Kalender und Sonnenlauf einen Unterschied von 1 Tag. Eine so geringe Abweichung konnte einige Jahrhunderte unbemerkt bleiben. Im 14. Jahrhundert wurde von dem Astronom ARGYRUS eine Kalenderreform gefordert. Diesmal war die Sonne um etwa 8 Tage dem Kalender voraus, weil das Julianische Jahr etwas länger als das tropische ist, während vor JULIUS CÄSAR die Sonne hinter dem Kalender zurückblieb, weil das alte römische Jahr kürzer war als das hier maßgebliche tropische. Die Julianische Reform hatte also des Guten zuviel getan, es mußte in etwa 128 Jahren 1 Schaltjahr ausfallen. Um wiederum auf glatte und leicht einprägsame Schaltregeln zu kommen, setzte man fest, daß in einem Zeitraum von 400 Jahren 3 Julianische Schaltjahre als Gemeinjahre zu zählen seien. Da $3 \times 128 = 384$ ist, war man der Wirklichkeit sehr nahe gekommen. Praktisch wird diese Schaltordnung so gehandhabt, daß von den vollen Jahrhunderten nur die durch 400 teilbaren Schaltjahre sind. Die eben skizzierte Reform wurde erst in der 2. Hälfte des 16. Jahrhunderts durchgeführt Der Astronom LILIUS wurde vom Papst GREGOR XIII. mit dem astronomischen Teil der Aufgabe beauftragt. Die früheren, auf Anregung von ARGYRUS unternommenen Reformversuche, bei denen REGIOMONTANUS und KOPERNIKUS um Rat gefragt wurden, führten

nicht zum Ziele wegen der noch nicht ausreichenden Beobachtungsgenauigkeit. Die inzwischen eingetretene Verschiebung des Kalenders um 10 Tage wurde dadurch ausgeglichen, daß auf den 4. Oktober 1582 der 15. Oktober folgte. Die Genauigkeit dieses Schaltprozesses ist so hoch, daß erst in rund 3000 Jahren die Sonne um einen Tag vorauslaufen wird; dieser Schaltprozeß reicht also für sehr lange Zeit aus. In Deutschland wurde der *Gregorianische Kalender* erst 1777 eingeführt, in Schweden 1844, in Rußland erst mit der Oktoberrevolution 1917.

Die Festlegung des Ausgangspunktes unserer Zeitrechnung erfolgte im 6. Jahrhundert durch den Abt Dionysius Exiguus, als nach den Stürmen der Völkerwanderung in Europa wieder Ruhe einzog. Auf ihn geht die chronologische Zählung zurück, in der die Jahre vor unserer Zeit (v. u. Z.) und in unserer Zeit (u. Z.) mit 1 beginnen und folglich über diese Zeitmarke hinweg keine durchgehende Berechnung möglich ist. Im Jahre 1740 führte Cassini die astronomische Zählung ein, in der das Jahr 0 vertreten ist. Einen Vergleich der beiden Zählweisen zeigt die Tabelle.

Zeitzählung	v. u. Z.	u. Z.
chronologisch	... 3 2 1	1 2 3 ...
astronomisch	... −2 −1 0	+1 +2 +3 ...

Hiernach stimmt die chronologische Zählung (u. Z.) mit der astronomischen Zählung für die mit + versehenen Jahre überein. Bei den mit dem — Zeichen versehenen Jahren (v. u. Z.) ist von der chronologischen Zählung n v. u. Z. $(2n - 1)$ zu subtrahieren, wenn man die astronomische erhalten will.

Die Zählung der Jahre beginnt bürgerlich an den verschiedenen Orten zu verschiedenen Zeitpunkten. Das kommt uns zum Bewußtsein, wenn wir am Silvesterabend bereits um 22 Uhr MEZ vom Moskauer Sender die Begrüßung des neuen Jahres hören. Wann beginnt nun das Jahr astronomisch? Es ist wohl selbstverständlich, daß es astronomisch

nur einen Jahresanfang geben kann. F. W. Bessel fixierte den Beginn des astronomischen Jahres auf den Augenblick, in dem die Rektaszension der mittleren Sonne einen bestimmten Wert hat, nämlich: $\alpha_{\odot} = 280° = 18^h\,40^m$. Dieser Zeitpunkt ist objektiv und unabhängig von irdischen Meridianen und Zonenzeiten (Besselsches Jahr).
Durch die Verknüpfung des Jahresanfanges mit einem bestimmten Wert der Längenkoordinate im Fundamentalsystem ist das dem Kalender zugrunde liegende das *tropische Jahr*. Seiner Definition nach ist es die Zeit, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den Frühlingspunkt verstreicht. Die Bezeichnung *tropisch* kommt aus dem Griechischen und heißt soviel wie wenden. In früherer Zeit wurde die Länge des tropischen Umlaufs der Sonne durch Beobachtung der Sonnenwenden bestimmt. Seit 1955 wird auf Grund eines 1952 auf der Tagung der Internationalen Astronomischen Union gemachten Vorschlages das tropische Jahr zur Definition der Zeiteinheit benutzt. Im Jahre 1956 hat daraufhin das Internationale Komitee für Maße und Gewichte die Sekunde definiert als den 31 556 925,9747ten Teil des tropischen Jahres für 1900 Januar 0, 12^h Ephemeridenzeit (31. Dezember 1899, $12^h\,0^m\,4{,}5^s$ WZ). Hierbei ist *Ephemeridenzeit* die gleichförmig gedachte Zeit, die den Ephemeriden der verschiedenen Gestirne in den astronomischen Jahrbüchern zugrunde gelegt ist und die von der sonst allgemein verwendeten Weltzeit um einige Sekunden abweicht. Der Hauptgrund, weshalb man die früher benutzte Rotationsperiode der Erde zur Definition der Zeiteinheit verlassen hat, ist ihre ungleichförmige zeitliche Veränderlichkeit, die bei den hohen Genauigkeitsansprüchen von heute untragbar erscheint.
Die obige Definition der Sekunde (strenggenommen der Ephemeridensekunde) knüpft an die ebenfalls mit der Zeit veränderliche Länge des tropischen Jahres an. Da diese Änderung jedoch äußerst geringfügig ist (im Jahrhundert beträgt die Abnahme nur 0,53 s), liegt es nahe, die Länge dieser Umlaufperiode der Erde, die für einen bestimmten Zeitpunkt gilt, der Zeitrechnung zugrunde zu legen.

Der Himmel in anderen Breiten

Die Wanderung um die Erde in östlicher und westlicher Richtung, die wir der Zeitrechnung und des Datumssprungs wegen gemacht haben, wollen wir jetzt in nördlicher und südlicher Richtung fortsetzen, um zu erkunden, wie in den verschiedenen geographischen Breiten der Anblick des gestirnten Himmels wechselt. Wir wissen schon (vgl. Polhöhe), daß die Höhe des Himmelspols und die Zenitdistanz des Himmelsäquators im Meridian der geographischen Breite des Standortes gleich sind. Ein Mensch, der in eine fremde Gegend verschlagen wird, kann sich mit einfachen Hilfsmitteln Gewißheit verschaffen, auf welchem Breitengrad er sich befindet.

Bei uns in Mitteleuropa hat der Himmelspol eine Höhe von 48° bis 53°. Je weiter wir nach Norden gehen, desto höher steigt der Pol, desto tiefer sinkt der Äquator nach Süden. Gleichzeitig wächst der Bereich der Zirkumpolarsterne, und die Zone der Zeitsterne schrumpft zusammen. Mit dem Äquator verlagert sich auch die Ekliptik, und somit verschiebt sich nicht nur der Anblick des gestirnten Himmels, sondern auch der Ablauf der täglichen und jährlichen Bewegung der Sonne über dem Horizont.

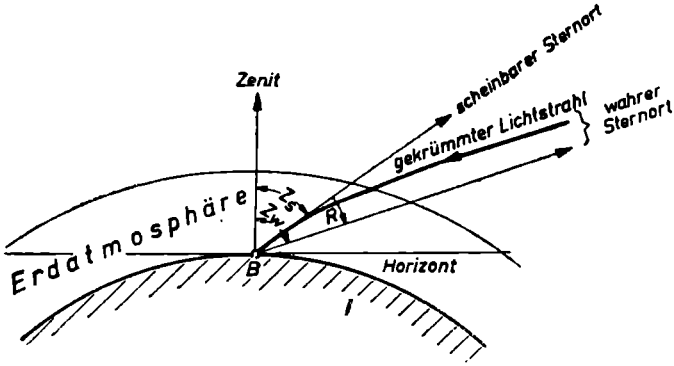
In $66^1/_2$° nördlicher Breite haben wir den Polarkreis erreicht. Am 22. Juni geht die Sonne hier nicht unter, sondern bewegt sich im Tageslauf auf einer nicht so steil gegen den Horizont geneigten Bahn derart, daß sie über dem Südpunkt nur 47° hoch steht, wie bei uns etwa Mitte April, den Westpunkt in 25° Höhe rund $^1/_2$ Stunde vor 18 Uhr überquert und im Norden als rote Mitternachtssonne am Horizont entlangzieht, um dann nach Osten hin wieder in gleicher Weise aufzusteigen. Am Nordpol selbst, also in + 90° Nordbreite, liegt der Äquator im Horizont, alle Fixsterne sind zirkumpolar, es geht keiner auf noch unter. Nur die beweglichen Gestirne können, da die Ekliptik zur Hälfte über dem Horizont liegt, sichtbar werden und wieder verschwinden. Die Sonne befindet sich etwa $^1/_2$ Jahr unterhalb des Horizontes, doch vollständig dunkel ist es nur in der Zeit von Mitte

November bis Ende Januar. Dann beginnt schon die astronomische Dämmerung, die Anfang März in die bürgerliche Dämmerung übergeht. Wegen der Refraktion geht die Sonne bereits am 19. März auf, schraubt sich, indem sie täglich rings um den Himmelsrand läuft, bis zum 22. Juni auf eine Höhe von $23^1/_2$°, steigt dann wieder abwärts und geht am 26. September unter. Bis zum 10. Oktober herrscht noch die helle Dämmerung, danach die astronomische bis Mitte November. Die völlig dunkle Zeit wird etwa zur Hälfte durch den Mond erhellt, oder die Landschaft wird durch Polarlichter magisch beleuchtet.

Wendet man sich aus unseren geographischen Breiten nach Süden, so sinkt der Himmelspol nach Norden, der Himmelsäquator stellt sich steiler auf. Am Südhimmel tauchen unbekannte Sterne auf, die in unserer Gegend nicht zu sehen sind. Befindet man sich am Erdäquator, so verläuft der Himmelsäquator von Ost über den Zenit nach West, nimmt also die Lage des sogenannten *ersten Vertikals* ein. Schon hier kann man im Laufe eines ganzen Jahres den gesamten nördlichen und südlichen Himmel überblicken. Mit dem Verschwinden der Sonne wird es sehr rasch dunkel. Die helle Dämmerung dauert nur 24 Minuten, daran schließt sich in den nächsten 48 Minuten die astronomische Dämmerung. Rund $1^1/_4$ Stunden nach Sonnenuntergang herrscht bereits tiefdunkle Nacht. Geht man noch weiter nach Süden, betritt man also die Südhalbkugel der Erde, so kippt der Himmelsäquator nach Norden über. Die Sonne und die Zeitsterne kulminieren im Norden und bewegen sich scheinbar in umgekehrter Richtung.

Refraktion, Aberration, Parallaxe, Präzession, Polverschiebung

Die bisherigen Betrachtungen sind noch einiger Ergänzungen und Verfeinerungen fähig. Drei verschiedene Änderungen der Richtung der Sternstrahlen hat man zu unterscheiden: die Refraktion, die Aberration und die Parallaxe.



Refraktion, nähere Erläuterung s. Text

Refraktion. Die *Refraktion* wird durch die Erdatmosphäre hervorgerufen (Abb.). Der Beobachter im Orte *B* sieht den Stern nicht dort, wo er in Wirklichkeit ist, sondern in der Verlängerung des letzten Teiles des gekrümmten Lichtweges. Die der Beobachtung allein zugängliche *scheinbare Zenitdistanz* Z_s ist im allgemeinen kleiner als die wahre Z_w. Die Differenz $R = Z_w - Z_s$ bezeichnet man als Refraktion.

Aberration. Die *Aberration des Lichtes* ist eine Folge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen und des Bewegungszustandes des Beobachters. Zufolge der Bewegung der Erde um die Sonne und um ihre Achse weicht im Augenblick der Beobachtung die Fernrohrachse von der Richtung nach dem Stern um einen Winkel ab, der Aberration genannt wird; man unterscheidet eine *jährliche* und eine *tägliche Aberration.*

Parallaxe. Unter *Parallaxe* versteht man die Richtungsänderung des Blickstrahls zu einem Objekt, die durch Verlagerung des Beobachtungsstandortes hervorgerufen wird. Die ständig sich ändernde Lage des Beobachters in bezug auf den Erdmittelpunkt und in bezug auf die Sonne erzeugt die *tägliche* und die *jährliche Parallaxe.*

Präzession. Wir betrachten nun die Verlagerungen, die bei dem von uns gewählten Koordinatensystem auftreten können. Das Fundamental-Koordinatensystem ist als das

bewegliche Äquatorsystem mit dem Erdkörper fest verbunden. Sein Ursprung ist der Erdmittelpunkt; die Nullrichtung der Längenzählung, der Frühlingspunkt, ist durch die Schnittgerade zwischen der Erdäquatorebene und der Erdbahnebene, der Ekliptik, gegeben. Dieses Koordinatensystem wäre ideal, wenn sowohl der Ursprung als auch die Nullrichtung unveränderlich festlägen. Im Weltall aber gibt es weder Ruhe noch Stillstand. Alles ist in Bewegung, der Erdkörper unterliegt den verschiedensten inneren und äußeren Kräften, und so erfährt auch unser Fundamental-Koordinatensystem mit der Zeit langsame Veränderungen. Diese werden durch die Anziehung von Sonne, Mond und Planeten hervorgebracht. Die Umdrehungsachse des Erdkörpers beschreibt in erster Näherung den Mantel eines Doppelkegels. Die genaue Bewegung der Erdachse enthält zwei Hauptperioden, das *große Platonische Jahr* sowie die *Sarosperiode* und zahlreiche Nebenperioden. Man bezeichnet willkürlich alle Effekte, deren Periode größer als 19 Jahre ist, mit *Präzession*, die übrigen Wirkungen mit *Nutation*. Als Folge der Präzession treten zwei Erscheinungen auf, die allerdings wegen der langen Periode nur historisch eine Rolle spielen. Als Auswirkung der Bewegung der Erdachse auf einem Doppelkegel wandern die beiden Himmelspole auf Kreisen mit dem Radius von 23° 27′ um die Pole der Ekliptik. In der Abbildung der Zirkumpolarsterne sind die Bahn des Himmelsnordpols sowie im Sternbild Drache der Nordpol der Ekliptik angegeben. Die gegenwärtige Lage des Nordpols des Äquators ist durch ein kleines Kreuz angezeigt. Vor etwa 3 000 Jahren war der zweithellste Stern des Kleinen Bären Polarstern, vor 14 000 Jahren war es die helle Wega und wird es in 12 000 Jahren wieder sein. Gleichzeitig mit dieser Bewegung erfolgt eine Verschiebung der Sternbilder in der Ekliptik, die bewirkt, daß die an das Koordinatensystem gebundenen *Tierkreiszeichen* oder Tierkreisabschnitte heute nicht mehr mit den gleichnamigen *Tierkreisbildern* übereinstimmen. Die Verschiebung beträgt zur Zeit gerade etwa ein ganzes Tierkreiszeichen, so daß der Widderpunkt schon an der Grenze

zwischen den Sternbildern Fische und Wassermann liegt. Er wird weiter rückwärts durch den Wassermann zum Steinbock und über den Schützen und Skorpion zur Waage wandern. Dann werden in unseren geographischen Breiten in den Sommernächten die heutigen Wintersternbilder mit dem allerdings sehr tief stehenden Sirius, mit Betelgeuze und den Zwillingen strahlen. Die Menschheit hat diesen Wechsel, vielleicht nicht vollbewußt, wohl bereits mehrmals erlebt. So ordnet sich diese uns lang erscheinende Periode der präzessionsbedingten Änderung des Himmelsanblicks in das größere Geschehen der Entwicklung der Menschheit und des Erdballs wiederum als kurzfristiger Pulsschlag ein.

Polverschiebung. Abschließend sei noch eine Erscheinung besprochen, die mit der Präzession verwandt ist und deshalb gelegentlich mit ihr verwechselt wird. Wie wir eben sahen, wird die Verlagerung der Rotationsachse der Erde durch die äußeren Krafteinwirkungen von Sonne, Mond und Planeten hervorgerufen. Doch auch ohne äußere Kräfte kann das Erdellipsoid noch wesentlich kleinere, präzessionsartige Bewegungen ausführen, sofern irgendwelche Massenverschiebungen auf der Erde vorkommen, die durch den Rückstoß Kraftwirkungen auslösen. Solche Massenverlagerungen treten auf in den großen Meeres- und Luftströmungen, im jahreszeitlichen Kommen und Gehen von Eis- und Schneemengen und in den Massenbewegungen in der Erdkruste und im Erdmantel. Diese Massenströmungen des Erdkörpers bewirken eine sogenannte Polverschiebung nicht unter den Sternen, also im Raume, sondern auf der Erdoberfläche. Man kann sich diese Vorgänge am einfachsten so vorstellen, daß die tatsächliche Rotationsachse der Erde um den geographischen Pol eine kreisende Bewegung im Sinne der Erddrehung ausführt, deren Halbmesser veränderlich ist, gewöhnlich zwischen Dezimetern bis zu zehn Metern schwankt. Die Rotationsachse der Erde fällt praktisch mit der sogenannten raumfesten Achse zusammen, also mit jener, die unter der Wirkung der vorhin behandelten äußeren Kräfte die astronomische Präzessionsbewegung ausführt.

DER MOND

Das von allen Menschen am meisten beobachtete Gestirn ist zweifellos der Mond. In Liedern schon seit Jahrtausenden besungen, von Sagen und Märchen umwoben, vom Aberglauben mißbraucht, wandelt er wie vor Jahrmilliarden treu seine einsame Bahn und schaut mit Gelassenheit auf die alte Erde, ihre sonnendurchflutete Tagseite und die stille Nachtseite. Die heutigen Reste des Mondaberglaubens beziehen sich auf die Fragen nach Wetter, Wachstum und Krankheit. Es lohnt sich nicht, auf diese zweifelhaften Produkte menschlicher Voreingenommenheit einzugehen. Die Zeiten des Aberglaubens sind vorüber. Versuchen wir, die Eigenarten der Bewegungen, der Licht- und Sichtbarkeitsverhältnisse unserer kosmischen Nachbarwelt zu verstehen.

Bewegung des Mondes

Scheinbare Bewegung. Der Mond nimmt, wie alle Gestirne, an der täglichen Drehung der Sternsphäre teil, d. h. er geht am Osthorizont auf und am Westhorizont unter. Daneben aber besitzt er von allen Himmelskörpern, von den künstlichen natürlich abgesehen, die schnellste Eigenbewegung, und zwar bewegt er sich im Sinne der Jahresbahn der Sonne an der Fixsternsphäre von West nach Ost, also rechtläufig weiter, wovon man sich durch eigene Beobachtung leicht überzeugen kann. Dabei stellt man gleichzeitig fest, daß mit dem Winkelabstand von der Sonne die Breite des beleuchteten Teils der Mondkugel zunimmt. Bei 30° Sonnenabstand beträgt die Breite der Mondsichel $^1/_{15}$ des Monddurchmessers, bei 60° schon $^1/_4$ und bei 90° ungefähr $^1/_2$. Täglich wandert der Mond unter den Sternen im Durchschnitt um etwa 13° und relativ zur Sonne um etwa 12° weiter. In einer Stunde macht diese Bewegung gerade $^1/_2$° oder einen Monddurchmesser aus. Wenn die Mondsichel noch sehr schmal erscheint, ist der von der Sonne nicht beleuchtete Teil des Mondes dennoch zu sehen. Man nennt diese Erscheinung das *aschgraue Licht* des Mondes oder manchmal auch das *Erdlicht*. Es ist

Licht, das die fast vollbeleuchtete Erde auf den Mond hinstrahlt und das Einzelheiten der Mondoberfläche erkennen läßt. Um diese Zeiten strahlt unser Planet am Mondhimmel im Vollicht und gibt eine etwa 80mal so große Helligkeit wie der Vollmond auf der Erde. Oft bemerkt man, daß der Durchmesser der Mondscheibe auch in der gleichen Zenitdistanz verschieden groß erscheint. Dieser Wechsel der scheinbaren Größe des Mondes ist eine Folge seiner elliptischen Bahn um die Erde und wird noch verstärkt durch die Anziehungswirkung der Sonne. So kommt es, daß wegen der verschiedenen Entfernung des Mondes von der Erde sein scheinbarer Durchmesser zwischen 29,3′ und 33,4′ schwankt. Auch die scheinbare Bewegung des Mondes an der Sphäre schwankt in demselben Rhythmus: er läuft am schnellsten, wenn er uns am größten erscheint, sich also im *Perigäum*, in Erdnähe befindet. Durch die Anziehungskraft der Sonne treten noch eine Reihe weiterer Schwankungen der Mondbewegung auf. Alle diese verschiedenen Einflüsse bewirken, daß die Bewegung des Mondes außerordentlich kompliziert verläuft und die Sichtbarkeitsverhältnisse ziemlich unübersichtlich sind. Die Dauer der Umlaufzeit des Mondes ist ein Mittelwert, den man durch Zusammenziehung von Beobachtungen über lange Zeiten erhält. Irgendein beliebiger Umlauf kann von diesem Mittelwert mitunter beträchtlich abweichen.

Umlaufperioden. Der eindrucksvollste Umlauf des Mondes ist zweifellos der zwischen zwei gleichen Phasen. Die dafür gebräuchliche Bezeichnung *synodischer Monat* wird verständlich, wenn man vom Neumond ausgeht. Bei dieser Lichtgestalt findet zwischen Mond und Sonne ein enger Zusammentritt, eine Synode, statt, die dann, wenn der Mond gleichzeitig im Tierkreis steht, zu einer Sonnenfinsternis führt.

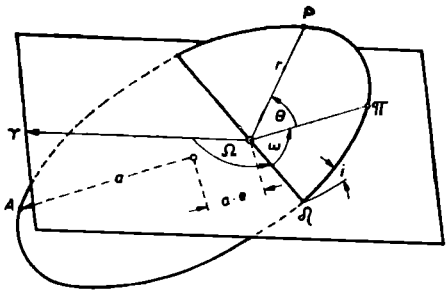
Der mittlere synodische Monat beträgt 29,530 59 Tage und hat, wie bereits erwähnt, in frühester Zeit als Grundlage des Kalenders gedient. Der Umlauf des Mondes unter den Sternen dauert nur 27,321 66 Tage, ist also über 2 Tage

kürzer. Wegen der Beziehung auf die Fixsterne nennt man ihn den *siderischen Monat.* Außer auf die Sonne und den Fixsternhimmel kann man die Bewegung des Mondes auch auf den Frühlingspunkt, den *aufsteigenden Knoten* der Mondbahn und das *Perigäum* beziehen Man erhält so den *tropischen Monat,* die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vorübergängen am Widderpunkt; er ist um rund 7 Sekunden kürzer als der siderische Monat. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen durch den aufsteigenden Knoten, der *drakonitische Monat,* ist die kürzeste Umlaufzeit, sie beträgt nur 27,212 22 Tage. Für den Umlauf von Perigäum zu Perigäum braucht der Mond dagegen 27,554 55 Tage. Dies ist die Länge des *anomalistischen Monats.*

Wir haben nun die wichtigen Umlaufperioden des Mondes kennengelernt und wenden uns zu den wirklichen und den scheinbaren Drehbewegungen des Mondkörpers selbst. Jeder weiß aus eigener Anschauung, daß der Mond uns stets dieselbe Seite zuwendet. Da er sich gleichzeitig um die Erde bewegt, muß er sich folglich auch um seine Achse drehen, und zwar in derselben Zeit, die er zum Umlauf um die Erde braucht.

Eine andere Erscheinung, die dem aufmerksamen Beobachter beim Betrachten der dunklen und hellen Gebilde auf dem Monde sicher nicht entgangen ist, wird mit dem Namen *Libration* bezeichnet. Libra heißt die Waage und deutet auf das scheinbare Hin- und Herschwanken der Mondkugel, wodurch bald mehr von der einen, bald von der anderen Seite zu sehen ist. Die Libration bewirkt im Endeffekt, daß von der Oberfläche der Mondkugel von der Erde aus betrachtet mehr als die Hälfte zu sehen ist, nämlich ungefähr 59%.

Geozentrische Bahn. Die Bahn des Mondes um die Erde ist in erster Näherung eine Ellipse. Seine exakte geozentrische Bahn, die in der Hauptsache gestört wird von der Äquatorwulst der Erde und durch die Anziehungskraft der Sonne, ist eine sehr viel kompliziertere und nicht geschlossene



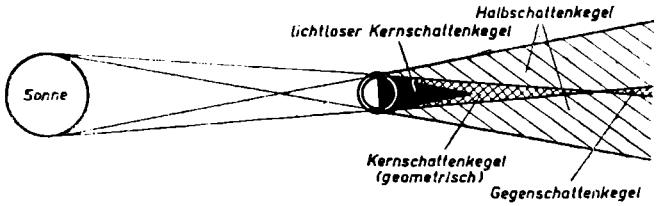
Bahnelemente, durch die eine Ellipsenbahn festgelegt wird

Kurve. Für viele Überschlagsberechnungen genügt es, die Mondbahn als Ellipse zu betrachten. Zur Kennzeichnung einer Ellipse (Abb.) muß man zwei Angaben machen, etwa die der Längen der großen und der kleinen Halbachse. Der Astronom gibt meist die große Halbachse a und die numerische Exzentrizität e der betreffenden Ellipse an. Damit kennt man erst die Größe und die Form der elliptischen Bahn. Die Ellipse hat aber eine bestimmte Lage. Ihre Lage im Weltraum wird wieder durch zwei Angaben gekennzeichnet: durch die Neigung i der Bahnebene gegen die Bezugsebene des Planetensystems, die Ekliptik, und durch die Länge Ω des aufsteigenden Knotens ☊, gemessen vom Widderpunkt in rechtläufigem Sinne in der Ekliptik. Noch ist unbekannt, wie die oben charakterisierte Ellipse in der soeben festgelegten Bahnebene orientiert ist. Dazu muß man den Winkel angeben, um den der Perigäumspunkt Π vom Knoten entfernt ist. Man bezeichnet diesen Winkelabstand des Perigäums vom Knoten mit dem griechischen Buchstaben ω. Um schließlich die Bewegung eines Himmelskörpers P in der eben beschriebenen Bahn festzulegen, muß bekannt sein, zu welchem Zeitpunkt der Körper sich z. B. im Perigäum befunden hat. Man nennt diese letzte Angabe die Zeit T des Durchganges durch das Perigäum Π. Mit diesen sechs Angaben sind Größe, Form, Raumlage der elliptischen Bahn und der Ort eines Himmelskörpers in einem gegebenen Moment auf dieser Bahn eindeutig bestimmt. Man bezeichnet deshalb diese sechs Zahlenangaben als die *Bahnelemente* eines Himmelskörpers. Sein augenblicklicher Winkelabstand vom Perigäum, die wahre *Anomalie*, ist in der Darstellung mit Θ bezeichnet, seine Entfernung vom Gravitationszentrum ist r.

Heliozentrische Bahn. Die heliozentrische Bahn des Mondes ist ebenfalls eine nicht in sich zurücklaufende Kurve, nämlich eine räumliche Schlangenlinie um die Bahn, die der Massenschwerpunkt des Doppelplaneten Erde–Mond um die Sonne beschreibt. Sieht man von der verhältnismäßig geringen Neigung der Mondbahn gegen die Ekliptik $i = 5° 8'$ ab, so steht der Mond im Verlauf eines Monats einmal zwischen Erde und Sonne (Neumond), im anderen Extrem finden wir ihn jenseits der Erde, von der Sonne aus betrachtet (Vollmond). Das Verhältnis der Entfernung Erde–Mond zu dem Abstand Erde–Sonne ist derart, daß die Schlangenlinie der heliozentrischen Mondbahn stets der Sonne die konkave Seite zuwendet. In vielen älteren Büchern ist gerade dieser wesentliche Punkt unrichtig dargestellt. Würde man nämlich die heliozentrische Bahn des Mondes im Laufe eines Jahres im richtigen Maßstab verkleinert zeichnen, so könnte man sie von der Erdbahn kaum unterscheiden. Stellt man z. B. die Erdbahn als Kreis vom Radius 7,5 cm und mit einer Strichdicke von 0,5 mm dar, so liegen die rund $12^1/_2$ Wellen der Mondbahn noch innerhalb der Strichdicke. Man darf also sagen: die Mondbahn ist heliozentrisch in guter Näherung gleich der Erdbahnellipse und wird durch die Anwesenheit der Erde etwas gestört. Das gleiche gilt natürlich auch von der Erdbahn, die in entsprechend geringerem Maße vom Monde gestört ist, oder ganz einfach: *Erde und Mond bewegen sich — mit Bezug auf die Fixsternsphäre in der Zeit des siderischen Monats — um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, dieser Schwerpunkt aber bewegt sich auf der die Ebene der Ekliptik bestimmenden Bahn des Doppelplaneten Erde–Mond um die Sonne.* Die öfter gebrauchte Bezeichnung Doppelplanet für das System Erde–Mond kann damit begründet werden, daß das Massenverhältnis Erde–Mond rund 80 beträgt und damit den kleinsten Betrag im ganzen Planetensystem hat. Den nächstkleinsten Wert des Massenverhältnisses finden wir beim Neptunmond Triton, wo er bereits rund 600 beträgt.

Mond- und Sonnenfinsternisse

Zu den eindrucksvollsten astronomischen Erscheinungen, die mit dem Monde in Zusammenhang stehen, zählen die Mond- und Sonnenfinsternisse. Will man die geometrisch-optischen Verhältnisse der Finsternisse darstellen, so geht das kaum anders, als es in den meisten Lehrbüchern zu sehen ist: nicht maßstabgetreu und daher leicht irreführend. Es ist aber verhältnismäßig einfach, ein fast naturgetreues Modell zur Demonstration der Finsternisse herzustellen. Man benutzt als Erde bzw. Mond zwei Kugeln (notfalls genügen auch zwei Pappscheiben) von 12,8 bzw. 3,5 mm Durchmesser und befestigt sie — etwa mit Hilfe zweier dünner Nadeln — im Abstand von 38,4 cm auf einem Stab. Nun bringt man den Stab so in Richtung auf die Sonne, daß einmal der Schatten der Mondkugel auf die Erdkugel fällt, zum anderen der Mond sich durch den Schattenkegel der Erde bewegt, und man hat damit ein Modell für das Zustandekommen beider Arten der Finsternisse. Durch Veränderung des Abstandes Erde–Mond, der hier zwischen 35,7 und 40,8 cm schwanken kann, läßt sich auch der kleine Unterschied zwischen einer ringförmigen und einer totalen Sonnenfinsternis zeigen. Es wird vor allem anschaulich klar, daß der Kernschatten eines Himmelskörpers, wie Erde oder Mond, wegen der scheinbaren Größe der Sonnenscheibe nicht scharf begrenzt ist, sondern im Gegensatz zu den üblichen Abbildungen stetig in den Halbschatten übergeht, und daß auch im Halbschatten noch ein Lichtabfall vorhanden ist. Auch wird klar, warum beim Eintritt des Mondes in den Halbschatten der Erde im bloßen Anblick des Mondes keine Spur einer Verfinsterung zu bemerken ist. Der Versuch gewinnt, wenn man ihn in einem abgedunkelten Zimmer ausführt, weil dann durch den Wegfall des sonst sehr störenden Streulichtes der Umgebung die Schattenwirkungen deutlicher zum Ausdruck kommen bzw. die ganz schwachen Schatten überhaupt erst sichtbar werden. Insbesondere vermitteln die überaus spitzen Kernschattenkegel die Einsicht, daß eine geringe Ablage des Mondes von der Ekliptik ge-



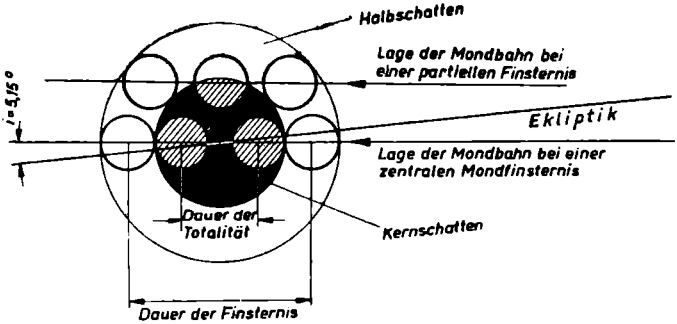
Schematische Darstellung der Schattenphänomene im Strahlungsfeld der Sonne

nügt, um zu den Syzygien (Neu- und Vollmond) eine Finsternis unmöglich zu machen.

Schattenphänomene. Betrachten wir nun schematisch die Schattenphänomene eines von einer durchsichtigen Atmosphäre umgebenen Planeten im Strahlungsfelde der Sonne (Abb.). Begrenzt durch die an Sonne und Planeten gelegten Außenberührenden erhält man den nach rechts konvergierenden *geometrischen Kernschattenkegel*, der sich über seine Spitze hinweg in den *Gegenschattenkegel* fortsetzt. Die Innenberührenden von Sonne und Planet bilden einen nach rechts divergierenden Kegel, der in dem Teil jenseits des Planeten den *Halbschattenkegel* bildet. Infolge der Strahlenbrechung können die durch die unteren Schichten der Erdatmosphäre verlaufenden rötlichgefärbten Sonnenstrahlen in den äußeren Bereich des geometrischen Kernschattenkegels eindringen. Der innere, in keinem Falle von Sonnenstrahlen erreichbare Teil wird als *lichtloser Kernschattenkegel* bezeichnet. Das Eintauchen künstlicher Satelliten in diesen Bereich läßt sie völlig unsichtbar werden, wogegen der im äußeren Bereich des geometrischen Kernschattenkegels befindliche „total verfinsterte" Mond in der wohl jedem bekannten kupferroten Färbung erscheint. Der schematische Charakter der Abbildung wird klar erkennbar, wenn man ausrechnet, daß bei mittleren Verhältnissen die Spitze des lichtlosen Schattenkegels vom Erdmittelpunkt 40 Erdhalbmesser entfernt ist und die des geometrischen Kegels sogar 217. Der mittlere Abstand des Mondes vom Erdmittelpunkt beträgt rund 60 Erdradien, so daß der Mond

nie in den lichtlosen Schattenkegel eintauchen kann. Bei einem praktisch atmosphärelosen Planeten wie unserem Monde liegen die Verhältnisse entsprechend, nur mit dem Unterschied, daß der lichtlose und der geometrische Kernschattenkegel zusammenfallen.
Für einen im Weltraum gedachten Beobachter bieten sich durch das eben besprochene Schattensystem eine Reihe für das Verständnis der Finsternisse wichtiger Erscheinungen dar. Befindet er sich außerhalb des Halbschattenkegels, so sieht er die volle, vom Schatten nicht berührte Sonnenscheibe. Beim Eintauchen des Beobachters in den kegelförmigen Raum des Halbschattens erscheint die Sonne teilweise von dem schattenwerfenden Körper bedeckt. In der Spitze des geometrischen Kernschattenkegels wird die Sonne gerade vollständig von dem Planeten bedeckt. Im Gegenschattenkegel erscheint der Planet kleiner als die Sonne, er bedeckt sie nur in den zentralen Partien und läßt — je nach der Stellung des Beobachters — innerhalb des Gegenkegels einen exzentrischen oder symmetrischen leuchtenden Ring von der Sonnenscheibe übrig. Bei einem von einer Atmosphäre umgebenen Planeten sieht der Beobachter innerhalb des äußeren geometrischen Kernschattenkegels zwar die Sonnenscheibe selbst durch die Planetenkugel bedeckt, die ringförmig erscheinende Atmosphäre jedoch strahlt, wenn man sich von der Spitze des geometrischen zur Spitze des lichtlosen Kernschattenkegels bewegt, in einem von gelblichweiß über gelb, orange bis tiefrot getönten Licht. Erst nach Eintauchen in den lichtlosen Kegel erlischt die Strahlung der Atmosphäre.

Mondfinsternisse. Bei Kenntnis der optischen Verhältnisse ist es nun nicht mehr schwer, das Zustandekommen der beiden Arten der Finsternisse zu verstehen. Der von gestreutem und durch die irdische Luftschicht rötlich gefärbtem Sonnenlicht erfüllte Kernschattenkegel der Erde hat bei mittleren Verhältnissen an der Durchquerungsstelle des Mondes einen Durchmesser, der das rund 2,7fache des Monddurchmessers beträgt. Der Halbschatten ist etwa 4,7mal so groß wie der

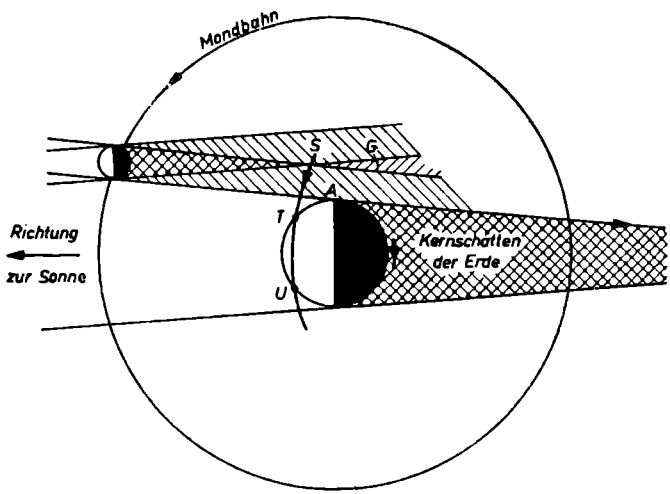


Geozentrischer Anblick des Ablaufs zweier Mondfinsternisse

Mond. Die Mittelpunkte dieser beiden konzentrischen Kreisscheiben liegen dauernd auf der Ekliptik im Gegenpunkt der Sonne (Abb.). Die Mondbahn, rund 5,15° gegen die Ekliptik geneigt, hat mit dieser zwei diametral entgegengesetzte Schnittpunkte, die beiden Knotenpunkte. Als Bedingung für das Zustandekommen einer Mondfinsternis gilt, daß der Abstand eines der beiden Knoten vom Gegenpunkt der Sonne entweder nach Osten oder nach Westen hin kleiner als 10,2° sein muß, wenn eine partielle Finsternis eintreten soll, und sogar kleiner als 4,6°, wenn es zu einer totalen Finsternis kommen soll. Das Eintauchen des Mondes in den Halbschatten ist nicht zu bemerken. Erst wenn sich der Mond dem Kernschatten nähert, wird der Halbschatten so dicht, daß man den Helligkeitsabfall auf der Mondscheibe deutlich erkennt. In Einzelfällen kann wegen der veränderlichen Größe und Bewegung des Erdschattens und des unterschiedlichen scheinbaren Durchmessers des Mondes und seiner Winkelgeschwindigkeit der Ablauf in gewissen Grenzen schwanken. Jede Finsternis ist ein besonderer Fall und muß als solcher individuell durchgerechnet werden. Aus den trigonometrisch vorgegebenen Bedingungen für das Zustandekommen einer Mondfinsternis überhaupt läßt sich abschätzen, wie häufig eine solche Finsternis eintreten wird. Man erhält als Ergebnis, daß in 10 Jahren durchschnittlich 15 Mondfinsternisse zu erwarten sind. Diese Zahl entspricht auch den tatsächlichen Erfahrungen.

Sonnenfinsternisse. Sonnenfinsternisse sind häufiger als Mondfinsternisse. Dem scheint zunächst die Erfahrung zu widersprechen. Im Laufe seines Lebens wird der Mensch öfter Gelegenheit haben, eine Mondfinsternis zu sehen als eine Sonnenfinsternis. Dessen ungeachtet ist die Zahl der auf der ganzen Erde eintretenden Sonnenfinsternisse rund das 1,5fache der während der gleichen Zeit sich ereignenden Mondfinsternisse. Der Grund für die verschiedenen Sichtbarkeitsmöglichkeiten liegt in der unterschiedlichen Natur dieser Erscheinungen. Man sagt, die Mondfinsternis ist ein objektives Phänomen, insofern bei ihr der Mond tatsächlich verfinstert wird. Überall auf der Erde, wo der Mond zu sehen ist, erscheint er verdunkelt. Im Gegensatz hierzu ist die Sonnenfinsternis ein perspektivisches Phänomen; das Tagesgestirn erscheint nur auf dem Teil der Erdoberfläche verfinstert, den der Schatten des Mondes bedeckt. Bei uns in Europa kann z. B. die Sonne den ganzen Tag unvermindert strahlen, während sie zur gleichen Zeit in Madagaskar und Südafrika total verfinstert ist. Beim Mond gibt es zwei Stufen der Verfinsterung, die totale und die partielle, bei der Sonne aber vier Stufen, die wir zuerst kennenlernen wollen.

Arten der Sonnenfinsternis



Die Abbildung zeigt den Augenblick des Beginns einer Sonnenfinsternis auf der Erde, aus der Gegend des Nordpols der Ekliptik gesehen. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabgerecht, die Mondbahn ist als Kreis dargestellt. Der Halbschattenkegel des Mondes berührt gerade den geometrischen Kernschattenkegel der Erde. In dem Erdort, der sich zur Zeit gerade im Punkte *A* befindet, beginnt die Finsternis im Moment des Sonnenaufganges als partielle Sonnenfinsternis. Für östlich gelegene Orte, etwa zwischen *A* und *T*, steht die Sonne bereits am Himmel, ist aber noch nicht verfinstert; für westlich von *A* gelegene Orte wird die Sonne in der nächsten Zeit aufgehen, allerdings bereits partiell verfinstert. Bei der großen Entfernung der Erde von der Sonne darf man ihre Strahlen als näherungsweise parallel ansehen. Somit verschiebt sich auch der Kernschatten des Mondes parallel zu sich selber im Sinne des Fortschreitens des Mondes auf seiner Bahn, in der Abbildung durch die Pfeilrichtung angegeben. Die Spitze des Mondkernschattens bewegt sich folglich auf der gekrümmten Bahn *STU* weiter. Kurz bevor die Spitze *S* den Kernschattenkegel der Erde berührt, stößt der Gegenschattenkegel *G* im Punkte *A* an die Erde. Für den dann gerade in diesem Punkte befindlichen Erdort geht die Sonne ringförmig verfinstert auf. Da der Mondschatten sich schneller über die Erde bewegt, als die Erdorte im Zuge der Erdrotation nach Osten verlagert werden, holt der Gegenkegel Orte zwischen *A* und *T*, für die bis dahin die Finsternis partiell war, ein, und es beginnt für sie die ringförmige Phase. Im Punkte *T* stößt die Spitze des Mondkernschattens auf die Erdoberfläche und bringt dem gerade dort befindlichen Erdort eine Verfinsterung, die für einen kurzen Moment total ist, vorher sowie gleich nachher aber als partielle erscheint. Zwischen *T* und *U* geht nun fortschreitend die Finsternis in eine totale über. Der Mondkernschatten, der in den Punkten *T* und *U* eng begrenzt ist, wächst dazwischen zu einem entsprechend ausgedehnten rundlichen Fleck und bewegt sich, während die Spitze in die Erdkugel eintaucht, mit einer Geschwindigkeit von einigen hundert Metern je Sekunde über die Erdoberfläche. Liegt infolge größerer

Mondentfernung die Spitze *S* so weit ab, daß sie nirgends die Erdoberfläche berühren kann, dann bleibt die Finsternis rein ringförmig. So gibt es also bei der Sonne außer der partiellen und totalen Finsternis noch zwei weitere Stufen: die ringförmig-totale und die ringförmige.
Bei mittleren Verhältnissen erreicht die Spitze des Kernschattens des Mondes die Erdoberfläche nicht. Im Durchschnitt gibt es also mehr ringförmige als totale Sonnenfinsternisse. Im günstigsten Falle erreicht der Kernschattenfleck an der Erdoberfläche einen Durchmesser von rund 260 km. Solange er über einen Beobachter hinwegwandert, hat dieser eine totale Verfinsterung. Daraus errechnet sich eine maximale Dauer der Totalität von etwa 7,7 Minuten. Gewöhnlich liegt die Dauer der totalen Phase unterhalb von 6 Minuten. Der Durchmesser des Halbschattengebietes liegt bei etwa 7000 km und nimmt rund $^1/_3$ der Fläche des Erdquerschnitts ein. Daraus folgt, daß es jederzeit Orte auf der der Sonne zugewandten Erdhälfte geben muß, die außerhalb dieses Halbschattengebietes liegen, für die also die Sonne nicht verfinstert ist. Schätzt man aus den Umständen, die zu einer Sonnenfinsternis führen, die Häufigkeit dieser Art der Finsternisse ab, so erhält man für die Zeit von 10 Jahren etwa 23 Erscheinungen. Daß die Sonnenfinsternisse häufiger sein müssen als die Mondfinsternisse, kann man auch aus der Abbildung der Arten der Sonnenfinsternis ersehen: Der Weg des Mondes von Beginn bis Ende einer Sonnenfinsternis ist länger als der vom Beginn bis zum Ende einer Mondfinsternis. Die Wahrscheinlichkeit, daß einer der beiden Knoten sich auf diesem größeren Bogen befindet, ist naturgemäß größer als für den kleineren Bogen.

Saroszyklus. Schon den Chaldäern und Chinesen war bekannt, daß sich die Sonnen- und Mondfinsternisse nach einer Zeit von rund 18 Jahren mit angenähert gleichartigem Ablauf wiederholen. Von den chaldäischen Astronomen wurde diese Periode Saroszyklus genannt. Mit seiner Hilfe waren die Astronomen des Altertums in der Lage, Finsternisse vorauszusagen, obwohl sie weder eine richtige Vor-

stellung vom Aufbau unseres Planetensystems hatten noch die Gesetze der Bewegung der Himmelskörper kannten. Um zu verstehen, wie eine solche Periode der Wiederkehr der Finsternisse zustande kommt, ist es notwendig, an die Bedingungen anzuknüpfen, die zu einer Finsternis führen; der Mond muß sich einmal in den Syzygien (Voll- bzw. Neulicht) befinden und sich außerdem gleichzeitig unweit der Knoten seiner Bahn bewegen. Eine Finsternis wiederholt sich also, wenn eine bestimmte Anzahl n synodischer Monate $U_{\odot}$ einer Anzahl m drakonitischer Monate $U_{☊}$ gleich ist. Man findet für diese Sarosperiode bis auf eine Abweichung von $^3/_4$ Stunden

$$242 \cdot U_{☊} = 223 \cdot U_{\odot} \approx 6585{,}34 \text{ Tage.}$$

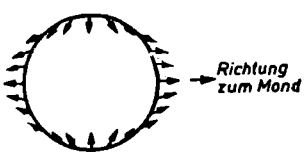
Rechnet man in die uns geläufigeren Zeiteinheiten um, so erhält man als Länge des Saroszyklus 18 Jahre 10 (oder 11) Tage 8 Stunden, je nachdem ob während dieser Zeit 5 oder 4 Schaltjahre liegen. Der Sinn dieses Saroszyklus für die Vorausbestimmung von Finsternissen sei an einem Beispiel erläutert. Das letzte große Finsternis-Ereignis in Mitteleuropa war die ringförmige Sonnenfinsternis, deren Mitte auf den 17. April 1912, 11 Uhr 57 Minuten fiel. In den folgenden 18 Jahren lagen 4 Schaltjahre. Gemäß dem Saroszyklus hätte also 18 Jahre 11 Tage 8 Stunden später wieder eine Sonnenfinsternis stattfinden sollen. Die tatsächliche Sonnenfinsternis wich nur etwa $^1/_2$ Stunde von der nach der Sarosperiode zu erwartenden ab und fand am 28. April 1930 19 Uhr 27 Minuten statt. Ihr Verlauf war nicht genau der gleiche, insbesondere weil noch weitere Einflüsse mitspielen, wie z. B. die tägliche Parallaxe. Hinzu kommt, daß der Saroszyklus keine exakte Periode ist. Infolgedessen verschieben sich die Finsternisse mit der Zeit, so daß nach einer größeren Zahl von Zyklen aus einer totalen oder ringförmigen Finsternis eine partielle wird, die schließlich ganz ausscheidet. Anstelle der ausscheidenden Finsternis tritt eine neue partielle ein, so daß der Zyklus stets 44 Sonnenfinsternisse und 29 Mondfinsternisse umfaßt.

Die Bedeutung der Finsternisse für die Chronologie ist bekannt. Handelt es sich doch hierbei um eindrucksvolle

Naturereignisse, die selbst in frühester Zeit schon beachtet wurden und, wenn sie zeitlich in der Nähe wichtiger geschichtlicher Ereignisse stattfanden, von den Chronisten auch aufgezeichnet wurden, meist unter Hinweis auf Einzelheiten wie Tagesstunde, Phase u. a. Da sich Finsternisse nebst ihren charakteristischen Begleitumständen auf Jahrtausende zurück berechnen lassen, ist dadurch eine genaue Datierung möglich.

Gezeiten

Die markanteste Einwirkung des Mondes auf die Erde ist die Auslösung von *Ebbe* und *Flut*, wenn auch ein geringer Anteil dieser Naturerscheinung durch die Sonne mitbewirkt wird. Die fluterzeugenden Kräfte von Sonne und Mond sind qualitativ die gleichen, quantitativ ist die Wirkung des Mondes etwa doppelt so groß wie die der Sonne. Unter der Wirkung der Gezeitenkräfte wird die Wasserhülle der Erde (in entsprechendem Maße ebenfalls die feste Erde und die Lufthülle) nach zwei entgegengesetzten Richtungen in der Verbindungslinie zum Monde etwas gehoben (Abb.).
Man bezeichnet diese beiden Erhebungen als Flutberge und unterscheidet den dem Monde zugewandten Zenitflutberg bzw. den vom Monde abgewandten Nadirflutberg. Infolge der Achsendrehung durchläuft ein Erdort im Laufe eines Tages dieses ungefähr in der Richtung Erde–Mond liegende System der Flutberge. So entsteht der ideale Ablauf der Gezeiten, der sich wegen der sich ständig ändernden Lage des Mondes von Tag zu Tag anders gestaltet. Dieser ideale Ablauf wird zunächst durch das Zusammenwirken von Mond und Sonne verändert, und zwar so, daß bei Neumond und Vollmond wegen der gleichgerichteten Wirkung die besonders hohe *Springflut*, bei zu- und abnehmendem Halbmond wegen der abgeschwächten Wirkung *Nippflut* ein-



Das in Richtung zum Mond rotationssymmetrische Feld der Gezeitenkräfte des Erdkörpers

tritt. Von den zahlreichen weiteren Komplikationen, die das Bild der Gezeiten verwirren, sei nur noch erwähnt, daß der zeitliche Ablauf von Ebbe und Flut wesentlich mitbestimmt wird durch die Form der Meeresgrenzen und durch die Meerestiefen, durch die großen Strömungen und durch Eigenschwingungen der gewaltigen, hier bewegten Wassermassen, durch Flutwellen benachbarter Weltmeere und andere Störungen, so daß die Vorausberechnung der Gezeiten für einen bestimmten Erdort bzw. Hafen eine überaus komplizierte Aufgabe ist.

Oberflächenformen

Als Himmelskörper muß uns der Mond heute mehr denn je interessieren, wissen wir doch nicht, ob er vielleicht in einigen Jahrzehnten bereits für die Menschen eine völlig neue, astronautische Rolle zu spielen hat.

Schwerebeschleunigung. Der Mond besitzt wesentlich weniger Masse als die Erde, etwa nur $^1/_{81}$. Das ist wahrscheinlich der Hauptgrund, weshalb er eine ganz andere Entwicklung als die Erde genommen hat und heute als unbelebte Welt mit wüstenartigem Gepräge durchs Weltall zieht. Im gas- bzw. magmatischen Zustande, den er wohl gleichzeitig mit der Erde begann, aber wegen seines geringeren Wärmeinhalts sehr viel rascher durchlaufen haben wird, konnten aus seinem Inneren wegen des viel geringeren Druckes erheblich mehr flüchtige Stoffe entweichen, so daß die an seiner Oberfläche und in seinem Inneren befindlichen Gesteinsarten und Mineralien von denen der Erdrinde sich zum Teil unterscheiden werden. Die heutige Masse des Mondes von 73,5 Trillionen Tonnen ist bei einer mittleren Dichte vom 3,34fachen des Wassers auf einen etwa kugelförmigen Raum von 3480 km Durchmesser zusammengeballt und ergibt an seiner Oberfläche eine Anziehungskraft, die nur rund $^1/_6$ der Erdanziehungskraft im Meeresniveau beträgt. Für Körper, die den Mondbereich verlassen wollen, beträgt die Entweichungsgeschwindigkeit nur 2,37 km/s

Oberflächentemperatur. Aus Berechnungen sowie aus Strahlungsmessungen folgt übereinstimmend, daß ein von der Sonne senkrecht beschienener Punkt der Mondoberfläche eine Temperatur von rund +120 °C erreicht. An der Lichtgrenze, dem sogenannten *Terminator*, sinkt die Temperatur auf etwa —50 °C und mag auf —140 °C fallen, wenn das Gebiet infolge der synodischen Rotation von 29,5 Tagen auf die der Sonne abgewandte Seite gelangt. Dieser enorme Temperaturgegensatz zwischen Tag- und Nachtseite auf dem Monde muß die Oberfläche stark angreifen und im Laufe der Zeit pulverisieren.

Sichtbarkeit. Aus der mittleren Entfernung von 384 400 km erscheint die Mondkugel unter einem Winkel von etwa 31,1′; der Mondabstand kann zwischen 357 000 km und 408 000 km schwanken, der scheinbare Monddurchmesser nimmt dann die Extremwerte 33,4′ und 29,3′ an. Im günstigsten Falle entspricht dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges von 1′ eine Strecke von 104 km. Bei 100facher Vergrößerung sollte man also punktförmig erscheinende Gebilde, die sich durch Helligkeit oder Farbe deutlich von ihrer Umgebung abheben, noch zu erkennen vermögen, wenn sie einen Durchmesser von 1 km haben. Bei den stärksten nutzbringenden Vergrößerungen, die wegen der Luftunruhe im Bereich von 200- bis 300fach liegen, könnte man also flächenhafte Strukturelemente auf dem Monde von 300 bis 500 m gerade noch feststellen.

Abplattung. Infolge der überaus langsamen Rotation ist die Abplattung des Mondes sehr gering und nur durch außergewöhnlich sorgfältige Messungen festzustellen. Die Rotationsachse des Mondes ist um etwa 2 km kürzer als der Durchmesser seines Äquators.

Zurückgestrahltes Licht. Wenn man den Mond längere Zeit mit bloßem Auge oder mit einem Feldstecher betrachtet hat und dann in die nachtdunkle Umgebung schaut, bemerkt man eine Überblendung des Auges. Dabei strahlt der Voll-

mond nur mit einer Beleuchtungsstärke von $^1/_4$ Lux (1 Lux ist die Einheit der Beleuchtungsstärke. Eine Normalkerze erzeugt in 1 m Entfernung ungefähr die Beleuchtungsstärke 1 Lux). Überraschend ist es auch, daß die Oberfläche des Mondes, die im Lichte der Sonne grell wie weißer Sand leuchtet, in Wirklichkeit etwa so dunkel sein soll wie Basalt. Das Material des Mondbodens strahlt etwa 43% des einfallenden Sonnenlichts zurück. Von der insgesamt empfangenen Strahlungsenergie werden nur etwa 7% als sichtbares Licht zurückgestrahlt. Für diese optische Eigenschaft eines kugelförmigen Himmelskörpers hat sich die Bezeichnung *Albedo* eingebürgert.

Die Helligkeit des Mondes bei den verschiedenen Lichtgestalten wird wesentlich bestimmt durch das sogenannte *Phasengesetz*. Darunter versteht man das Verhältnis der Strahlung bei einem beliebigen Phasenwinkel zur Strahlung beim Phasenwinkel 0°, d. h. beim Vollicht. Charakteristisch für den Helligkeitsverlauf des Mondes ist der Umstand, daß die Strahlung vor und nach Vollmond sehr stark abfällt, so daß z. B. der Halbmond nur etwa 11% der Vollmondhelligkeit liefert.

Der größte Teil der Mondstrahlung liegt im infraroten Spektralbereich. Es ist dies der Betrag der Sonnenenergie, der zur Erwärmung der Mondoberflächenschichten dient.

Das sichtbare Licht des Mondes ist also nur ein geringer Teil der vom Monde aufgenommenen Sonnenstrahlung, und es könnte so scheinen, als wären es überwiegend die bläulichen Strahlen des Sonnenlichtes, die der Mond zurückwirft. Das Licht des Mondes erscheint in der Tat bläulicher als das der Sonne, wenn wir es etwa mit einer Kerze oder einer Glühlampe vergleichen, doch liegt der Grund dafür nicht in der Natur der eben genannten Strahlungsquellen, sondern in dem photometrischen Empfangsapparat unserer Augen, in den lichtempfindlichen Elementen der Netzhaut, den Stäbchen und Zäpfchen. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit rückt beim Dämmerungssehen etwas in den blauen Bereich.

Mare. Großräumig betrachtet zeigt die Oberfläche des Mondes helle und dunkle Gebiete (vgl. Tafel I, II, III). Die hellen Flächen sind die stehengebliebenen Reste der gebirgigen Urgesteinsrinde, wogegen die dunklen Felder Einbruchsniederungen sind. Man bezeichnet sie als Maria (Einzahl *Mare*), deutsch Meere; doch dürften sie nie mit Wasser ausgefüllt gewesen sein. Zu den Zeiten, als diese Niederungen sich bildeten, hatte der Mond wahrscheinlich bereits seine Atmosphäre und seine Hydrosphäre verloren. Daneben gibt es auf dem Monde, wie man schon in kleineren Fernrohren zu erkennen vermag, eine Reihe typischer Gebirgsmassive und zum Teil beträchtlich hohe Einzelberge. Die charakteristische Oberflächenform des Mondes sind die *Ringgebirge* mit Durchmessern zwischen 240 und 1 km. Ihre Anzahl nimmt mit der Abnahme des Durchmessers zu. Weitere für den Mond charakteristische Formen sind die *Rillen*, *Gräben* und *Verwerfungen* und schließlich die ihrer Natur nach noch keineswegs geklärten *Strahlensysteme*. Es lohnt sich, diese Oberflächengebilde unserer Nachbarwelt etwas eingehender zu betrachten. Eine allgemeine Bezugsfläche, wie auf der Erde das Meeresniveau, gibt es wegen des Fehlens einer Hydrosphäre nicht. Durch eingehende Untersuchungen des Randprofils des Mondes ist ein mittleres Niveau festgelegt worden. Über dieses erheben sich ein Teil der südlichen Hemisphäre und ein Gebiet westlich des zentralen Bereichs, nämlich ein Feld, das sich vom Wolkenmeer (*Mare Nubium*) und Feuchten Meer (*Mare Humorum*) in nach Westen ausholendem Bogen bis einschließlich zum Ruhigen Meer (*Mare Tranquillitatis*) erstreckt. Das Gebiet nimmt etwa $^1/_6$ der sichtbaren Mondhalbkugel ein. Merklich unter diesem Niveau liegen weite Landstriche im Nordosten: Teile des Ozeans der Stürme (*Oceanus Procellarum*) und des Regenmeeres (*Mare Imbrium*) und das Hauptgebiet des Heiteren Meeres (*Mare Serenitatis*). Es ist überraschend, daß diese Höhenschichtung sich nur teilweise mit den Urschollen und Einbruchsniederungen deckt; wie eine genaue Untersuchung zeigt, verläuft die Höhenschichtung an einigen Stellen geradezu entgegengesetzt.

Gebirge. Eindeutig ist jedoch die Besetzung der planetarischen Urgesteinsrinde mit den zahlreichen, für den Mond charakteristischen Rundformen der Gebirge. Allem Anschein nach sind diese Ringgebirge des Mondes älter als die Einbruchstiefebenen, in denen größere Rundgebilde fehlen. Im allgemeinen finden sich im Inneren großer Ringgebirge kleinere Rundformen, ja selbst die Umgebungswälle sind von den Kleinstformen besetzt bzw. zerstört. Während der Epoche, in der noch kleine Ringgebirge entstehen konnten, bildeten sich die Tiefebenen, in deren nur leicht welligen bis hügeligen Innenflächen in keinem Falle größere Rundformen anzutreffen sind. Die typische Form der *Mondringgebirge*, vor allem das Profil, ist gleichartig und weitgehend unabhängig von der Größe des Durchmessers. Von dem umgebenden Gelände steigt der in erster Näherung kreisförmige, manchmal auch regelmäßig polygonale Außenwall sehr flach an. Es treten Böschungswinkel zwischen 3° und 9° auf. Im Gegensatz hierzu ist der nach innen abfallende Hang stärker geneigt. Böschungswinkel zwischen 25° und 55° sind gemessen worden. Die im allgemeinen verhältnismäßig ebene Innenfläche liegt durchweg tiefer als das umliegende Gelände. Bei den größten Rundformen, den sogenannten *Wallebenen*, folgt die weite Innenfläche deutlich der Krümmung des Mondbodens derart, daß z. B. in der Wallebene *Clavius*, deren Randerhebungen nur rund 2000 m höher als die Innenfläche liegen, von dem Höhenzug der einen Seite die Gipfel des gegenüberliegenden Walles nicht mehr gesehen werden können. Die meisten, zum Teil allerdings auch großen Ringformen, wie etwa *Copernikus*, besitzen zentrale Erhebungen, die hauptsächlich durch ihren Anblick daran schuld sind, daß für die Mondringgebirge die nicht ausrottbare, irreführende und unrichtige Bezeichnung *Mondkrater* eingeführt wurde. Zweifellos gibt es oder hat es zum mindesten einmal Vulkane auf unserer Nachbarwelt gegeben. Aber alle Eigenschaften der Ringgebirge sprechen gegen diesen Vergleich mit irdischen Vulkankratern, vor allem ihre im Verhältnis zu unseren feuerspeienden Bergen gigantischen Dimensionen.

In Ringgebirgen mit Durchmessern unterhalb 30 km treten zentrale Erhebungen selten auf. Unbeschadet der Gleichartigkeit der charakteristischen Züge der Profile nimmt das Tiefenverhältnis bei den kleineren Ringgebirgen zu. Bei den größten Wallebenen beträgt es etwa 1:100, steigt bei den mittleren auf 1:20, erreicht bei den kleinsten *Kratergruben* schließlich 1:6 und nähert sich somit den bei irdischen „Meteoritenkratern" auftretenden Werten. An den Rändern, aber bisweilen auch im Inneren der Einbruchsniederungen finden sich zahlreiche versunkene bzw. *zerstörte Ringgebirge.* Die eindrucksvollsten von ihnen sind die im *Nektarmeer* (*Mare Nectaris*) zu etwa $^1/_4$ versunkene Wallebene *Fracastorius,* der etwa zur Hälfte aus dem Oceanus Procellarum herausragende Ringwall *Letronne* und die größte ehemalige Wallebene, die Bucht der Regenbögen (*Sinus Iridum*), von deren Umrandungswall etwa $^1/_3$ im Mare Imbrium verschwunden, doch andeutungsweise in leichten Bodenwellen noch zu erkennen ist. Vom Sinus Iridum scheint sich über das Mare Humorum und Mare Crisium ein stetiger Übergang zu den größeren Mondniederungen anzudeuten. Nach der anderen Seite liegen die Kleinstformen der Mondoberfläche, die bis zu Durchmessern von 1 km herab feststellbar sind: Aufwölbungen und einfache, vielfach nicht einmal von einem Randwall umgebene Vertiefungen, sogenannte *Kratergruben.* Von diesen kleinsten Gebilden liegen nur an wenigen Stellen der Mondoberfläche genaue kartographische Untersuchungen vor, über ihre Gesamtzahl ist noch nichts bekannt.

Die oft Hunderte von Kilometern sich erstreckenden Gebirgszüge des Mondes liegen vorzugsweise an den Rändern der Meere. Es sind keine Faltengebirge, wie die großen irdischen Gebirgszüge; sie sind eher mit Schollengebirgen zu vergleichen und erwecken den Eindruck gewaltiger, zusammengeschobener Trümmer. Die größten Erhebungen in diesen Gebirgen liegen bei 3000 m, sie sind also relativ zum Monddurchmesser etwas höher als die höchsten Erhebungen der Erde. Zur Kennzeichnung der einzelnen Höhenzüge hat man willkürlich Namen irdischer Gebirge verwendet; so gibt

es z. B. auf dem Monde nördlich vom Copernicus die *Karpaten*, nach Westen schließt sich der bald in nordwestlicher Richtung verlaufende Bogen der *Mondapenninen* an, der weiter in den *Kaukasus* übergeht; nordöstlich vom Kaukasus liegen die *Alpen*. Eine eigenartige Bildung stellt das Alpenquertal dar, das eine Breite von einigen Kilometern besitzt und schnurgerade verläuft.

Spalten und Strahlensysteme. In der Nähe der hellsten Stelle des Mondes, bei den Ringgebirgen Aristarch und Herodot, zieht sich in mehreren Windungen der etwa 150 km lange *Schrötergraben* hin. Zahlreiche Spalten finden sich rings um das Mare Humorum, in der Nähe der Mondmitte, beim Ringwall Hyginus und vielen anderen Stellen. Sie werden als *Mondrillen* bezeichnet. Beim eingehenden Studium der letzten noch erkennbaren Feinheiten der Mondoberfläche erkennt man, daß Mondrillen fast überall vorkommen.
Von den rätselhaften *Strahlensystemen* ist das des etwa 80 km großen Ringgebirges *Tycho* das bekannteste, weil es bereits im Feldstecher leicht zu erkennen ist. Einzelne Strahlen erstrecken sich über Hunderte von Kilometern ohne Rücksicht auf die Struktur des überquerten Mondbodens. Das Strahlensystem des Copernicus hat ein mehr netzförmiges Aussehen. Über ein Dutzend Strahlensysteme sind bekannt.
Neben den bisher betrachteten Objekten der Mondoberfläche sind vereinzelt auch Berggruppen oder Einzelberge anzutreffen, die ziemlich unvermittelt aus ebenem Gelände sich erheben. Veränderungen größeren Ausmaßes sind auf der Oberfläche des Mondes bisher noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen worden. Die vermeintlichen Änderungen liegen gewöhnlich an der Grenze des Nachweisbaren. Die photographische Kartographie der Mondoberfläche dürfte am ehesten in der Lage sein, hier in absehbarer Zeit zum Erfolg zu führen. Die geringfügigen Änderungen können sich einer objektiven Nachprüfung zu leicht entziehen.

DAS PLANETENSYSTEM

Schon vor einigen Jahrtausenden wird es den Menschen aufgefallen sein, daß in der Nähe der scheinbaren Sonnenbahn außer dem Mond noch fünf weitere helle und mit ruhigem Licht strahlende Gestirne stehen, die sich jedoch, ähnlich wie der Mond, nicht streng an die Ekliptik halten. Im Gegensatz zum Mond, der bald langsamer, bald schneller, aber stets im selben Bewegungssinne seine Bahn entlang zieht, ändern die Planeten nicht nur die Größe, sondern auch die Richtung ihrer Geschwindigkeit, kehren sogar in ihrer Bewegung um (*rückläufige Bewegung*), so daß sie verwickelte Schleifen- und Schlangenlinien an die Fixsternsphäre zeichnen. Die Zeiten, in denen der Mensch die aus diesen scheinbaren Bewegungen folgenden Stellungen der Planeten als unmittelbare Wirkungen bzw. Offenbarungen persönlicher Gottheiten betrachtete, waren bereits bei den Astronomen des Altertums überwunden und liegen — im Menschheitsmaßstabe gesehen — heute größtenteils hinter uns. Ein Rest ist geblieben, der sich heute wissenschaftlich tarnt: unpersönliche Wirkungen, schicksalhaft gesteuert und etwas physikalisch gefärbt durch das Wort *Strahlung*; dieser Rest ist unter der Bezeichnung *Astrologie* bekannt, die sich hier und dort, wo kein naturwissenschaftlich begründetes Weltbild existiert, eingenistet hat. In der Verborgenheit eines naiven Weltbildes wächst dieses Unkraut relativ harmlos, mit der Geschäftstüchtigkeit schamloser Betrüger wird es eine ernste Gefahr. Hatten die Menschen der Frühzeit noch die Entschuldigung für ihren astrologischen Aberglauben, daß damals kein überzeugend und sicher bewiesenes Weltbild vorhanden war, so trifft das gegenwärtig nicht mehr zu. Heute hat jeder die Möglichkeit, sich von der Haltlosigkeit astrologischer Thesen zu überzeugen, heute gibt es also keine Ausrede mehr für die blinden Anhänger des Sternaberglaubens.

Um so erstaunlicher ist es, daß bereits vor fast 3000 Jahren die Vorstellung aufkam, daß die Bewegung der Planeten trotz ihres an Willkürlichkeit erinnernden Verhaltens nach

eindeutigen und immer geltenden Gesetzen abläuft. Zu dieser Vorstellung kann nur ein umfangreiches Beobachtungsmaterial geführt haben, aus dem mit Scharfblick und Kombinationsgabe trotz der verwirrenden Fülle der stets etwas anders verlaufenden Bewegungsschleifen doch ähnliche Wesenszüge erfaßt und in vorläufigen Regeln oder Gesetzen ausgedrückt wurden. Den Weg, den die Menschheit von diesen ersten Keimen eines wissenschaftlichen Weltbildes bis zu unserer heutigen, naturgemäß weiter fortgeschrittenen Vorstellung vom Aufbau und den Bewegungsverhältnissen der uns umgebenden Welt des Großen gegangen ist, wollen wir erst zu einem späteren Zeitpunkt kennenlernen.

Die Gesetze der Planetenbewegung

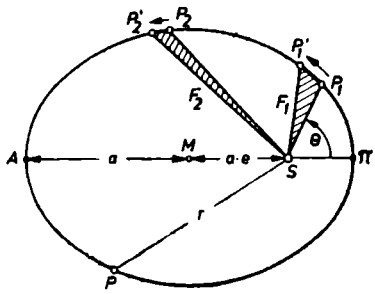
Schon sehr zeitig erkannte man, daß es unter den eigentlichen Planeten zwei Gruppen gibt, nämlich die beiden inneren Planeten: Merkur (☿) und Venus (♀) und die drei äußeren Planeten: Mars (♂), Jupiter (♃) und Saturn (♄).
Außer dieser topologischen Einteilung der Planeten bietet sich eine physikalische Gliederung dar in die beiden Gruppen der *erdähnlichen* (Merkur, Venus, Erde, Mars) und der *jupiterähnlichen* (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun), wobei die Zugehörigkeit des Pluto zu einer der beiden noch nicht entschieden werden konnte.
Das Newtonsche Gravitationsgesetz. Die Bewegungsverhältnisse der größeren planetarischen Körper werden ausschließlich von dem *Newtonschen Gravitationsgesetz* bestimmt. Die Formulierung dieses Naturgesetzes knüpft an die Kraftwirkung zwischen zwei Körpern mit den Massen M und m an, die sich im Augenblick der Betrachtung im Abstande r voneinander befinden. Sind die Dimensionen dieser beiden Körper klein gegenüber ihrer Entfernung und bleiben die Kraftwirkungen etwaiger weiterer Körper unmerklich, so gilt für diesen einfachen Fall des *Zweikörperproblems* das Gesetz $K = -G\frac{Mm}{r^2}$, wobei das negative Vorzeichen

anzeigt, daß die zwischen den beiden Massen wirkende Kraft K bestrebt ist, den Abstand r zu verkleinern; $G = 6{,}667 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{cm^3 g^{-1} s^{-2}}$ ist die Gravitationskonstante. Im Planetensystem kommt man in erster Näherung mit den Formeln des Zweikörperproblems aus, weil die Sonne jeden einzelnen Körper an Masse um das 1000- und Mehrfache übertrifft und weil die Abstände zwischen den Planeten und selbst den Planetoiden im allgemeinen derart groß sind, daß ihre gegenseitigen Anziehungswirkungen unter den gewöhnlichen Verhältnissen so klein bleiben, daß sie als *Störungen* der Bahnen um die Sonne behandelt werden können. Es kommt uns hiermit zum Bewußtsein, daß der interplanetare Raum ein so unvorstellbares Hochvakuum ist, das technisch wohl niemals erreicht werden wird.

Das 1. Keplersche Gesetz. In dem auch zuerst von KEPLER behandelten und mit vorzüglicher Annäherung gelösten Zweikörperproblem sind *die Bahnkurven der Himmelskörper Kegelschnitte, wobei der eine Brennpunkt vom Schwerpunkt der beiden Massen eingenommen wird.* Diese Formulierung enthält wesentlich den Inhalt des *1. Keplerschen Gesetzes der Planetenbewegung* (1609), allerdings in erweiterter und durch NEWTON präzisierter Form.
Schon im Altertum war bekannt, daß die Bewegung eines Planeten in seiner Bahn ungleichförmig erfolgt. Man bezeichnete diesen Tatbestand als *Erste Ungleichheit* und benutzte für die Darstellung dieser ungleichförmigen Bewegung einen zur Erde exzentrisch angeordneten Kreis. Dieser trägt den Mittelpunkt eines zweiten Kreises (Epizykel), der näherungsweise die *rückläufige Bewegung* (*Zweite Ungleichheit*) der Planeten darstellt. KOPERNIKUS verwendet dafür eine ähnliche Konstruktion, die jedoch grundsätzlich keine bessere Angleichung an die Wirklichkeit bringt. Erst KEPLER gibt die richtige Lösung des vorliegenden Bewegungsproblems. Dieses für das heliozentrische Planetensystem entscheidende Ergebnis gewinnt er durch Einführung der induktiven Methode anstelle des noch von KOPERNIKUS angewandten deduktiven Verfahrens. KEPLER konstruiert nach

den Beobachtungen Tycho Brahes die Bahn des Planeten Mars, Kopernikus dagegen versucht die ihm zur Verfügung stehenden, allerdings nicht so genauen Beobachtungen durch geeignete Kombinationen von Kreisbewegungen darzustellen, wobei die Kreise entweder gleichförmig rotieren oder mit gleichförmiger Geschwindigkeit durchlaufen werden. Die wissenschaftlichen Hilfsmittel und ihre methodische Anwendung, von denen Kopernikus Gebrauch machte, sind die gleichen, deren sich die Astronomen des Altertums, z. B. Hipparch und Ptolemäus bedienten.

Das 2. Keplersche Gesetz. Dieses Gesetz der Planetenbewegung, das meist der physikalischen Dimension wegen als *Flächensatz der Zentralbewegung* bezeichnet wird, braucht für den Fall des Zweikörperproblems im Gegensatz zum 1. bzw. 3. Gesetz weder erweitert noch verfeinert zu werden. Das Bild zeigt um die Sonne S eine Ellipsenbahn $\Pi P_1 P_2 A P$, die zur Demonstration des 2. Keplerschen Gesetzes stärker elliptisch dargestellt ist, als es der Wirklichkeit entspricht. Eine Ellipse ist durch die *große Halbachse* a und die *Exzentrizität* e vollständig bestimmt; in unserem Bild ist die Strecke AM die große Halbachse a, und die Verlagerung der Sonne S aus dem Zentrum M der Ellipse, also die Strecke MS, ergibt sich als $a\,e$. Die sich nach Größe (Länge) und Richtung ständig ändernde Verbindungsgerade Sonne–Planet wird mit dem Buchstaben $r = SP$ bezeichnet und heißt *Radiusvektor*, gelegentlich auch *Fahrstrahl*. Das 2. Keplersche Gesetz kann nun folgendermaßen formuliert werden: *Der Radiusvektor überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.* In der Abbildung sind die beiden hervorgehobenen Flächen gleich, $F_1 = F_2$, so daß es möglich ist, auf Grund dieses Gesetzes die



Flächensatz der Zentralbewegung

Stellung des Planeten in seiner Bahn im voraus zu berechnen.

Um hierfür wenigstens den ersten Schritt zu zeigen, seien die drei Gesetze der Planetenbewegung in der Kurzsprache der Mathematik ausgedrückt. Es lautet das 1. Gesetz: $r = \frac{p}{1 + e \cos \Theta}$, wobei Θ den Winkel $\Pi S P_1$ bezeichnet, d. h. den heliozentrischen Winkelabstand des Planeten P_1 vom Perihel Π.

Das 2. Gesetz enthält eine Aussage über die zeitliche Änderung des Winkels Θ, und zwar wird festgestellt, daß sie ungleichförmig erfolgt; es ist nämlich $\sphericalangle P_1 S P_1' > \sphericalangle P_2 S P_2'$. Bezeichnet man die Änderung des Winkels Θ, die Winkelgeschwindigkeit also, mit $\dot{\Theta}$, so lautet das 2. Gesetz: $r^2 \dot{\Theta} = K$. Die physikalische Dimension der Konstanten K ist $\left[\frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{s}}\right]$, also eine Fläche pro Zeiteinheit. Dies hat bereits Kepler erkannt, der ihr die heute noch übliche Bezeichnung *Flächengeschwindigkeit* gab.

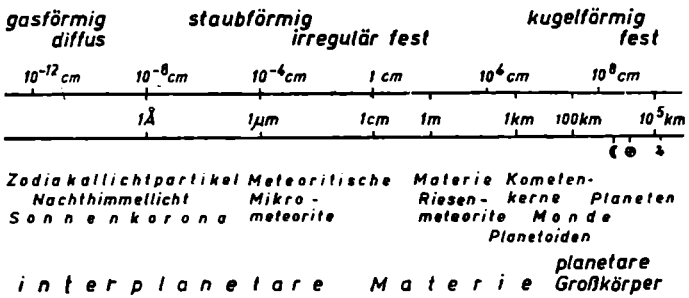
Das 3. Keplersche Gesetz. Hatte Kepler die ersten beiden Gesetze der Planetenbewegung aus den Beobachtungen nur eines Planeten, des Mars nämlich, gefunden, so gelangte er durch Vergleich der großen Halbachsen a mit den Umlaufszeiten U aller Planeten zu einer umfassenden Beziehung zwischen diesen Größen, zu seinem dritten Gesetz, nach dem das Verhältnis aus den Kuben der mittleren Entfernungen a und den Quadraten der Umlaufszeiten U für alle Planeten den gleichen Wert H hat, $\frac{a^3}{U^2} = H$.

Die bisher betrachteten Bahnverhältnisse und Bewegungseigenarten betreffen die planetarischen Großkörper, deren Bewegungen wesentlich durch die Gravitation, die Anziehungswirkung vor allem der Sonne bedingt werden. Bei den kleineren Körpern, etwa von der Größe der Meteoriten abwärts, machen sich auch andere Kräfte bemerkbar, die bei den größeren Körpern selbst innerhalb von Jahrmillionen unmerklich bleiben. Es sind dies Wirkungen der solaren

Strahlung, der elektromagnetischen wie korpuskularen, des interplanetaren und interstellaren Mediums und der Magnetfelder im interplanetaren Raum.

Physikalischer Aufbau und stofflicher Bestand der Planeten

Die stoffliche Komponente der interplanetaren Materie kommt im Planetensystem in Gestalt von Körpern der verschiedensten Größen vor. Man kann drei Hauptstadien der Bildungen unterscheiden: 1. den gasförmigen Zustand, 2. das Stadium der irregulären Festkörper und 3. die Ausbildung kugelförmiger Weltkörper (Abb.).



Körper verschiedener Dimensionen sind am Zustandekommen der mannigfaltigen planetarischen Erscheinungsformen beteiligt; über der Skale der Partikeldurchmesser sind die physikalischen Zustände angegeben, darunter charakteristische Körpergrößen und Körperstadien

Gas – Staub – kugelförmiger Weltkörper. Die Gaskomponente besteht überwiegend aus Elektronen und Protonen. Das rührt daher, daß der Wasserstoff das bei weitem häufigste Element im Weltall ist. Der Anteil schwererer Atome bzw. vereinzelter Moleküle dürfte, vielleicht abgesehen vom Helium, sehr gering sein. Die Sonnenkorona, das Polarlicht und Komponenten des Nachthimmel- und Zodiakallichtes sind Erscheinungen, die durch das Gas im interplanetaren

Raume, das zum Teil von der Sonne abströmt, hervorgerufen werden. Der Teil der irregulären Festkörper, der von mikroskopischen Partikeln gebildet wird, verdient mit Recht die Bezeichnung *Staub*. Solchen von der Sonne beleuchteten Staub finden wir im Saturnring, in der Hauptkomponente des Zodiakallichtes, in den weiten Gefilden der wie Sandwüsten aussehenden Mondlandschaften und schwach auch in der äußeren Sonnenkorona, in der Koma und den sonnenwärts gerichteten sogenannten irregulären Schweifstrahlen der sonnennahen Kometen. Beim Eindringen staubförmiger Körper in die oberen Schichten der Erdatmosphäre wird im Höhenbereich der Ionosphäre (80 bis 450 km) ein allgemeines, mitunter lebhaft gegliedertes flächen- und streifenförmiges Leuchten hervorgerufen. Zu den größeren irregulären interplanetaren Festkörpern gehören das unübersehbare Heer der Meteoriten, die kleinsten der Kleinen Planeten, die sogenannten Asteroiden, und die Kerne der meisten Kometen. Je größer die Körper sind, d. h. je mehr Masse in einem Körper zusammengeballt ist, desto stärker wird die Eigengravitation. Unter der Last der äußeren Schichten eines planetarischen Körpers liegt sein Inneres zusammengepreßt. Denken wir uns einen solchen Himmelskörper aus einer großen Zahl kleinerer Festkörper zusammengebaut, so müßten sich bei steigendem Druck, im Inneren also, die Hohlräume in zunehmendem Maße schließen. Im Zentrum wird der höchste Druck erreicht; sobald dort die Fließgrenze des Baustoffs erreicht bzw. überschritten wird, bildet sich ein magmatischer Kern. Die äußeren Bereiche können dabei noch von bruchstückartigen Formen gebildet sein. Sobald der größte Teil der Masse des Weltkörpers innerhalb des Bereichs der Fließgrenze liegt, bis zu etwa 90% des Radius, wird seine Gestalt nicht mehr weitab von der Kugelform oder bei merklicher Rotation von der Form eines Sphäroids liegen. Die eben gemachte Feststellung des Bruchteils des im Bereiche der Fließgrenze liegenden Radius ist zweifellos willkürlich, gibt aber offenbar die richtige Größenordnung wieder. Für den Druck innerhalb eines homogenen Himmelskörpers mit der mittleren Dichte $\bar{\varrho}$ und dem Halbmesser R

gilt die Formel $p(r) = \frac{2}{3} \Pi G \bar{\varrho}^2 (R^2 - r^2)$, wenn r der Abstand des betrachteten inneren Punktes vom Mittelpunkt ist und G die Gravitationskonstante bedeutet. Mit einer mittleren Dichte $\bar{\varrho} = 4{,}2\ \mathrm{g/cm^3}$, die etwa dem Durchschnittswert für Steinmeteoriten entspricht, erhält man für $r = 0{,}9\ R$, wenn für den Druck der Fließgrenze $p_F = 2 \cdot 10^8\ \mathrm{dyn/cm^2}$ gesetzt wird, $R = 200$ km. Von diesen Dimensionen aufwärts hat man also für planetarische Körper unbedingt Kugelform zu erwarten, womit natürlich nicht gesagt sein soll, daß nicht schon kleinere Körper nahezu kugelförmige Gestalt haben und im Inneren wesentlich symmetrisch aufgebaut sein können. Es wird von dem Entwicklungsweg abhängen, den der betrachtete planetarische Körper durchschritten hat, welche Körpergestalt er bei seiner Masse besitzt. Aus der Gasphase oder dem Schmelzfluß kondensierte Weltkörper werden bei wesentlich geringeren Ausmaßen Kugelform annehmen, sobald die Schwerkraft in der Lage ist, die Kräfte der inneren Reibung zu überwinden. Dies dürfte bei glutflüssigen Körpern der Fall sein, die erheblich kleiner sind als die obige Größenangabe. Es ist also damit zu rechnen, daß selbst Körper von den Dimensionen der Riesenmeteoriten noch nahezu kugelförmige Gestalt haben können. Anders ist es bei jenen Weltkörpern, die ihr Dasein einem Zusammenstoß zweier bereits erstarrter Himmelskörper verdanken. Wenn auch zufolge der Umsetzung der beim Zusammenstoß wirksam werdenden Bewegungsenergie ein Teil des Materials der beiden Stoßpartner wieder aufgeschmolzen werden dürfte, so wird doch ein großer Anteil von bruchstückartigen Trümmern erzeugt. Weltkörper dieser Gestalt sind in einem weiten Größenbereich bekannt, von den Partikeln des kosmischen Staubes, den Meteoriten, bis zu den Asteroiden bzw. Kleinmonden.

Metallische Phase. Bei fortschreitender Anhäufung von Masse in einem Himmelskörper tritt im planetarischen Zustand noch eine weitere Modifikation unter dem Einfluß des Innendruckes ein: die *metallische Phase.* Hierunter versteht man den Zustand, bei dem durch Steigerung des Innen-

druckes, der dimensionsmäßig einer Energie pro Volumeneinheit entspricht, dem Stoff eine die Gitterenergie übertreffende Energie aufgeprägt wird. Dadurch verfallen die Kristallgitter der im Inneren befindlichen Substanz der Auflösung. Die Elektronen werden so leicht beweglich, wie dies bei den Metallen unter normalen Verhältnissen bereits der Fall ist. Die Dichte steigt vom Übergang der einen in die andere Phase sprunghaft an. Diese Unstetigkeitsschicht liegt bei der Erde in etwa 2900 km Tiefe und macht sich hinsichtlich der Ausbreitung der Erdbebenwellen deutlich bemerkbar. Der Bereich unterhalb dieser Phasengrenze verhält sich gegenüber den Erdbebenwellen so, wie eine kompakte Metallmasse: je nach dem Auftreffwinkel werden diese Wellen an der Unstetigkeitsschicht reflektiert oder gebrochen. Aus diesem Grunde neigte man früher der Ansicht zu, daß dieses Kerngebiet der Erde aus Eisen oder Nickeleisen bestehen soll. Von den erdähnlichen Planeten besitzt die Venus einen kleineren Kern als die Erde, beim Mars ist das Vorhandensein eines solchen Kerngebietes einigermaßen wahrscheinlich, wogegen Merkur und Mond im Innern wesentlich homogen, mit nur schwach zum Zentrum ansteigender Dichte, aufgebaut sind. Allgemein tritt bei den planetarischen Körpern naturgegeben die Tendenz zu Tage, daß die oberflächlichen Unebenheiten bzw. Erhebungen im Verhältnis zu den Dimensionen des Himmelskörpers um so größer werden, je kleiner der Planet selbst ist. So findet ein allmählicher Übergang von den kugelförmigen Weltkörpern zu den irregulären, felsbrockenartigen kleinsten Planetoiden bzw. Meteoriten statt.

Atmosphäre und Strahlung. Um den Aufbau der Riesenplaneten vom Typ des Jupiter zu verstehen, die wesentlich gasförmiger Struktur sind, soll zuvor einiges über Aufbau und Bestand der Gashüllen gesagt werden, die auch Planeten vom Typ unserer Erde umgeben. Eine Atmosphäre steht mit dem Planeten, den sie umhüllt, und mit dem Außenraum, der sie umgibt, in dauernder Wechselwirkung. Ihr Bestehen und ihre Weiterentwicklung sind an das vorgegebene Ausmaß dieser Wechselwirkung geknüpft. Insbesondere muß irgend-

ein beliebiger Zustand einer Atmosphäre, etwa der gegenwärtige, bedingt sein durch den Ausgangszustand und durch die seit jenem Zeitpunkt wirksamen vier materiellen Ströme:

1. durch den Zuwachs an Gas, das aus dem Inneren des Planeten austritt (Entgasung des planetarischen Körpers),
2. durch den Zuwachs an Gas und meteoritischem Material, das aus dem Weltraum aufgenommen wird, wobei die festen Partikel zum größten Teil verdampfen,
3. durch die von den äußeren Schichten der flüssigen und festen Erd- bzw. Planetenrinde aufgenommenen Moleküle und
4. durch den Abgang von Gaspartikeln in den Außenraum aus den äußersten Bereichen der Atmosphäre, der sogenannten *Dissipationssphäre*, infolge Erreichens der hierfür erforderlichen *Entweichungsgeschwindigkeit*.

Nur massereiche Planeten können leichte Atome und Moleküle in größerer Menge in ihrer Atmosphäre halten. Bei Mars, Erde und Venus, wahrscheinlich auch bei Pluto, Mond und Merkur liegt die sehr unterschiedliche Gashülle wesentlich über der festen Litho- bzw. flüssigen Hydrosphäre und bildet praktisch eine selbständige Schicht zwischen dem planetarischen Körper und dem extremen Vakuum des Weltraumes. Im Gegensatz hierzu geht die Atmosphäre bei den Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun stetig in die darunter liegenden, ebenfalls gasförmigen Schichten über, ohne daß dabei eine plötzliche (unstetige) Zunahme der Dichte bzw. eine auffällige Änderung der chemischen Zusammensetzung vorhanden ist. Bei diesen jupiterähnlichen Planeten, die im wesentlichen gasförmiger Natur sind, versteht man unter Atmosphäre dasselbe wie bei den Fixsternen, z. B. also auch bei der Sonne, nämlich: die äußeren Schichten der kosmischen Gaskugeln, soweit man von außen hineinblicken kann bzw. bis in jene Tiefen, aus welchen noch nachweisbar Strahlenmengen zu uns gelangen. Das *Spektrum eines Planeten* besteht grundsätzlich aus zwei Hauptanteilen. Das Spektrum des reflektierten bzw. gestreuten Sonnenlichtes, das zwar durch die dabei mitwirkende Materie selektiv etwas verändert wird, kann im großen und ganzen seine Her-

kunft von der Sonne nicht verleugnen, insofern es die der solaren Strahlung eigenen *Fraunhoferschen Linien* zeigt. Der zweite Anteil, das Spektrum der sogenannten *planetarischen* Eigenstrahlung, rührt von jenem Bruchteil der Sonnenenergie her, der von den planetarischen Außenschichten nicht in den Raum reflektiert, sondern von den Oberflächenschichten des Planeten absorbiert wird und einen entsprechenden Anstieg der Oberflächentemperatur bewirkt, der so weit geht, daß der Planet gerade soviel Energie abstrahlen kann, wie er aus der Sonnenstrahlung zurückbehält. Im Gegensatz zum Reflexionsspektrum, das wesentlich im kurzwelligen Spektralbereich liegt, muß zufolge der relativ niedrigen Temperatur der Hauptteil des Spektrums der planetarischen Eigenstrahlung sich ins langwellige Gebiet, praktisch in den Bereich des Ultrarot erstrecken (*Wiensches Verschiebungsgesetz*). In der Tabelle (S. 82/83) haben wir eine Übersicht über die Bahnelemente und die physikalischen Bestimmungsstücke der großen planetarischen Körper.

Unsere Nachbarplaneten

Von besonderer Bedeutung sind heute im beginnenden Zeitalter der Astronautik die beiden Nachbarplaneten der Erde: Venus und Mars. Zufolge ihrer Stellung im Sonnensystem unterliegen sie einem ähnlichen Strahlungseinfluß der Sonne wie die Erde. Da sie auch ungefähr die gleiche Masse besitzen, dürften sie am ehesten dem Planeten Erde ähnlich sein.

Venus. Am stärksten trifft dies für die Venus zu, deren Durchmesser und deren Masse den entsprechenden Größen der Erde sehr nahekommen (s. Tabelle). Daraus folgt, daß die Schwerebeschleunigung etwa 87% der Erdschwere beträgt und die Entweichungsgeschwindigkeit mit 10,3 km/s nur wenig geringer ist als auf der Erde. Die bisher nachweisbare Gashülle enthält zu etwa 39% Stickstoff und 61% Kohlendioxyd bei einem Gesamtdruck von nur $2{,}7 \cdot 10^5$ dyn/cm^2 (= 270 mbar); das entspricht dem irdischen Luftdruck in

rund 9 km Höhe. Aber nicht nur wegen dieses geringen Luftdruckes, sondern vor allem wegen des hohen Kohlendioxyd- und des überaus geringen Sauerstoffgehaltes dürfte die Venusatmosphäre für die Lungen irdischer Lebewesen nicht zuträglich sein. Der Gehalt an Wasserdampf in dem der Beobachtung zugänglichen oberen Teil der Gashülle scheint noch geringer zu sein als der an Sauerstoff. Doch ist damit nicht gesagt, daß nicht Wasser in bescheidenen Mengen auf der Venus vorhanden sein kann. Die Eigenart der Verhältnisse an der Venusoberfläche hat es mit sich gebracht, daß der größte Teil des ursprünglich sicher vorhandenen Wassers verlorengegangen ist. Infolge der stärkeren Erwärmung durch die Sonne ist die Venusatmosphäre sehr warm, und so gelangt das verdampfte Wasser, ohne zu Wolken zu kondensieren, in so große Höhen, daß es durch die kurzwellige Ultraviolettstrahlung der Sonne in Wasserstoff, $2H_2$, und Sauerstoff, O_2, aufgespalten wird. Man nennt diesen Vorgang Dissoziation. Der Wasserstoff entweicht in den Weltraum, der Sauerstoff wird wegen seines größeren Gewichtes zurückgehalten und kann wegen seiner chemischen Aktivität mit anderen Stoffen neue Verbindungen eingehen, etwa mit dem Kohlenstoff; er bildet über das Monoxyd schließlich das Kohlendioxyd. So ist letzten Endes die größere Sonnennähe der Venus dafür verantwortlich zu machen, daß ihr Wasserhaushalt so grundverschieden von dem der Erde ist, obwohl sonst eine beachtliche Ähnlichkeit zwischen beiden Weltkörpern besteht.

Von außen her kann man bei diesem Planeten nur bis in eine gewisse Tiefe hineinschauen, in der eine anscheinend ununterbrochen aufgewirbelte Staub- und Dunstsphäre lagert, die den Anblick der festen Venusoberfläche verhindert (vgl. Tafel IV). Das Vorhandensein dieser Staubhülle bewirkt ein sehr hohes Reflexionsvermögen, das nach neueren Messungen in der Gegend von $A = 0{,}76$ zu liegen scheint. Etwa 25% der auf der Venus fast doppelt so intensiven Strahlungsenergie der Sonne dringt bis zum Boden durch, der demzufolge stark erwärmt wird. In der Äquatorzone der Venus dürfte die Temperatur um 100 °C liegen, in

Zusammenstellung der Bahnelemente und anderer wichtiger Bestimmungsstücke der neun großen Planeten

Planet	a AE	a Mill. km	U_* in trop. Jahren	U_* Tage	$U_\odot$ Tage	$\bar{v}$ km/s	e	i
Merkur ☿	0,3871	57,91	0,2408	87,97	115,88	47,9	0,206	7° 0′
Venus ♀	0,7233	108,21	0,6152	224,70	583,92	35,0	0,007	3°24
Erde ⊕	1,0000	149,60	1,0000	365,26	—	29,8	0,017	—
Mars ♂	1,5237	227,9	1,8809	686,98	779,94	24,1	0,093	1°51
Jupiter ♃	5,2027	778,3	11,8622	4332,59	398,88	13,1	0,048	1°19′
Saturn ♄	9,546	1428	29,4577	10759,2	378,09	9,6	0,056	2°30′
Uranus ♅	19,20	2872	84,018	30687	369,66	6,8	0,047	0°46′
Neptun ♆	30,09	4498	164,78	60184	367,49	5,4	0,009	1°47′
Pluto ♇	39,5	5910	248,4	90700	366,74	4,7	0,247	17° 9′

Planet	Ω	ω	θ	D km	D ⊕ = 1	a	M g	M ⊕ = 1
☿	47°44′	76°40′	268°46′	4840	0,38	0,0	$3{,}20 \cdot 10^{26}$	0,053
♀	76°14′	130°51′	234°29′	12400	0,97	0,0	$4{,}87 \cdot 10^{27}$	0,815
⊕	—	102° 5′	357°30′	12756	1,00	0,0034	$5{,}98 \cdot 10^{27}$	1,000
♂	49°10′	335° 8′	120° 2′	6800	0,53	0,0052	$6{,}40 \cdot 10^{26}$	0,107
♃	99°57′	13°32′	202°41′	142800	11,20	0,062	$1{,}90 \cdot 10^{30}$	318,00
♄	113°14′	92° 5′	312°59′	120800	9,47	0,096	$5{,}69 \cdot 10^{29}$	95,22
♅	73°45′	169°51′	214°43′	47600	3,75	0,06	$8{,}70 \cdot 10^{28}$	14,55
♆	131°14′	44°10′	19°33′	44600	3,50	0,02	$1{,}03 \cdot 10^{29}$	17,23
♇	109°38′	223°29′	192°29′	14400	1,13	—	$5 \cdot 10^{27}$	0,9

Planet	$\bar{\varrho}$ g/cm³	g cm/s²	v_∞ km/s	P_{rot} h m	ε	T °K	A
☿	5,3	3,60	3,9	— —	—	450—690	0,07
♀	4,95	8,50	10,3	— —	—	330—400	0,76
⊕	5,52	9,81	11,2	23 56	23° 27′	230—320	0,40
♂	3,95	3,76	5,1	24 37	25° 12′	220—285	0,15
♃	1,33	26,0	60,2	9 50	3° 7′	120—135	0,51
♄	0,687	11,2	36,3	10 14	26° 45′	90—125	0,50
♅	1,56	9,40	22,0	10 49	97° 59′	70	0,66
♆	2,27	15,0	25,1	15 40	29°	50	0,62
♇	4	8	—	16	—	–	0,16

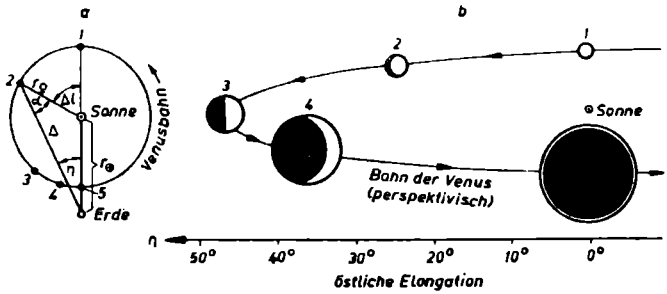
a große Halbachse der elliptischen Bahn
U_* siderische Umlaufszeit
$U_\odot$ synodische Umlaufszeit
$\bar{v}$ mittlere Bahngeschwindigkeit
e Exzentrizität der Bahnellipse
i Bahnneigung gegen die Ekliptik
Ω Länge des aufsteigenden Knotens
ω Abstand des Perihels vom Knoten
Θ wahre Anomalie
D Durchmesser
α Abplattung
M Masse
$\bar{\varrho}$ mittlere Dichte
g Schwerebeschleunigung an der Oberfläche
v_∞ Entweichungsgeschwindigkeit
P_{rot} Achsenumdrehung
ε Neigung der Äquatorebene gegen die Bahnebene
T Oberflächentemperatur
A Albedo

Die Bahnelemente i, Ω, ω sind langsam, die wahre Anomalie Θ schneller veränderlich und gelten für 1950 Januar 0,5 WZ.

den Polargebieten mag sie etwa 10 °C betragen. Der so erwärmte Boden strahlt im langwelligen (infraroten) Spektralbereich diese rund 25% in die Atmosphäre zurück, wo diese Strahlung durch die Kohlensäure in erheblichem Maße absorbiert und folglich nicht unmittelbar, sondern nur langsam nach außen hindurchgelassen wird. Es findet eine Aufheizung der unteren Atmosphäre statt, deren Wärme sich auch während der Nacht nur langsam verliert. Dieser als *Glashauswirkung* bezeichnete thermische Effekt kommt auch auf der Erde, allerdings in viel geringerem Umfange vor. Infolge dieser Erhitzung werden gewaltige vertikale Verlagerungen der atmosphärischen Gase stattfinden, also Vorgänge und Strömungen auftreten, die auf der Erde zur Entstehung der Gewitter führen. Da auch trockene Staubstürme zur Trennung der elektrischen Ladungen führen können, ist es nicht unwahrscheinlich, daß die im Bereich der Radiostrahlung von der Venus empfangenen Signale mit derartigen atmosphärischen Ereignissen in Zusammenhang stehen.

Die von SCHIAPARELLI vermutete gebundene Rotation der Venus von 225 Tagen ist heute endgültig widerlegt. Infolge der größeren Entfernung von der Sonne und der größeren abzubremsenden Masse konnte sich die Venus von der ursprünglichen Achsendrehung noch einen beachtlichen Rest bewahren.

Infolge der geometrischen Anordnung der Bahn im Planetensystem ist die Venus derjenige Planet, dessen Abstand von der Erde nächst dem Mars relativ am stärksten schwankt (Abb.). Von den fünf in der Abbildung dargestellten Konstellationen bezeichnet (1) die obere Konjunktion, in der die Venus im Vollicht zu sehen ist; bei (2) erreicht sie ihre geringste Helligkeit bei einem Phasenwinkel von $\alpha = 35°$; Stellung (3) zeigt die Venus im Halblicht in größter östlicher Elongation η von der Sonne; bei (4) erreicht die Venus bei dem Phasenwinkel $\alpha = 125°$ ihren größten Glanz; in (5) steht sie als „Neuvenus" in unterer Konjunktion unmittelbar bei der Sonne. In der Abbildung sind noch die Abstände $r_{♀}$ Venus–Sonne, $r_{\oplus}$ Erde–Sonne, Δ Venus–Erde und der



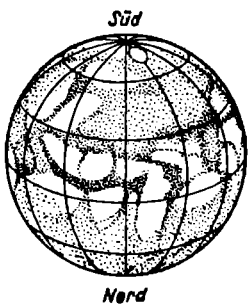
Die relative synodische Bewegung der Venus; a) Anblick der relativen Venusbahn vom Nordpol der Ekliptik aus; b) perspektivische Darstellung der Lichtgestalten und der scheinbaren Durchmesser der Venus auf der östlichen Halbbahn in den fünf Hauptphasen von der Erde aus gesehen (schematisch)

Winkel Δl als heliozentrischer Abstand der Venus von der oberen Kulmination angegeben. Wer den von Fall zu Fall etwas unterschiedlichen Verlauf dieser Ereignisse genauer kennen möchte, der muß zu einer Ephemeride in den handelsüblichen astronomischen Jahrbüchern greifen, so z. B. zu dem wohlfeilen „Kalender für Sternfreunde" von Dr. P. Ahnert, der für jedes Jahr neu erscheint.

Wegen der stark veränderlichen Entfernung von der Erde und dem damit umgekehrt proportional verlaufenden scheinbaren Durchmesser erscheint die Vollvenus, abweichend von der wechselnden Helligkeit des Mondes, nahezu im kleinsten Licht, das strenggenommen wegen des Phasengesetzes rund 100 Tage vor bzw. nach der oberen Konjunktion stattfindet. Die Helligkeitsänderung ist während dieser ganzen Zeit nur unbedeutend, nimmt aber dann merklich zu und führt etwa 40 Tage nach der bei Halblicht erreichten größten Elongation zur maximalen Helligkeit. Dabei zeigt Venus eine Lichtgestalt, die dem fast 5 Tage alten Mond entspricht. Ihre scheinbare rückstrahlende Leuchtfläche ist dann rund das Vierfache der leuchtenden Fläche der Vollvenus, ihre Helligkeit aber nur reichlich das Doppelte, ihre Leuchtdichte ist also im Durchschnitt nur die Hälfte. Daß die Helligkeit der Venus sich zwischen Minimum und Maximum nur um rund eine Größenklasse ändert, obwohl die Entfernung im

Verhältnis 1:6 schwankt und die Phase alle Stufen von der Voll- bis zur Neuvenus durchläuft, hat seinen Grund in der Gegenläufigkeit der beiden Vorgänge, die sich daher in starkem Maße kompensieren. Bis zur unteren Konjunktion nimmt die Helligkeit der Venus wieder etwas ab, was aber wegen der nun sich anschließenden Periode der Unsichtbarkeit kaum zu bemerken ist, weil mit der Annäherung der Venus an die Sonne der Himmelsuntergrund heller wird und der Helligkeitseindruck, den ein leuchtendes Objekt hervorruft, in starkem Maße von der Leuchtdichte des Umfeldes abhängt.

Mars. Mars erfreut sich wegen der unglücklichen Wahl des Wortes „Kanäle" für gewisse dunkle Objekte seiner Oberfläche eines allgemeinen Interesses. Obwohl SCHIAPARELLI, der diese verhängnisvolle Bezeichnung eingeführt hat, zunächst nachdrücklich hervorhob, daß dieses Wort nur die geometrische Ähnlichkeit zum Ausdruck bringen sollte, ist er mit der Zeit selbst dem Zauber dieses ungeschickt gewählten Wortes erlegen und hat damit der ungezügelten Phantasie den Weg zu unserem Nachbarplaneten mit dem rötlichen Lichte geebnet. Um so wichtiger ist es, diesen heute noch verbreiteten Phantasien durch Gegenüberstellung mit dem tatsächlich Bekannten Einhalt zu gebieten.
Was wissen wir also auf Grund der Beobachtungen über die Oberflächengestalt und die physikalischen Verhältnisse auf dem Planeten Mars? Vergleicht man etwa die Zeichnung der Oberflächengebilde eines erfahrenen und geübten Marsbeobachters mit dem Bilde, das man in einem entsprechend stark vergrößernden Fernrohr sehen kann, so ist man zunächst enttäuscht, weil man nicht im entferntesten eine solche Fülle von Einzelheiten wahrzunehmen vermag (Abb.). Man vergißt



Mars 1909, Oktober 20, nach einer Zeichnung von K. R. Graff; Anblick im astronomischen Fernrohr, also Süden oben

leider allzu oft oder weiß es gar nicht, daß eine solche Zeichnung das innerhalb einer gewissen Zeit von oft vielen Minuten Dauer Gesehene wiedergibt, wobei besonders alle manchmal nur Sekunden dauernden störungsfreien oder störungsverminderten Zwischenzeiten den wesentlichen Anteil am Zustandekommen der Feinstruktur einer solchen Abbildung liefern. Aus einer großen Anzahl von Einzelbildern dieser Art läßt sich dann schließlich eine Übersichtskarte gewinnen (vgl. Tafel V). Ein Vergleich von Übersichtskarten der verschiedensten Beobachter und aus weit auseinanderliegenden Epochen macht deutlich, daß in jedem Fall die Grobstruktur, vielfach aber auch ein großer Teil der feineren Details eine unveränderliche Realität der Marsoberfläche darstellen und daß höchstens in einigen Einzelheiten deutliche Abweichungen und Unterschiede auftreten, die jahres- oder tageszeitliche oder auch klimatische Ursachen haben mögen.

Einen deutlichen jahreszeitlichen Wechsel ihrer Größe und Struktur zeigt z. B. die auffälligste Erscheinung der Marsoberfläche: die ***Polarkappe***, die bereits in mittleren Fernrohren erkennbar ist (vgl. Tafel IV). Zufolge der Neigung der Rotationsachse des Mars von rund 25° gegen seine Bahnebene treten auf seiner Oberfläche ausgeprägte Jahreszeiten ein, die sich — genau wie auf der Erde — auf den beiden Hemisphären gegenläufig abwechseln. Das Polargebiet derjenigen Halbkugel, die gerade Sommer hat, erscheint meist völlig frei von jeglicher weißen Fläche. Im Herbst bildet sich und wächst die weißliche Polkappe, indem sie gelegentlich aus mehreren Einzelfeldern zu einem Ganzen verschmilzt, im Hochwinter, der mit einer entsprechenden, von der Erde her bekannten zeitlichen Phasenverschiebung nach dem Tiefststande der Sonne eintritt, erreicht die Vereisung ihre größte Ausdehnung. Im Frühling beginnt das Abschmelzen, wobei vielfach auch ein dunklerer Rand um die restliche Schneefläche zu sehen ist, und im Sommer wird dann der Ausgangszustand wieder erreicht. Wegen der fast 2 Jahre dauernden Umlaufzeit des Mars haben dort die Jahreszeiten naturgemäß ebenfalls ungefähr die doppelte Länge wie auf der Erde.

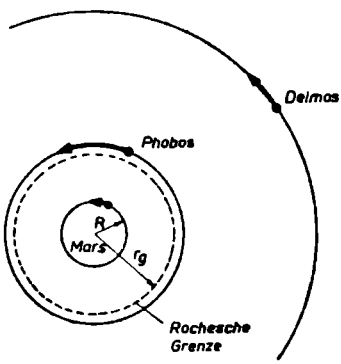
Eine wichtige Schlußfolgerung kann man aus der Tatsache des Entstehens und Abschmelzens der Polarkappen in dem beobachteten Ausmaße über den Wasserhaushalt auf dem Mars ziehen. Wegen der größeren Entfernung beträgt die Einstrahlung der Sonne auf dem Mars (Solarkonstante), d. h. die in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit treffende Energie im Durchschnitt nur 43% der irdischen, wegen der unterschiedlichen Albedo findet eine teilweise Kompensation bis auf 86% statt. Trotz der geringeren effektiven Energieaufnahme an der Marsoberfläche reicht diese Leistung hier zum praktisch völligen Abschmelzen und Verdampfen der polaren Eiskappe, wogegen auf der Erde weder in der Arktis noch in der Antarktis eine wesentliche Verringerung der Eisbestände im jeweiligen Sommer eintritt. Dieses merkwürdige Verhalten läßt sich nur so erklären, daß die weißlichen Polkappen des Mars außerordentlich dünn sind. In Frage kommen Reifniederschläge oder dünne Schneefelder. Die Wärmekapazität dieser relativ geringen Eismengen ist eben nur so groß, daß der von der Sonne zugestrahlte Energiebetrag zur Auflösung während der warmen Jahreszeit ausreicht. Die Tatsache, daß sich während des langen Winters auf dem Mars nur so wenig Eis niederschlägt, ist kaum anders verständlich als durch die Annahme, daß freie Wassermoleküle in der Nähe oder direkt auf der Marsoberfläche viel seltener sind als auf der Erde. Die aus dem Wasserreichtum der Erde sich während des Winters in den Polargebieten niederschlagenden Eismengen bilden dagegen ein gewaltiges Kältereservoir, gegen das die Sonne nicht ankommt.

Ausgedehnte Wolkenfelder oder gar eine geschlossene Wolkendecke gibt es in der Marsatmosphäre nicht. Dagegen sind Nebelbildungen über weiten Gebieten, besonders in den Stunden nach Sonnenaufgang und im Herbst, nicht selten. Die vorhandene spärliche Bewölkung ist meist aufgelockert, lokal eng begrenzt und zeitlich wenig beständig. Nur in den Polargebieten können sich hohe Wolkenfelder über den eisbedeckten Flächen ausbilden und längere Zeit halten. Gebietseintrübungen, die gelegentlich die Beobachtung von Einzelheiten verhindern, werden als Staubstürme gedeutet.

Die dunklen Flächen des Planeten, die im Farbkontrast zur rötlichen Oberfläche leicht grünlich getönt erscheinen, erwecken den Eindruck eines Pflanzenwuchses. Man kann sich allerdings hier keine höheren Pflanzen vorstellen, sondern denkt an niedere Arten wie Flechten, Moose u. a. Solche Pflanzen sind zählebig und widerstandsfähig, sie können bei niedrigen Temperaturen selbst in einer verdünnten Atmosphäre existieren, die nur geringste Mengen Wasserdampf enthält. Kohlensäure zum Aufbau der eigenen Zellen ist ausreichend vorhanden, der dabei frei werdende Sauerstoff bleibt als O_2-Spur in der Atmosphäre zurück.
Die photographische Beobachtung des Planeten Mars hat gegenüber der visuellen Beobachtung nichts wesentlich Neues erbracht, sie hat aber die Realität der gesehenen und gezeichneten Oberflächengebilde objektiv erwiesen und die Vermessung der einzelnen Formen erheblich leichter gestaltet.
Die Oberflächentemperatur ist auf dem Mars im allgemeinen niedriger als auf der Erde, in den verschiedenen areographischen Breiten allerdings stark unterschiedlich. In der Tropenzone steigt gegen Mittag die Temperatur über den Gefrierpunkt des Wassers bis gegen +20 °C, in der gemäßigten Zone liegt sie bei 0 °C, an den Polen, besonders im Winter, sinkt sie auf —70 °C bis —100 °C. In der Nacht kühlt aber auch in Äquatornähe der Marsboden stark aus, weil die dünne und vorwiegend kondensationsfreie Atmosphäre nur wenig Schutz gegen die allgemeine Ausstrahlung bietet. Die mittlere Jahrestemperatur des Mars liegt bei —15 °C, also rund 30° niedriger als auf der Erde.
Eine allgemein anerkannte und überzeugende Deutung der Oberflächenformen konnte noch nicht gegeben werden. Ob die dunklen Gebiete wirklich feuchte Vegetationsniederungen sind, ist auch noch völlig offen. Geklärt scheint das Problem der sogenannten *Marskanäle* zu sein. Darunter versteht man ein äußerst feines Netz von Linien, die vorwiegend längs der Großkreise der Planetenkugel sich hinziehen sollen. Je besser die Optik, je stärker die nutzbare Vergrößerung gewählt wird, d. h. je größer das Auflösungs-

vermögen des Fernrohres ist, desto mehr haben sich diese feinen Linien in nichts aufgelöst. Die gröberen, oft schlauchartigen Dunkelgebiete, die man beim ersten Betrachten des Mars wohl fälschlich für „Kanäle" halten könnte, gehören zur Oberflächenkontur des Mars und sind oft photographiert worden, wogegen die offenbar auf optischen Täuschungen beruhenden *Schiaparellischen Kanäle* nie auf einer photographischen Platte abgebildet werden konnten. Damit ist auch der Traum von intelligenten, menschenähnlichen Wesen als Erbauern der Marskanäle abgetan.

Mars wird von zwei kleinen Monden begleitet, die von der Größe kleinerer Planetoiden sind. Man hat sie Furcht (*Phobos*) und Schrecken (*Deimos*) genannt und ihre Halbmesser aus der scheinbaren Helligkeit auf 8 bzw. 4 km geschätzt. Phobos befindet sich im Abstand von rund 2,8 Marsradien vom Zentralplaneten entfernt. Er liegt aber nur wenig außerhalb jener kritischen Grenze, innerhalb der ein Planet keinen anderen Weltkörper von vergleichbarer Größe duldet. Man nennt diese Entfernung die *Rochesche Grenze* nach dem Mathematiker, der sich mit diesem Problem beschäftigt und es gelöst hat. Er findet für das Verhältnis der Grenzentfernung r_g zum Halbmesser R des Zentralkörpers die Beziehung $\frac{r_g}{R} = 2{,}45 \cdot \sqrt[3]{\frac{\varrho_R}{\varrho_r}}$, wenn mit ϱ_R die mittlere Dichte des Planeten, mit ϱ_r die des Satelliten bezeichnet wird. In der Darstellung des Systems der beiden Marsmonde (Abb.) ist die Rochesche Grenzentfernung unter der Annahme eingezeichnet, daß die Dichte beider Körper gleich sei. Ist die Dichte des Satelliten kleiner als die des Zentralplaneten, so verschiebt sich die kritische Grenze gemäß der eben angeführten Formel nach außen. Ein Körper, der im



Maßstabgetreue Abbildung des Mars mit seinen beiden Monden

wesentlichen aus Eis bestünde wie etwa die Kometenkerne, also die Dichte 1 hätte, würde bereits innerhalb der dann nach außen verschobenen Rocheschen Grenze liegen. So kann man also hieraus sogleich den Schluß ziehen, daß Phobos aus schwereren Stoffen bestehen und mindestens eine Dichte von 3,5 g/cm³ haben muß. Wegen seiner geringen Entfernung vom Mars bewegt sich Phobos in seiner Bahn schneller als der Planet rotiert. Die Pfeile in der Abbildung zeigen für die beiden Monde und einen Punkt des Marsäquators die in 1 Stunde zurückgelegten Bögen. Phobos geht danach als einziger Mond unseres Planetensystems am Westhorizont eines Beobachtungsortes seines Zentralplaneten auf und im Osten unter und überholt den betrachteten Ort des Äquators zweimal während eines Tages. Reichlich 4 Stunden befindet er sich oberhalb des Horizontes eines Beobachtungsortes und ändert während seiner Fortbewegung von West nach Ost in entsprechendem Maße seine Lichtgestalt und seine Helligkeit. Deimos dagegen hat eine Winkelgeschwindigkeit, die nur wenig unter der des Planeten Mars liegt. Dadurch kommt es, daß er nur rund aller 5,5 Tage aufgeht und dann etwa 2 Tage und 12 Stunden bis zum Untergang im Westen über dem Horizont bleibt. Innerhalb dieser Zeit wird es am Beobachtungsort zweimal Tag und Nacht, und der Mond ändert, je nach seiner Stellung zur Sonne, seine allerdings nur in Fernrohren zu beobachtende Lichtgestalt und parallel hierzu auch seine Helligkeit. Phobos erreicht maximal mit -9^m eine Helligkeit, die zwischen der der Venus und der des Vollmonds liegt; Deimos strahlt günstigenfalls nur etwa so hell wie die Venus im größten Glanze.

Kleine Planeten oder Planetoiden

Ende des 16. Jahrhunderts war es bereits J. Kepler aufgefallen, daß zwischen Mars und Jupiter eine Abstandslücke klafft, die verglichen mit den anderen Entfernungen zu groß schien. Er schloß deshalb auf die Existenz eines vielleicht kleineren, eben deshalb noch nicht entdeckten Planeten. Um

die Mitte des 18. Jahrhunderts gelang TITIUS die Einordnung der Planetenabstände von der Sonne in eine Reihe, die zwischen Mars und Jupiter ebenfalls eine Lücke aufwies. Bekannt wurde diese Reihe durch eine Veröffentlichung von BODE. Mit einer Laufzahl n kann man die mittlere Entfernung der Planeten a in AE folgendermaßen schreiben: $a_n = 0{,}4 + 0{,}3 \cdot 2^n$. Daß diese Reihe keine tiefere Bedeutung hat, folgt einmal aus dem Laufzahlsprung zwischen Merkur und Venus. Für Merkur muß man $n = -\infty$, für Venus dagegen $n = 0$ setzen. Dann geht die Reihe zunächst glatt weiter: für die Erde $n = 1$ und für Mars $n = 2$. Für $n = 3$ fehlt ein großer Planet, denn Jupiter und Saturn haben die Laufzahlen $n = 4$ und $n = 5$. Die Abweichungen der wirklichen großen Halbachsen der Planetenbahn von den so errechneten Werten sind nicht sehr groß und liegen im Höchstfall bei 5%. Als im Jahre 1781 jenseits des Saturn der siebente Planet Uranus entdeckt wurde, lag er mit einer Abweichung von nur 2% in der durch $n = 6$ bezeichneten Entfernung, so daß dieser Umstand im Jahre 1798 eine systematische Suchaktion nach dem im Abstande $a = 2{,}8$ AE vermuteten Planeten auslöste. Unabhängig davon fand G. PIAZZI am 1. Januar 1801 ein Objekt 8. Größe, das sich als ein Planet herausstellte, der im Abstand $a = 2{,}77$ AE die Sonne umlief. Man nannte diesen Weltkörper *Ceres*. Im Jahre darauf fand W. OLBERS einen zweiten Kleinen Planeten, die *Pallas*. Bis 1807 waren zwei weitere, *Juno* und *Vesta*, gefunden, und man hielt diese vier Körper für Bruchstücke des gesuchten Planeten der Laufzahl $n = 3$.

Als im Jahre 1845 der fünfte Planetoid *Asträa* entdeckt wurde, setzte eine heute noch nicht abgeschlossene Suche nach den Kleinen Planeten ein. Ihre Zahl betrug im Jahre 1890 bereits 302. Der stärkste Anstieg der Entdeckungsanzahlen erfolgte im Jahrzehnt 1930–1940. In diese Zeit fiel auch eine Reihe von Entdeckungen besonders interessanter Fälle, die bis in die innersten Bezirke des Planetensystems vordringen, über die Erdbahn hinein, ja sogar bis über die Merkurbahn sich der Sonne nähern. Die folgende Tabelle bringt einige Angaben über die ersten Planetoiden.

Bahnelemente und physikalische Größen der vier ersten Planetoiden

Nr.	Name	a	e	i	Ω	ω
1	Ceres	2,767	0,079	10,6°	80,5°	71,9°
2	Pallas	2,767	0,235	34,8°	173,0°	309,8°
3	Juno	2,670	0,256	13,0°	170,4°	246,1°
4	Vesta	2,361	0,088	7,1°	104,1°	149,1°

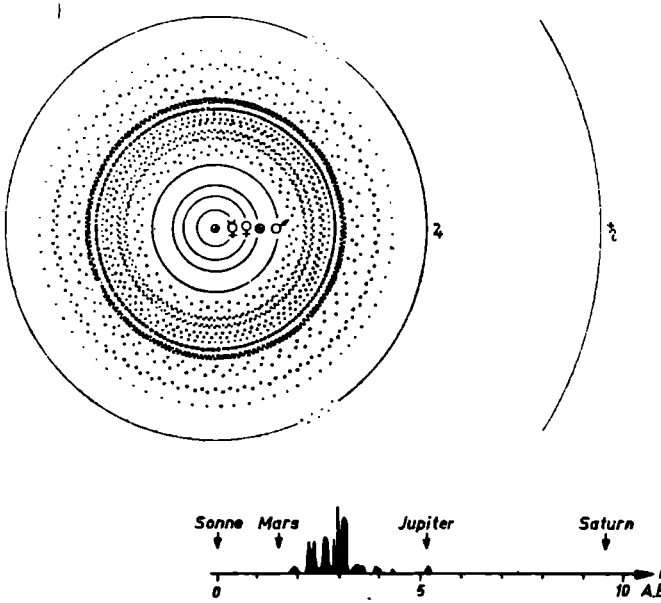
Nr.	Name	T	R	M	m
1	Ceres	1958,47	384	$8{,}3 \cdot 10^{21}$	7,4
2	Pallas	1958,64	246	$2{,}3 \cdot 10^{21}$	8,0
3	Juno	1957,82	102	$1{,}6 \cdot 10^{21}$	8,7
4	Vesta	1960,27	196	$1{,}1 \cdot 10^{21}$	6,5

a *große Halbachse in AE*
e *numerische Exzentrizität*
i *Neigung der Bahnebene*
Ω *Länge des aufsteigenden Knotens*
ω *Abstand des Perihels vom Knoten*
T *Zeitpunkt des Durchgangs durch das Perihel*
R *Radius in km*
M *Masse in g*
m *Helligkeit in mittlerer Opposition*

Die Gesamtheit der Kleinen Planeten, von denen zur Zeit erst ein geringer Teil bekannt ist, bildet ein Untersystem in der Einflußsphäre unserer Sonne. Die Zahl der bekannten Bahnen ist aber doch bereits so groß, daß man mit statistischen Methoden Eigenschaften dieses Systems feststellen konnte. So ist die Verteilung der mittleren Entfernungen dieser Himmelskörper von der Sonne zwar im wesentlichen auf eine bestimmte Zone beschränkt, jedoch keineswegs gleichförmig (Abb. S. 94).

Es gibt einen Körper mit stark elliptischer Bahn, der über den Bereich der Jupiter- und sogar Saturnbahn hinausgelangt und sich im günstigsten Falle einer Periheloppposition der Erde auf rund 1 AE nähern kann. Er trägt den Namen *Hidalgo* und besitzt von allen Kleinen Planeten die größte Bahnhalbachse (s. Tabelle).

Eine noch stärkere Elliptizität seiner Bahn hat *Adonis*, der dabei aber im Perihel etwa den Merkur erreicht, im Aphel aber noch über den Hauptring der Planetoiden hinausgreift. Die am stärksten ausgeprägte Ellipse durchläuft der Asteroid



Die räumliche Verteilung der Planetoiden im Bereich zwischen Mars und Jupiter. Oben: in Aufsicht die verschieden stark besetzten Ringe und die mehr oder minder ausgeprägten Lücken. 60° vor und nach dem Jupiter ♃ sind in seiner Bahn die Trojaner angegeben, 15 Kleine Planeten in einer durch die Kraftwirkung von Sonne und Jupiter bevorzugten Lage im Raum. Unten: Die Häufigkeitsverteilung in Gruppen und Resonanzlücken

Ikarus in reichlich 13 Monaten. Bei einer Exzentrizität von $e = 0{,}826$, die sonst nur bei Kometenbahnen vorkommt, nähert er sich im Perihel der Sonne auf weniger als $^1/_6$ AE, kann sich dann im Aphel aber wieder auf fast 2 AE von ihr entfernen. Er gelangt somit in einen kleinsten Abstand, der etwa die Hälfte des mittleren Abstandes des Merkur von der Sonne ist.

Die oft bruchstückartige Gestalt der kleineren Planetoiden legt die Vermutung nahe, daß mindestens diese Körper durch Zerbersten entstanden sind.

Von der Suche nach den Teilen des zerfallenen achten Planeten, der an der Stelle $n = 3$ (Titus-Bode) die Sonne

Angaben über einige besonders interessante Planetoiden

Nr.	Name	a	π	i	e	U_*
433	Eros	1,46	122°	10,8°	0,222	1,76
719	Albert	2,59	338°	10,8°	0,540	4,17
887	Alinda	2,52	99°	9,0°	0,540	4,00
944	Hidalgo	5,79	79°	42,6°	0,652	13,9
1036	Ganymed	2,67	347°	26,2°	0,540	4,36
1134	Kepler	2,68	336°	15,0°	0,470	4,40
1221	Amor	1,92	197°	11,9°	0,432	2,67
1566	Ikarus	1,08	119°	23,0°	0,826	1,12
1620	Geographos	1,24	253°	13,3°	0,336	1,38
—	Apollo	1,49	321°	6,4°	0,566	1,82
—	Adonis	1,97	32°	1,5°	0,780	2,76
—	Hermes	1,29	126°	4,7°	0,475	1,47
—	Lunik I (UdSSR)	1,15	117°	1,5°	0,148	1,23
—	Pionier IV (USA)	1,07	178°	1,5°	0,070	1,11
—	Pionier V (USA)	0,90	347°	3,4°	0,104	0,855
—	Raumstation zur Venus (UdSSR)	0,87	288°	0,0°	0,185	0,810

a große Halbachse in AE
π Länge des Perihels ($\pi = \Omega + \omega$)
i Neigung der Bahn
e numerische Exzentrizität
U_* siderische Umlaufszeit in Jahren

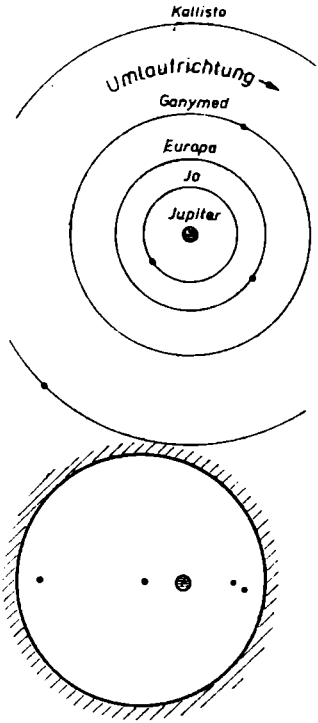
einst umlief, ist die Untersuchung der Planetoiden auch ausgegangen.

Zu der Gruppe der sonnennahen Planetoiden haben sich neuerdings einige — im kosmischen Maßstabe betrachtet — Kleinstasteroiden gesellt (vgl. die folgende Tabelle), von denen der erste am 2. Januar 1959 in der UdSSR gestartete *Lunik I* ist.

Angaben über die Bahnen dieser künstlichen Planetoiden sind in den letzten Zeilen der Tabelle gegeben.

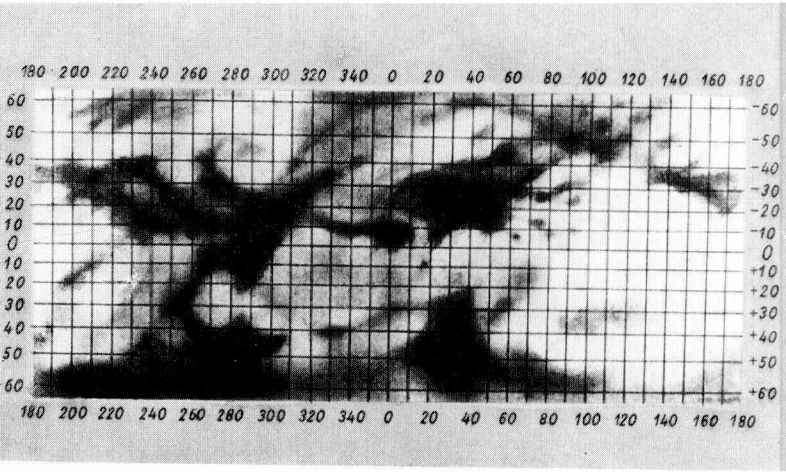
Die Planeten vom Jupitertyp

Jupiter. Der Planet Jupiter ist wegen seiner Größe selbst für ein kleines und mittleres Fernrohr ein stets lohnendes Beobachtungsobjekt. Je nach der Luftunruhe kann man mindestens sofort drei Tatsachen feststellen: 1. daß bis zu vier



Das System der vier hellen Monde des Jupiter am 24. Januar 1959 gegen 7 Uhr MEZ

sternartige Lichtpunkte meist zu beiden Seiten des Planeten zu sehen sind, die ihre Lage im Verhältnis zum Hauptkörper und zueinander innerhalb von Stunden merklich ändern (Abb.); 2. daß Jupiter keine Kugel, sondern ein Rotationsellipsoid ist mit so stark unterschiedlichen Achsen, daß man die Abplattung des Planeten unschwer erkennt; 3. daß parallel zur großen Achse der elliptischen Jupiterscheibe dunkle Wolkenstreifen verlaufen, die besonders deutlich in der Äquatorzone ausgeprägt, aber auch bis in hohe nördliche wie südliche Breiten zu erkennen sind (vgl. Tafel IV). Die vier hellen Monde des Jupiter hatte Galilei bereits im Jahre 1610 mit Hilfe des damals gerade erfundenen Fernrohres entdeckt. Da ihre Bahnebenen ziemlich genau mit der Äquatorebene des Jupiter zusammenfallen, wird jeder Mond innerhalb eines Umlaufes bei der Bewegung durch den Kernschatten des Jupiter verfinstert und erzeugt selbst beim Durchgang zwischen Sonne und Jupiter eine örtlich begrenzte Sonnenfinsternis an der Stelle, wo gerade der im Fernrohr infolge Kontrastes schwarz erscheinende Schattenfleck des Mondes hinfällt. Je nach der Stellung der drei Gestirne Sonne, Jupiter, Erde kann man entweder den Beginn oder das Ende der Verfinsterung der Monde beobachten. Aus der Differenz zwischen den vorausberechneten und den beobachteten Zeiten der Verfinsterungsgrenze konnte Olaf Römer im Jahre 1675 die



Übersichtskarte der Marsoberfläche

Tafel V

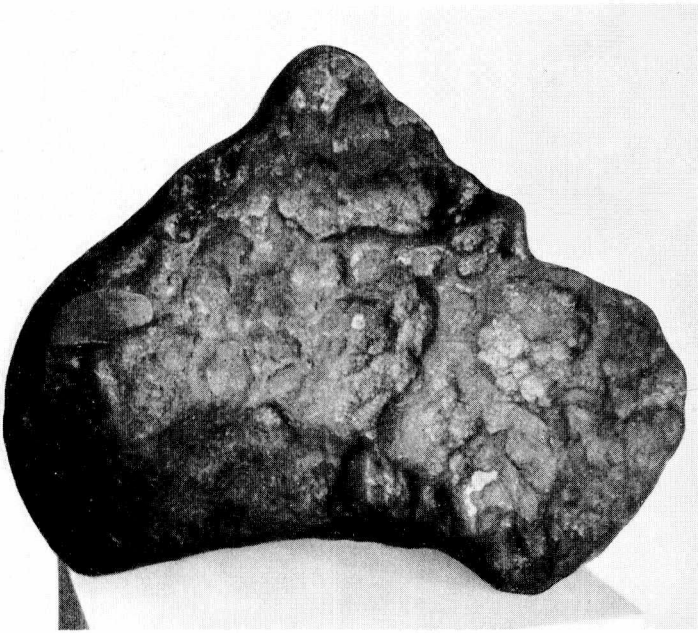
Komet 1939 III

Komet 1943 I
(der helle Stern ist γ UMa)

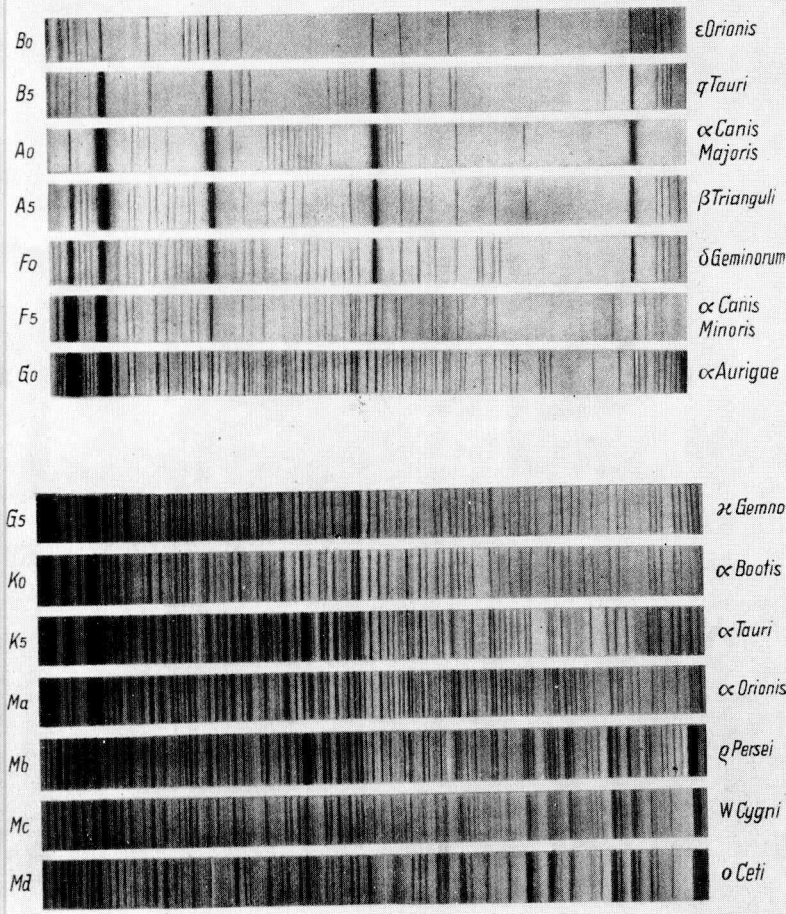
„Meteoritenkrater" in Arizona (Nordamerika)

Tafel VI

Der Meteorit von Kap York (Grönland)



Tafel VII *Teil aus der Milchstraße im Schwan (Nordamerikanebel)*



Tafel VIII *Die Haupttypen der Sternspektren*

Lichtgeschwindigkeit bestimmen, lange bevor eine irdische Möglichkeit ihrer Messung bekannt war.
Trotz der fortwährenden Veränderungen der oberflächennahen Wolkenstruktur lassen sich bestimmte charakteristische Merkmale feststellen, die, wenn auch in stets andersartiger Feinstruktur, immer wieder erkennbar sind. Dies gilt vor allem für die beiden in etwa 25° Abstand nördlich und südlich vom Äquator verlaufenden breiten dunklen Streifen, von denen der südliche meist etwas stärker ausgeprägt erscheint. Bedenkt man, daß kleinste, gerade noch wahrnehmbare Einzelheiten in Wirklichkeit Ausdehnungen von rund 1000 km besitzen, so erkennt man in den relativ raschen Veränderungen der Wolkenstruktur gewaltige Umwälzungen und turbulente Strömungen allergrößten Ausmaßes. Die zur Aufrechterhaltung derartiger Vorgänge nötigen Energien dürften kaum der nurmehr geringfügigen Sonnenstrahlung entstammen. Die Solarkonstante auf Jupiter ist nur etwa $^1/_{30}$ des irdischen Wertes. Vielmehr gewinnt man den Eindruck, daß der Atmosphäre laufend Energie aus dem Inneren des Planeten zugeführt wird. Das Innere dieses Riesenplaneten ist als gasförmig anzusehen. Doch verhält sich dieses unter dem hohen Druck der darüberlagernden äußeren Schichten befindliche Gas wesentlich anders als ein stark verdünntes Gas.
Aus der gemeinsamen Verlagerung der Oberflächengebilde vom Ostrand zum Westrande des Jupiter leitet man seine Rotationszeit zu knapp 10 Stunden ab. Es ist klar, daß die in der Wolkenhülle auftretenden Strömungen zur Folge haben, daß nicht alle Objekte genau die gleiche Umdrehungszeit besitzen.
Von den zwölf Monden des Jupiter bilden die inneren fünf eine Gruppe für sich. Der innerste fünfte Mond bewegt sich noch innerhalb der Bahn des ersten Mondes um den Jupiter und braucht für seinen Umlauf nur etwas mehr, als die Rotationsdauer des Zentralkörpers beträgt. Er wird also ein ähnliches Verhalten zeigen wie der zweite Marsmond Deimos. Die vier Galileischen Jupitermonde sind von der Größe unseres Mondes, der dritte und vierte sogar beträchtlich größer.

Ihre Durchmesser konnten mikrometrisch gemessen werden. Die Abstandsfolge der fünf inneren Monde hat eine weitgehende Ähnlichkeit mit dem Abstandsverhältnis der Planeten von Merkur bis Ceres (vgl. Tabelle).

Die Monde des Jupiter

Bezeichnung	a	U_* d h m	R	M	$\bar{\varrho}$	A	i	m
V	181	0 11 57	80	—	—	—	2,3°	5,6
I	422	1 18 28	1660	$7,9 \cdot 10^{22}$	4,1	0,57	2,3°	5,6
II	671	3 13 14	1440	$4,78 \cdot 10^{22}$	3,8	0,60	1,8°	5,1
III	1 071	7 3 43	2470	$1,53 \cdot 10^{24}$	2,4	0,34	2,3°	6,3
IV	1 884	16 16 32	2340	$9,0 \cdot 10^{22}$	1,7	0,15	2,1°	13,0
VI	11 500	250 15	60				28,4°	13,7
VII	11 750	260	20				27,8°	16,0
X	11 750	260	10				28,3°	16,9
XII	21 000	625	10					19
XI	22 500	696	12				163,4°	18
VIII	23 500	739	20				147 °	18
IX	23 700	755	11				155 °	17

a große Halbachse in 1000 km
U_* siderische Umlaufzeit in Tagen d, Stunden h und Minuten m
R Radius in km
M Masse in g
$\bar{\varrho}$ mittlere Dichte in g/cm³
A Albedo
i Neigung der Bahnebene gegen die Äquatorebene des Planeten
m mittlere Helligkeit

Die übrigen sieben Monde sind auffällig klein und bilden abermals zwei Gruppen. Die erste Gruppe wird von den Monden Nr. VI, VII und X gebildet. Hierbei ist zu beachten, daß die Numerierung der Monde der Reihenfolge ihrer Entdeckung entspricht, nicht ihrem Abstand vom Jupiter. Die drei Mitglieder der ersten Gruppe haben auffälligerweise fast den gleichen Abstand und besitzen Bahnen, deren Ebenen nahezu die gleiche Neigung aufweisen. Dabei weicht der Neigungswinkel erheblich von den sehr kleinen Neigungen der fünf inneren Monde ab. Die restlichen vier Monde scheinen Fremdlinge im System des Jupiter zu sein. Sie befinden sich so weit von ihm entfernt, daß sie für einen Umlauf um den Zentralplaneten 1,7 bis 2,1 Jahre brauchen. Im doppelten Abstande wären sie der Grenze der Einfluß-

sphäre des Jupiter so nahe, daß sich der Gedanke aufdrängt, es handle sich um zugewanderte Planetoiden. Diese Ansicht wird noch dadurch besonders untermauert, daß alle vier Monde sich rückläufig bewegen.

Saturn. Der zweitgrößte Planet ist wegen seines seltsamen und einzigartigen Ringsystems einer der interessantesten Körper unseres Planetensystems. Seine Bahnelemente und sonstigen ihm eigenen Größen finden wir wieder in der Tabelle Seite 82, 83 angegeben. Wegen der rund doppelt so großen Entfernung von der Sonne bzw. auch von der Erde lassen sich nicht mehr so viele Einzelheiten auf seiner Oberfläche erkennen. Deshalb erscheinen die äquatorparallelen Streifen und die Flecken mehr verschwommen und ohne ausgeprägte Details (vgl. Tafel IV). Saturn besitzt von allen planetarischen Großkörpern die stärkste Abplattung. Diese ist, wie ein Vergleich mit Jupiter zeigt, nicht nur von der Zentrifugalkraft, sondern auch von der inneren Massenverteilung und Konstitution des Planeten abhängig; denn Saturn ist etwas kleiner als Jupiter und rotiert in etwas längerer Zeit um seine Achse. Ähnlich wie beim Jupiter nimmt die Leuchtdichte der Saturnscheibe zum Rande hin ab.
Sein innerer Aufbau und die Verhältnisse in seinen äußeren Schichten dürften grundsätzlich denen beim Jupiter ähnlich sein. Auffällig ist die geringe mittlere Dichte, die nur etwa $^2/_3$ von der des Wassers beträgt. Diese Dichte ist eine Folge der kleineren Masse des Saturn. Dementsprechend ist die Schwerebeschleunigung geringer, und zwar — weil sie außerdem noch vom Radius abhängt — etwas weniger als die Hälfte, und daher die Kompression des auch hier gasförmigen Inneren nicht so stark wie beim Jupiter. Wegen des bereits erwähnten großen Sonnenabstandes ist die Oberflächentemperatur, die durch die Sonneneinstrahlung bedingt wird, ebenfalls niedriger. Sie mag bei —170 °C liegen.
Von den neun Monden des Saturn sind in einem mittelgroßen Fernrohr (Objektivdurchmesser 8 bis 10 cm) höchstens vier, oft nur einer zu sehen, nämlich *Titan* (vgl. Tabelle). Er ist noch etwas größer als Ganymed, sogar größer

als Merkur. Doch ist seine Masse nur etwa halb so groß. Seine Dichte ist daher rund 2 g/cm³.

Die Monde des Saturn

Name	a	U_* d h m	R	M	$\bar{\varrho}$	A	i	m
Mimas	185,7	0 22 37	260	$3{,}8 \cdot 10^{19}$	0,5	0,8	1,5°	12,1
Enceladus	238,2	1 8 53	300	$7 \cdot 10^{19}$	0,6	0,8	0°	11,7
Tethys	294,8	1 21 18	600	$6{,}5 \cdot 10^{21}$	0,7	0,8	1°	10,6
Dione	377,7	2 17 41	650	$1{,}03 \cdot 10^{24}$	0,9	0,8	0°	10,7
Rhea	527,5	4 12 25	900	$2{,}3 \cdot 10^{24}$	0,8	0,8	0°	10,0
Titan	1 223	15 22 41	2 500	$1{,}37 \cdot 10^{23}$	2,1	0,27	0,6°	8,3
Hyperion	1 484	21 6 38	200	$1{,}1 \cdot 10^{19}$	3,2		0,8°	14
Japetus	3 563	79 7 56	600	$5 \cdot 10^{24}$	5,4		14,7°	11
Phoebe	12 950	550 11	150				150°	14,5

a *große Halbachse in 1000 km*
U_* *siderische Umlaufzeit in Tagen* d, *Stunden* h *und Minuten* m
R *Radius in km*
M *Masse in g*
ϱ *mittlere Dichte in g/cm³*
A *Albedo*
i *Neigung der Bahnebene gegen die Äquatorebene des Planeten*
m *mittlere Helligkeit*

Die inneren sieben Monde, vielleicht auch noch Japetus, der achte, dürften seit der Entstehung des Planetensystems zum Saturn gehören. Der neunte Mond, Phoebe, fällt sowohl durch seinen übermäßig großen Abstand vom Hauptplaneten wie auch durch seine Rückläufigkeit aus dem Rahmen des Satellitenverbandes und dürfte daher wie die äußeren vier

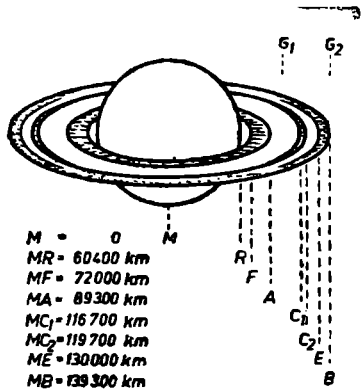
Monde des Jupiter ein zugewanderter Planetoid sein. Aus der gegenseitigen Anziehung der Monde aufeinander, die sich als Störung ihrer Bahnen bemerkbar macht, war es möglich, die Massen dieser Körper zu berechnen.

Das eigenartigste Gebilde ist das Ringsystem des Saturn. Seine geometrischen Dimensionen gibt die Tabelle wieder. Einen Überblick über die Einzelheiten dieses Systems gibt die Abbildung.

Die Radien der verschiedenen Unterteilungen im Ringsystem des Saturn

Bezeichnung	Objekt	Abstand vom Zentrum km	Winkeldistanz bei mittl. Entf.
MR	Äquatorhalbmesser Saturn	60 400	8,73"
F	Innenkante Florring	72 000	10,40"
A	Innenkante Hauptring	89 300	12,91"
C_1	Außenkante Hauptring	116 700	16,87"
C_2	Außenkante Cassini-Spalte	119 700	17,30"
E	Encke-Spalte	130 000	18,78"
B	Außenkante Ring	139 300	20,13"
G_1	Rochesche Grenze für $\varrho_1 = 2{,}4$	97 500	14,10"
G_2	Rochesche Grenze für $\varrho_2 = 0{,}8$	141 000	20,36"

Schon Galilei bemerkte, daß die optische Gestalt des Saturn von der anderer Planeten abwich. In seinem noch sehr unvollkommenen Fernrohr glaubte er zu beiden Seiten der eigentlichen Planetenkugel je eine kleinere wahrzunehmen. Als er dieses merkwürdige Dreigestirn einige Jahre später in Gestalt einer Kugel sah, hielt er die frühere Beobachtung für fehlerhaft.



Schematische Darstellung des Systems der Saturnringe

Eine Verbesserung der optischen Qualität der Fernrohre ließ in der Folgezeit auch die beiden Lücken zwischen Ring und Hauptkörper erkennbar werden, so daß man den Eindruck hatte, als lägen zu beiden Seiten des Saturn zwei sichelmondförmige Henkel. HUYGENS gelangte im Jahre 1655 schließlich zur richtigen Vorstellung von der geometrischen Gestalt des Ringes. Er formulierte sein Ergebnis dahin, daß die Saturnkugel von einem dünnen, ebenen Kreisring umgeben sei, der nirgends mit dem Zentralkörper zusammenhängt und gegen die Ekliptik geneigt ist. Für die damalige Zeit mußte ein derartiges Gebilde als Kuriosum gelten. Noch vor der Aufstellung des Gravitationsgesetzes fand CASSINI im Jahre 1675 die heute nach ihm benannte größte Spalte in dem Ringsystem. Von dieser erstreckt sich der Hauptring nach einwärts und geht schließlich in den auch heute nur schwer erkennbaren Florring über. Der Außenring scheint eine Intensitätsstufe oder eine sehr schmale Spalte zu besitzen, die gelegentlich als Enckesche Trennungslinie bezeichnet wird. Auch im Bereiche des inneren Ringes wollen geübte Beobachter Trennungslinien gesehen haben.

P. S. LAPLACE wies als erster auf die himmelsmechanische Schwierigkeit des Bestandes eines solchen kreisringförmigen Weltkörpers um einen Planeten hin und konnte zeigen, daß die einzelnen Ringe auf keinen Fall ganze, feste Körper sein können. Die geringste und durch die Monde unvermeidbare Störung würde das labile Gleichgewicht solcher rotierender Körper zunichte machen und das ganze System zerstören. Später setzte sich dann auf theoretischem Wege die Erkenntnis durch, daß die Ringe aus kleinsten Körpern bestehen müßten, die als Einzellichtpunkte nicht mehr wahrnehmbar sein können. Diese Ansicht selbst wurde, allerdings ohne theoretische Untermauerung, bereits von CASSINI, dem eifrigsten Saturnbeobachter des 17. Jahrhunderts, geäußert. Von seiten der Beobachtung bestand zunächst keine Aussicht, in der Erkenntnis der Natur der Ringe weiterzukommen. So griffen MAXWELL und HIRN unabhängig voneinander wieder zur Theorie und bewiesen die meteoritische Natur des

Ringsystems: nur dann, wenn sich jeder einzelne Körper frei nach den Gesetzen des Planetenumlaufs bewegt, wie sie etwa KEPLER formuliert hat, kann eine solche Kreisringscheibe himmelsmechanisch stabil sein, wenigstens für eine an irdischen Verhältnissen gemessen lange Zeit. H. v. SEELIGER bestätigte diese theoretische Erkenntnis schließlich auf photometrischem Wege, indem er nachwies, daß die Helligkeit eines Ringgebildes, das aus Einzelkörpern besteht, die sich zum Teil gegenseitig bedecken und durch Schattenwurf abdunkeln, in ganz bestimmter Weise vom Phasenwinkel abhängt und sich dabei wesentlich anders verhält als ein geschlossener fester Körper. Eben gerade eine solche Phasenabhängigkeit zeigt nun die Helligkeit der Saturnringe.

Die Frage nach der Masse der Saturnringe konnte lange Zeit nur unbestimmt beantwortet werden. Wegen der geringen Dicke hielt man sie für so klein, daß eine Anziehungswirkung auf die Monde als praktisch belanglos angenommen wurde. Um die erforderliche Reflexionswirkung mit dieser geringen Masse zu erzielen, mußte man annehmen, daß die Ringpartikel sehr klein seien, von der Größe feinster Sandkörner bis zu mikroskopischen Stäubchen.

Die Richtigkeit der Auffassung von der meteoritischen Natur der Saturnringe konnte KEELER im Jahre 1895 auf spektroskopischem Wege nachweisen. Mit Hilfe der durch den Dopplereffekt auftretenden Linienverschiebungen ergab sich, daß die inneren Teile des Ringes schneller um den Saturn umlaufen als die äußeren, wie es auf Grund der Theorie sein mußte. Schließlich und überraschend gelang es H. BUCERIUS im Jahre 1937, aus den über lange Jahre hinweg sichtbar werdenden Störungen der Saturnmonde, den sogenannten Säkularstörungen, die Masse des störenden Ringsystems zu $M_{Ring} = 2{,}4 \cdot 10^{25}$ g, also etwa $^1/_3$ der Masse unseres Mondes, zu errechnen. Um diese Masse im Volumen des Ringsystems unterzubringen, muß man den Hauptteil in großen Körpern anlegen, die zum Lichteindruck des Ringes einen prozentual geringen Anteil liefern, wogegen ein verschwindend kleiner Bruchteil der Masse, der in den winzigen Stäubchen steckt, den Hauptteil des Helligkeitseindruckes hervorruft.

Zur Sichtbarkeit und zur Lage des Ringes zum Beobachter ist noch einiges zu sagen. Die Ringebene fällt mit der Äquatorebene des Saturn praktisch zusammen und ist folglich etwa 28° gegen die Erdbahnebene geneigt. Sie behält ihre Lage im Raum bei, so daß der Beobachter zweimal während eines Umlaufs des Saturn um die Sonne auf die Kante des Ringsystems blickt, was zur Folge hat, daß in kleineren und mittleren Fernrohren der Ring nicht zu sehen ist. Etwa 7 Jahre davor oder danach zeigt Saturn seine Ringe am weitesten geöffnet, wobei der elliptisch erscheinende Außenrand des Ringes die Planetenkugel noch umschließt.
Bei einem so eigenartigen und einmaligen kosmischen Objekt hat die Frage nach seiner Entstehung einen besonderen Reiz. Sie ist in der Tat auch schon frühzeitig gestellt worden und hat naturgemäß keine einheitliche Beantwortung erfahren. Die Ansicht, wonach das Ringsystem des Saturn bei der Entstehung des Planetensystems sich gebildet haben soll, darf heute als überholt gelten. Da sich bei einer so dichten Raumerfüllung Zusammenstöße der Einzelkörper untereinander nicht vermeiden lassen, kann die Lebensdauer eines solchen Gebildes kaum 10^9 Jahre währen. Es dürfte also erst später entstanden sein und wird nach einer gewissen Zeit — Abschätzungen darüber liegen noch nicht vor — wieder verschwinden. Aus der schematischen Darstellung des Systems der Saturnringe geht hervor, daß die Ringe zum mindesten in wesentlichen Teilen innerhalb jenes kritischen Abstandes liegen, den man die Rochesche Grenze nennt. Ein größerer Körper, der durch Gravitationswirkung anderer Körper in diesen Bereich hineingelangt, bricht auseinander und löst sich in kleinere Körper der verschiedensten Dimensionen auf, die zunächst noch auf der alten Bahn weiter umlaufen, infolge der gegenseitigen Zusammenstöße weiter zerkleinert werden, wobei ein Teil auf den Zentralplaneten stürzt, ein anderer Teil nach außen in den interplanetaren Raum gelangt. Die Hauptmasse läuft auf der elliptischen Bahn um den Planeten, wobei nach den Keplerschen Gesetzen die näher am Zentrum umlaufenden sich mit größerer Geschwindigkeit bewegen und nach einer gewissen Zeit in

der Größenordnung von 100 Jahren die äußeren überholen, so daß sich die Masse längs der ganzen Bahn zerstreut. Gleichzeitig bewirkt aber die Anziehungswirkung des stark abgeplatteten Saturnkörpers eine ungleich schnelle Drehung der großen Achsen der verschiedenen Bahnellipsen, so daß etwa in der gleichen Zeit der ganze kreisringartige Bereich zwischen kleinstem und größtem Abstand rosettenartig überstrichen wird. Nach einem vollen Umlauf der großen Ellipsenachse ist die Masse ziemlich gleichmäßig über die ganze Kreisringfläche verteilt, und die Einzelkörper bewegen sich zufolge der Wirkung der gegenseitigen Zusammenstöße schließlich überwiegend auf konzentrischen Kreisbahnen um den Saturn, weil diese Form der Bewegung ein Minimum gegenseitiger Störungen und damit ein Maximum des Bestandes des Ringsystems gewährleistet.

Uranus. Der Planet Uranus wurde im 18. Jahrhundert einigemal bei Durchmusterungsarbeiten für einen Fixstern gehalten; die Beobachtung ist, da er später nicht mehr an dem gleichen Orte stand, als fehlerhaft gestrichen worden. Er ist dann endlich von W. Herschel im Jahre 1781 entdeckt und als Planet erkannt worden. Wegen seiner großen Entfernung (vgl. Tabelle S. 82, 83 erscheint seine Scheibe günstigenfalls unter einem Winkeldurchmesser von 4,3″, und es sind daher auf seiner Oberfläche keine Einzelheiten sicher zu erkennen. Seine Umdrehungsperiode war infolgedessen bis vor kurzem unbekannt. Mit Hilfe des Dopplereffektes gelang aus der Linienverschiebung die Bestimmung der Rotationsdauer von 10,8 Stunden. Sein Spektrum zeigt im allgemeinen eine sehr große Ähnlichkeit mit dem des Jupiter, so daß wir auch hier einen Planeten vor uns haben, der von einer dichten Atmosphäre umgeben ist, in der Wolken aus Methan vorhanden sind. Diese Wolkenoberfläche hat die zweitgrößte Albedo im Planetensystem, nämlich $A = 0{,}66$; d. h. 66% des auffallenden Lichtes werden wieder zurückgestrahlt. Daher liegt die Temperatur an der Außenseite der Wolkenhülle bei 70 °K oder rund —200 °C.

Die Äquatorebene des Uranus ist gegen seine Bahnebene

um $\varepsilon = 98°$ geneigt, so daß auf diesem Planeten theoretisch der Sterntag um einen geringfügigen Betrag länger ist als der mittlere Sonnentag. Doch spielt in dieser großen Entfernung die Sonne kaum noch eine Rolle. Ihre Strahlung ist im Durchschnitt $^1/_{370}$ der irdischen Intensität, was schon in der niedrigen Temperatur zum Ausdruck kommt. Obwohl die Masse dieses Planeten nur rund $^1/_7$ der des Saturn beträgt, besitzt er eine mittlere Dichte von $\bar{\varrho} = 1{,}56$ g/cm³, also doppelt so groß wie Saturn. Dies ist nur möglich, wenn das mittlere Molekulargewicht seiner Substanz entsprechend größer ist.

Über den inneren Aufbau dieses Planeten ist noch nichts Genaueres bekannt. Es scheint, als besäße er einen festen Kern nach der Art des Erdinnern und darüber eine weitausgedehnte Atmosphäre. Dafür spricht auch seine Abplattung, die etwa so stark ist wie die des Jupiter, obwohl sein Durchmesser nur rund $^1/_3$ des Jupiterdurchmessers beträgt und seine Rotationsdauer auch etwas größer ist als die des größten Planeten. Seine Masse konnte sehr genau aus der Bewegung seiner Monde nach dem 3. Keplerschen Gesetz berechnet werden; sie beträgt $^1/_{21}$ der Jupitermasse.

Wir kennen heute fünf Monde. Vier waren bereits bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts bekannt, der fünfte Mond, Miranda, ist 1948 von Kuiper entdeckt worden. Was über die Monde des Uranus bekannt ist, enthält die Tabelle. Ihre Bahnen liegen in der Ebene des Uranusäquators, es handelt sich also um sogenannte reguläre Monde.

Die Monde des Uranus

Name	a	U_* d h m	R	i	m	e
Miranda	130,1	1 10		0°	17	0,007
Ariel	191,8	2 12 29	300	0°	15,5	0,008
Umbriel	267,3	4 3 27	200	0°	15,8	0,023
Titania	438,7	8 16 56	500	0°	14,0	0,010
Oberon	586,6	13 11 7	400	0°	14,2	

a große Halbachse in 1000 km
U_* siderische Umlaufzeit in Tagen d, *Stunden* h *und Minuten* m
R Radius in km
i Neigung der Bahnebene gegen die Äquatorebene des Planeten
m *mittlere Helligkeit*
e numerische Exzentrizität

Neptun. Der Planet Neptun gehört ebenfalls zur Gruppe der jupiterähnlichen Planeten und gleicht in vielem dem Uranus, aus dessen Abweichen von der berechneten Bahn sein Ort an der Sphäre durch ADAMS und LEVERRIER unabhängig voneinander ermittelt wurde. Neptun ist nur unwesentlich kleiner als Uranus, seine Außenschicht ist, wie sein Spektrum ausweist, auch von einer dichten Wolkenhülle mit Methankondensationen umgeben. Die Albedo hat den drittgrößten Wert im Planetensystem, $A = 0{,}62$, seine Temperatur ist nurmehr 50 °K. Die mittlere Dichte ist mit $\bar{\varrho} = 2{,}27$ g/cm³ noch größer als die des Uranus. Die Abplattung erreicht mit $^1/_{50}$ den kleinsten Wert der Planeten vom Jupitertyp und wird verständlich, wenn man die größere Rotationsdauer und den etwas kleineren Radius gegenüber Uranus in Betracht zieht. Eine Umdrehung um seine Achse dauert 15,7 Stunden, der Neigungswinkel zwischen Äquator und Ekliptik beträgt etwa 29°, trotzdem wird ein jahreszeitlicher Einfluß der Sonnenstrahlung praktisch unmerklich sein, da die Sonne nur noch als strahlender Sternpunkt, mit einem scheinbaren Durchmesser von 1′, allerdings mit rund 500facher Vollmondhelligkeit sichtbar ist.

Die Monde des Neptun

Name	a	U_* d h m	R	M	$\bar{\varrho}$ g/cm³	A	i	m	e
Triton	353,6	5 21 3	2000	$1{,}50 \cdot 10^{26}$	4,4	0,2	20°	13,6	0,00
Nereide	5550	360	150	$5 \cdot 10^{22}$	3,5			19,5	0,75

a *große Halbachse in 1000 km*
U_* *siderische Umlaufzeit in Tagen* d, *Stunden* h *und Minuten* m
R *Radius in km*
M *Masse in g*
$\bar{\varrho}$ *mittlere Dichte in g/cm³*
A *Albedo*
i *Neigung der Bahnebene gegen die Äquatorebene des Planeten*
m *mittlere Helligkeit*
e *numerische Exzentrizität*

Um Neptun bewegen sich zwei Monde. Der größere, *Triton*, übertrifft nach Dimension und Masse den Erdmond, bewegt sich jedoch rückläufig um den Planeten. Er ist kurz nach der Entdeckung des Neptun gefunden worden. Der zweite Mond, *Nereide*, bewegt sich rechtläufig in einer stark elliptischen Bahn (s. Tabelle S. 107), im Durchschnitt fast 16mal so weit entfernt wie Triton, und wurde erst im Jahre 1949 entdeckt.

Pluto. Von dem Planeten Pluto, der gegenwärtig der äußerste der bekannten Großplaneten ist, wissen wir außer über seine Bahnelemente (Tabelle S. 82, 83 und seine scheinbare Helligkeit nichts Sicheres. Sein Durchmesser liegt jedenfalls an der Grenze der mikrometrischen Meßbarkeit, dürfte jedoch etwa so groß sein wie der unserer Erde. Seine Masse ist bisher nur näherungsweise bekannt, da Pluto keinen Mond besitzt, der eine genaue Bestimmung ermöglichen würde. Sie liegt etwas unterhalb des Wertes der Erdmasse, könnte jedoch auch kleiner sein.
Von den Verhältnissen an der Oberfläche des Planeten ist nach Lage der Dinge nichts weiter bekannt, als daß dort die Sonne rund 290mal so hell wie der Vollmond leuchtet und auf Grund ihrer Strahlung sich eine Oberflächentemperatur von etwa —220 °C einstellen dürfte. Seiner visuellen Helligkeit von $+14^{m}{,}7$ entspricht unter den oben angegebenen Größenverhältnissen eine Albedo von etwa 0,16, wie sie ungefähr der Planet Mars besitzt. Man könnte also auf das Vorhandensein einer dünnen Atmosphäre schließen. Doch dürfte bei den dort herrschenden niedrigen Temperaturen neben dem Stickstoff auch der Wasserstoff eine beachtliche Rolle in der Gashülle spielen.
Der räumlichen Lage seiner Bahn nach weicht Pluto merklich von der allgemeinen Ordnung im Planetensystem ab. Er besitzt nicht nur die größte Bahnexzentrizität, sondern übertrifft auch noch die bisher stärkste Neigung des Merkur um das rund 2,5fache. In seinem geringsten Sonnenabstand ist seine Entfernung von der Sonne geringer als der kleinste Sonnenabstand des Neptun. Eine Möglichkeit einer nahen

Begegnung besteht aber deswegen durchaus nicht. Zufolge der starken Bahnneigung steht Pluto zur Zeit seines Periheldurchganges nämlich rund 900 Millionen km unterhalb der Ekliptikalebene und ist daher etwas weniger, aber immer noch rund 750 Millionen km von der Bahn des Neptun entfernt.

Die Kometen

Diese Himmelskörper bilden sowohl physisch als auch ihrer räumlichen Anordnung nach ein großes Untersystem in der Einflußsphäre der Sonne, dessen kosmogonischer Zusammenhang mit dem bisher betrachteten Planetensystem noch keineswegs geklärt ist. Der Name *Komet* leitet sich von dem Worte *coma*, d. h. Haarschopf, ab und nimmt Bezug auf das Aussehen der helleren Erscheinungen, die neben einem sternartigen *Kern* eine perückenartige Lichthülle, eben die *Koma* zeigen, die schließlich in die mehr oder weniger weit reichenden und bisweilen verschiedenartig gekrümmten Strahlen, den sogenannten *Schweif* übergehen, wobei das ganze leuchtende Phänomen vielfach sogar innerhalb weniger Stunden, auf jeden Fall aber innerhalb einiger Tage merkliche Veränderungen der Intensität seiner Strahlung und der geometrischen Konfiguration zeigt.

Das allgemeine, zirkumsolare und das zentrale, planetarische Kometensystem. Der räumlichen Anordnung nach hat man zwei größere Bereiche zu unterscheiden: *das allgemeine, zirkumsolare Kometensystem*, das den etwa kugelförmigen Raum um unsere Sonne als Zentrum bis zum Abstand von rund 100000 AE, entsprechend $^1/_2$ pc (Parsek) oder reichlich 1,5 Lj (Lichtjahre), wahrscheinlich ziemlich gleichmäßig erfüllt, und zum anderen das *zentrale planetarische Kometensystem*, das bei einer äußeren Grenze von 1000 AE nur etwa den millionsten Teil des allgemeinen Kometensystems ausmacht. Das übergeordnete allgemeine System umfaßt schätzungsweise 100 Milliarden Kometenkerne, die sich in elliptischen Bahnen mit allen möglichen

Halbachsen zwischen 500 AE und 100 000 AE bewegen und dabei keinen bestimmten Neigungswinkel bevorzugen, sich also regellos über den ganzen zur Verfügung stehenden Raum verteilen. Die genannte Anzahl der Kometen gibt nur die Größenordnung an, sie kann möglicherweise noch um ein bis zwei Zehnerpotenzen falsch sein und ist erschlossen aus den beobachteten Kometenzahlen.

Im Zeitraum von 466 v. u. Z. bis 1952 wurden 763 Kometen so genau beobachtet, daß eine brauchbare Bahnbestimmung durchgeführt werden konnte. Sucht man aus diesen die genauesten Bahnen heraus, so hat man 525, also eine Zahl, mit der man schon vorsichtig statistische Untersuchungen durchführen kann. Die entscheidenden Daten, die über Herkunft und kosmische Stellung der Kometen Auskunft geben, sind die Größe (a) und die Form (e) der Bahn. Auf Grund der unvermeidbaren Beobachtungsfehler ist besonders bei Bahnen, die weit über den Raum der neun großen Planeten hinausgreifen, die genaue Form vielfach nicht mit Sicherheit ergründbar. So kann es kommen, daß eine langgestreckte Ellipse als Parabel oder gar Hyperbel erscheint. Die beiden letztgenannten Bahnformen weisen — soviel kann man jedenfalls mit Gewißheit feststellen — in oder eigentlich über den Bereich des allgemeinen zirkumsolaren Kometensystems hinaus. Von den genannten 525 gesicherten Kometenbahnen sind 52 hyperbolisch, 274 parabolisch und 199 elliptisch. Es überwiegen also die Mitglieder aus großen Raumestiefen, obwohl die Wahrscheinlichkeit, aus diesem Raume in so geringen Sonnenabstand zu gelangen, daß der Komet auf der Erde sichtbar werden kann, unvorstellbar gering ist. So folgt schon aus dieser einfachen Überlegung, daß die wirkliche Anzahl der Kometen sehr groß sein muß oder, wie es bereits Kepler formuliert hat, *so zahlreich wie die Fische des Weltmeeres.*

In dieses große System kometarischer Körper ist ein wesentlich kleineres eingebettet, das zentrale, planetarische Kometensystem. Die Umlaufzeiten der in Sonnennähe gelangenden Objekte, deren große Halbachse 500 AE mißt, liegen bei 1 100 Jahren; man kann sie leicht errechnen nach der im

Zentimeter–Gramm–Sekunden-System geschriebenen Formel: $U = 5{,}45 \cdot 10^{-13} \cdot a^{3/2}$ [s], die für unser Sonnensystem gültig ist und die Beziehung zwischen der Umlaufzeit (U) und der großen Halbachse (a) ausdrückt. Es steht heute noch nicht fest, ob dieses kometarische Untersystem auch physisch ein selbständiges Gebilde darstellt oder ob es nur aus den zufällig vorliegenden Beobachtungen folgt, deren Anzahl noch zu gering ist, um Mitglieder aus größeren Raumestiefen in genügender Menge zu enthalten.

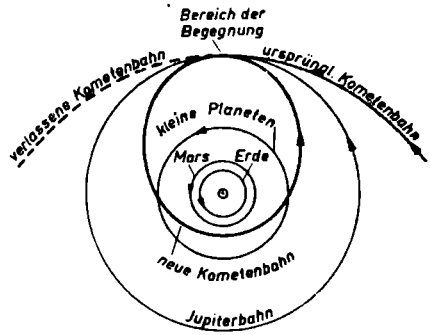
Während in früheren Jahrhunderten nur die mit bloßem Auge erreichbaren, vielfach sogar nur die auffälligsten, hellsten Objekte bemerkt und mit der erforderlichen Genauigkeit beobachtet wurden, werden seit etwa zwei Jahrhunderten in steigendem Maße mit Hilfe lichtstarker Optiken und photographischer Geräte auch lichtschwächere Kometen erfaßt, so daß die Anzahl der beobachteten Erscheinungen stark angestiegen ist. Vom 1. bis 18. Jahrhundert wurden im Verlaufe von 100 Jahren im Durchschnitt 25 Kometen registriert, darunter selbstverständlich viele kurzperiodische mehrmals. Im 19. Jahrhundert stieg diese Anzahl durch Verwendung lichtstarker Fernrohre und durch systematische Jagd auf Kometen auf 80. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen mit *Kometensuchern*, einem kurzbrennweitigen Fernrohrtyp mit großem Gesichtsfeld und ausreichender Lichtstärke, sowie mit geeigneten photographischen Überwachungsinstrumenten läßt sich die Anzahl der Entdeckungen für das 20. Jahrhundert auf 400 abschätzen; sie ist aber weiter im Ansteigen begriffen. Die Anzahl der statistisch verwertbaren Kometen wird also mit der Zeit beträchtlich anwachsen und verspricht in einigen Jahrzehnten neue Erkenntnisse über die räumlichen Verhältnisse dieser Gruppe von Himmelskörpern in unserem Sonnensystem.

Das zentrale Kometensystem unterteilt man nochmals in den Bereich der langperiodischen und den der kurzperiodischen Kometen. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen liegt bei etwa 35 AE, fällt also nahezu mit der mittleren Entfernung des Planeten Pluto zusammen. Die Raumerfüllung ist im zirkumsolaren Kometensystem am geringsten, sie

wird größer im Bereich der langperiodischen Kometen des zentralen Systems und steigt noch weiter im Raum der kurzperiodischen Kometen. Die Gruppe der langperiodischen Kometen bildet auch bewegungsmäßig einen Übergang zum zirkumsolaren Kometensystem, insofern zwar noch große Bahnneigungen vorkommen, jedoch bereits eine Bevorzugung geringerer Neigungen gegen die Ekliptik in Erscheinung tritt. Die kurzperiodischen Kometen zeigen schließlich Bahnlagen, wie sie auch bei den Kleinen Planeten auftreten.

Bahnstörungen. Kometen, die in die inneren Bezirke des Planetensystems eintauchen, erleiden oft Störungen durch die großen Planeten. Hier ist es im besonderen Jupiter als zweitgrößte Masse, der Einfluß auf die Bewegung der Eindringlinge nimmt. In Zusammenarbeit mit der Sonne gelingt ihm in besonderen Fällen der „Einfang" des ehemals zirkumsolaren Kometen. Unter *Einfang* versteht man hier die Einreihung des Besuchers in den Mitgliederbestand des inneren Planetensystems, die wesentlich an die eine Bedingung geknüpft ist, dem Kometen mechanische Energie zu entziehen. Gelingt das, dann kann dieser Körper sich nicht mehr gegen das Gravitationspotential der Sonne in den Raum erheben. Die entzogene Energie behält Jupiter für sich, was aber bei der relativ geringen Energie des Kometen, bedingt durch die kosmisch betrachtet äußerst kleine Masse, und bei dem ohnedies gigantischen Energiebesitz des größten Planeten nicht auffällt, d. h. praktisch zu keiner merkbaren Änderung seiner Bahn führt. Die Bahn des Kometen dagegen erleidet eine erhebliche Änderung: in unserem Falle vor allem eine Verkleinerung der großen Halbachse, meist eine Vergrößerung der Exzentrizität und eine Ablenkung des Geschwindigkeitsvektors. Diese Ablenkung kann besonders dann sehr groß sein, wenn sich der Komet durch die *Einflußsphäre* des Planeten hindurchbewegt (Abb. S. 113). Unsere Abbildung zeigt einen besonders eindrucksvollen Fall einer Kometenbahnänderung. Der ursprünglich in einer Ellipse mit der großen Halbachse $a = 9{,}0$ AE in etwa 27 Jahren

Änderung einer Kometenbahn durch Jupiter



umlaufende Komet war wegen seiner großen Sonnenentfernung (Perihelabstand = 5,44 AE) zu lichtschwach und daher unbekannt. Um die Mitte des Jahres 1886 fand eine sehr nahe Begegnung mit Jupiter statt. Der Komet gelangte nicht nur in die Wirkungssphäre des Planeten, sondern durchzog das System der Satelliten sogar innerhalb der Bahn des innersten Mondes, wobei seine Bewegung unter erheblichem Energieverlust eine völlig neue Richtung bekam. Aus der Tatsache, daß der Vorübergang dieses Kometen keine merkbare Störung der Mondbahnen verursacht hat, konnte eine obere Grenze für seine Masse errechnet werden. Der Körper bewegte sich nunmehr innerhalb der Jupiterbahn. Hierbei ist der Umstand, daß das Perihel der ursprünglichen Bahn nahe mit dem Aphel der veränderten Bahn zusammenfällt, nicht typisch, sondern rein zufällig aus den speziellen Anfangswerten der Bewegung hervorgegangen. Auf der neuen Bahn, deren Halbachse $a = 3{,}59$ AE war, dauerte ein Umlauf um die Sonne nur noch 6,8 Jahre. Etwa drei Jahre später also, d. h. im Jahre 1889, kam der bis dahin unbekannte Komet in so große Erd- und Sonnennähe, daß er aufgefunden wurde. Bei der Berechnung seiner Bahn wurde bemerkt, daß sie der Jupiterbahn sehr nahekommt. Man rechnete nun seine Bewegung rückwärts, entdeckte die eben beschriebene Begegnung mit Jupiter und konnte sogar die ursprüngliche Bahn ermitteln, die nie beobachtet worden ist. Weiterhin ergab die Vorausberechnung, daß nach drei Jupiterumläufen oder 34,58 Jahren bzw. fünf Kometenumläufen oder 34 Jahren wieder eine, wenn auch längst nicht so nahe Begegnung zwischen beiden Körpern stattfinden

müßte. Die Wirkung dieses Ereignisses war erheblich geringer, insofern sich die große Halbachse nach 1921 auf $a = 3{,}64$ AE und damit die Umlaufzeit auf $U = 6{,}95$ Jahre vergrößerten, wogegen die Exzentrizität von ursprünglich

Verzeichnis einiger kurzperiodischer Kometen

Nr.	Name	T	Ω	ω	e	a	i	U_*
1	Encke	1937 Dez. 27,2	334,7°	184,9°	0,846	2,2	12,5°	3,3
2	Tempel 2	1946 Juli 2,3	119,4°	190,9°	0,54	3,05	12,4°	5,3
3	Tempel 1	1879 Mai 7,6	78,8°	159,5°	0,463	3,30	9,8°	6,0
4	Kopff	1945 Aug. 11,3	253,0°	31,5°	0,556	3,40	7,2°	6,2
5	Biela	1852 Sept. 24,2	245,9°	223,3°	0,756	3,55	12,6°	6,6
6	Holmes	1906 März 14,6	331,7°	14,3°	0,42	3,6	20,8°	6,9
7	Brooks 2	1946 Aug. 25,8	177,7°	195,5°	0,484	3,65	5,5°	7,0
8	Whipple	1941 Jan. 13,3	188,8°	190,2°	0,349	3,85	10,2°	7,5
9	Wolf 1	1942 Juni 7,6	204,3°	161,0°	0,405	4,1	27,3°	8,3
10	Gale	1938 Juni 18,5	67,3°	209,1°	0,761	4,95	11,7°	11,0
11	Neujmin	1931 Mai 7,4	347,3°	346,7°	0,775	6,75	15,2°	17,7
12	Westphal	1913 Nov. 26,8	346,8°	57,1°	0,92	15,65	40,9°	61,7
13	Pons-Brooks	1884 Jan. 26,2	254,1°	199,2°	0,955	17,25	74,0°	71,6
14	Olbers	1884 Okt. 9,0	84,5°	65,3°	0,931	17,4	44,6°	72,7
15	Halley	1910 April 20,2	57,3°	111,7°	0,97	17,95	162,2°	76,0

T Durchgang durchs Perihel
Ω Länge des aufsteigenden Knotens
ω Abstand des Perihels vom Knoten
e numerische Exzentrizität
a große Halbachse in AE
i Neigung der Bahnebene
U^* siderische Umlaufzeit in Jahren

$e = 0{,}395$ sich zuerst auf $e = 0{,}456$ und schließlich noch weiter auf $e = 0{,}489$ vergrößerte.
Kometen dieser Art gibt es etwa 29. Sie haben alle ihren sonnenfernsten Bahnpunkt in der Nähe der Jupiterbahn und sind offenbar durch Störungen des Jupiter in diese Lage gebracht worden. Man spricht hier deshalb von einer *Jupiterfamilie* der Kometen. Nicht ganz so deutlich erkennbar sind weitere Kometenfamilien der übrigen Riesenplaneten; im mittleren Abstand des Saturn haben 7 Kometen ihr Aphel, beim Uranus sind es nur 3 und beim Neptun wieder 9. Die übrigen 29 kurzperiodischen Kometen führen ein mehr oder weniger selbständiges Dasein, doch so, daß sie laufend den verschiedensten Störungen seitens der großen Planeten unterliegen.

Physik der Kometen. Ein Komet wird im allgemeinen erst dann entdeckt, wenn er bereits eine beachtliche Größe erreicht hat. Nur bei den periodischen Kometen, deren Bahnen bekannt sind, kann das Auftauchen des sternartigen Kernes aus den Tiefen des Raumes beobachtet werden, weil man seinen Ort an der Sphäre jederzeit vorausberechnen kann. Er befindet sich dann noch in großer Entfernung von der Sonne. Je näher der Kometenkern zur Sonne gelangt, desto intensiver wird die auf ihn fallende Strahlungsmenge, desto größer und verwaschener wird sein leuchtendes Scheibchen. Die *Koma*, die als Lichthülle den immer noch helleren Kern umgibt, entwickelt sich weiter, bis in einem Abstand zwischen 2 und 1,5 AE nach der von der Sonne abgewandten Seite hin ein Schweifansatz sich zeigt. Mit weiterer Annäherung nehmen die Länge und die Breite des Schweifes zu, er wird strahlen-, bisweilen sogar fächerförmig und gibt dem Kometen das eigentümliche Aussehen. In einigen seltenen Fällen bilden sich zur Zeit der höchsten Entfaltung, die mit dem geringsten Sonnenabstand zusammenfällt, auch eine oder mehrere in Richtung auf die Sonne hinzeigende strahlenähnliche Ausströmungen, die sogenannten *anomalen* oder *Gegenschweife*. Danach nimmt der Abstand von der Sonne wieder zu, und die Leuchtgestalt des Kometen durch-

läuft in umgekehrter Folge ähnliche Entwicklungsphasen wie bei der Annäherung an die Sonne.
Die Kometenkerne, d. h. die eigentlichen Träger der eben beschriebenen Erscheinungen, sind verhältnismäßig kleine Himmelskörper, die sich von den Kleinen Planeten aber wesentlich durch ihre stoffliche Zusammensetzung unterscheiden. Planetoiden bestehen aus Gesteinen und Metallen, die zum Teil bruchstückartig, aber in jedem Falle arm an flüchtigen Stoffen und eingeschlossenen Gasen sind. Im Gegensatz hierzu enthalten die Kometenkerne einen hohen Prozentsatz von solchen Stoffen, die bereits bei niedrigen Temperaturen lebhaft in das Vakuum des interplanetaren Raumes verdampfen, wofern nur die Verdampfungsenergie durch die Wellen- und Korpuskelstrahlung der Sonne geliefert wird. F. L. Whipple betrachtet die Kometenkerne als Zusammenballungen von meteoritischen Partikeln verschiedenster Größen vom feinsten Staubkorn bis zu vielleicht faustgroßen Körpern, die alle in einer gefrorenen Masse eingeschlossen sind, die aus einer Reihe von Molekülarten besteht. Mengenmäßig verteilt sich die Masse des Kerns zu etwa 10% auf die meteoritische Materie und zu 90% auf die flüchtigen Bestandteile, die sich aus Eis der sogenannten Muttermoleküle Wasser, H_2O, Kohlendioxyd, CO_2, Ammoniak, NH_3, Methan, CH_4, Stickstoff, N_2, Dizyan, C_2N_2, u. a. zusammensetzen. Dieser Körper — wir können ihn uns etwa kugelförmig, also wie einen riesigen kosmischen Schneeball vorstellen — ist der Träger der Erscheinungen, die uns ein Komet zeigt. Er bewegt sich unter dem Einfluß der Sonnengravitationskraft und eventuell der Störkräfte der großen Planeten auf seiner Bahn um die Sonne, die ihn als Ellipse bald in große Sonnenferne, bald in Sonnennähe führt. Während eines Umlaufs ändert sich also fortlaufend die Intensität der einfallenden wellen- und korpuskelartigen Sonnenstrahlung zwischen einem Höchstwert und einem Kleinstwert. Dieser Wechsel der Energieaufnahme ist die Ursache für den Ablauf der verschiedenen Phasen der Kometenerscheinungen.
Durch die Zunahme der einfallenden Strahlungsenergie

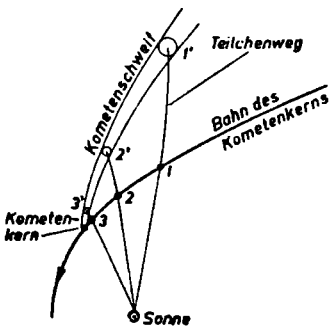
wird ein Teil der äußeren Schichten des flüchtigen Materials zum Verdampfen gebracht. Dieser auf der Sonnenseite ausgelöste Gasstrom reißt die kleinsten Partikel des meteoritischen Staubes mit und vergrößert somit den sternartigen Kern, der in reflektiertem Sonnenlicht leuchtet und im Spektroskop das Fraunhoferspektrum der Sonne zeigt. Der sich weit in den Raum, zunächst mit Hauptrichtung auf die Sonne zu ausbreitende Gasstrom der Muttermoleküle tritt sofort mit der energiereichen UV-Strahlung der Sonne in Wechselwirkung, wobei durch photochemische Dissoziation, Ionisation und weitere Rekombination außer den abgespaltenen freien Elektronen neue Moleküle gebildet werden, z. B. CH, NH, C_2, CN, CH^+, OH^+, CO^+, N_2^+, CO_2^+. Ein solches Gemisch neutraler und elektrisch geladener Teilchen nennt man ein *Plasma*. Der Kopf des Kometen besteht also aus den festen Körpern des Kernes, aus den zusammenkittenden Eismassen und aus der Plasma-Koma. Deren Gase werden vom Strahlungsdruck der Sonne erfaßt und in entgegengesetzte Richtung in den Raum mit zunehmender Geschwindigkeit gedrängt. Diese Geschwindigkeiten liegen in der Koma in dem Bereich 10 bis 30 km/s. Die so rasch bewegten Ionen und Elektronen erzeugen Magnetfelder entsprechender Stärke, die wiederum auf das Plasma zurückwirken, so daß die eigentümlichen Strukturen und Bewegungsvorgänge der Schweife zustande kommen (vgl. Tafel V).

Die Moleküle der Koma und des Schweifes werden durch die Sonnenstrahlung zum Leuchten angeregt und liefern das bekannte Banden-Spektrum des Kometen in Emission. Anregungen der Moleküle durch Stöße spielen keine merkliche Rolle, weil sie wegen der geringen Dichte der Gase viel zu selten erfolgen. Das Komaspektrum enthält außerdem auch noch ein schwaches Kontinuum mit den Fraunhoferschen Linien in Absorption, das wesentlich von den lichtstreuenden Staubpartikeln der Koma und evtl. auch des Kernes selbst herrührt.

Die durch den Strahlungsdruck der Sonne — früher oft als *Repulsivkraft* bezeichnet — erzeugte Beschleunigung der

Schweifpartikel ist von der Größe dieser Teilchen und von der Art des Stoffes abhängig, aus dem sie bestehen. Auch hier gilt das 2. Newtonsche Gesetz: Beschleunigung = Kraft : Masse. So finden wir als Auswirkung verschieden großer Beschleunigung in einem Kometenschweif Partikel mit verschiedenen Geschwindigkeiten, die in extremen Fällen zwischen 100 und 1000 km/s liegen können.

Aus Staubpartikeln vom Durchmesser 1 μm bestehen im wesentlichen die Gegenschweife, deren Teilchen im Sinne der Hauptausstoßrichtung sich auf die Sonne hin bewegen und überwiegend in reflektiertem Sonnenlichte leuchten. Bei Durchmessern, die kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes sind, gewinnt die zentrifugale Beschleunigung der solaren Strahlung die Oberhand und treibt die Teilchen mit zunehmender Geschwindigkeit — wie beim freien Fall — in ungefähr radialer Richtung in den Raum hinaus. Ähnlich ist das Ergebnis bei der Wechselwirkung zwischen Molekül und Sonnenstrahlung. Die oft mehr oder weniger gekrümmten Schweife hängen von der Größe der Zentrifugalgeschwindigkeit und der Bewegung in der Bahn um die Sonne ab. Der Weg, den ein Teilchen zurücklegt, führt von der Kometenbahn nach außen, wobei der Abstand mit der Zeit dauernd zunimmt. Der meist aus mehreren Strahlen bestehende Schweif stellt in jedem Augenblick die von der Sonne beleuchtete räumliche Anordnung aller bis dahin nach außen gestoßenen Teilchen dar, die von den verschiedensten Stellen der Bahn gekommen sind und in gegeneinander etwas geneigten Richtungen beschleunigt wurden (Abb.). Das etwa in den Bahnpunkten 1, 2, 3 vom Kometenkern abgegebene und von der Sonnenstrahlung nach 1', 2', 3' gedrängte Gas hat sich, einer allgemeinen Eigenart des Gases zufolge, ausgedehnt und



Schematische Darstellung der Entstehung eines Kometenschweifes

wird mit der Zeit immer weiter expandieren. Hieraus folgt offenbar, daß die sichtbare Länge eines Schweifes abhängig ist von der Zeit, die das ausgestoßene Gas braucht, bis es sich so weit von der Sonne entfernt und dabei auch so stark ausgedehnt hat, daß sein Leuchten nicht mehr vom schwach erhellten Nachthimmel unterschieden werden kann, und weiter von der Geschwindigkeit, mit der sich der Kometenkern (die Gasquelle) in seiner Bahn um die Sonne bewegt. Das Unsichtbarwerden der expandierenden Gase definiert das „Ende" des sichtbaren Schweifes und wandert in Richtung auf den Kopf mit einer gewissen Geschwindigkeit. Solange diese kleiner ist als die Bahngeschwindigkeit des Kernes, wächst die Schweiflänge, die in Einzelfällen bis über 100 Millionen km erreicht hat. Im umgekehrten Falle nimmt die Längserstreckung des Schweifes wieder ab, bis er gänzlich verschwindet.

Bei jedem Umlauf um die Sonne nimmt die Masse des Kometenkerns etwas ab, weil die Masse des meteoritischen Staubes und der ausgestoßenen Gase in den interplanetaren Raum entweicht, teils auf die Sonne zu fällt, größtenteils jedoch nach außen zerstreut wird. Bei einer mittleren Masse für einen Durchschnittskometen von $M = 10^{18}$ g ist der bei jeder Sonnennähe eintretende Massenverlust recht beachtlich; er kann Milliarden Tonnen betragen. Den Hauptteil dieses Massenverlustes macht naturgemäß das leichtflüchtige Material aus, das der wesentliche und überwiegende Teil des Kometenkernes ist. Das Eis wird also am schwersten betroffen, so daß mit Berücksichtigung der individuellen Umstände (Periheldistanz, Zusammenhalt der einzelnen Kernbestandteile usw.) nach einer mehr oder weniger großen Anzahl von Umläufen die größer als staubförmigen meteoritischen Körper, ihres Eismassen-Kittes und damit ihres Zusammenhaltes beraubt, übrigbleiben und nun von der sogenannten „scherenden Wirkung der Gravitation" längs ihrer Bahn auseinandergezogen werden. Der Vorgang dieser Auflösung besteht einfach darin, daß die der Sonne näheren Teilchen nach dem 3. Gesetz der Planetenbewegung, das Kepler im Jahre 1619 veröffentlicht hat, sich

schneller um die Sonne bewegen, weil nun die Anziehung des Kernes sie nicht mehr daran zu hindern vermag. Je nach der Größe des Geschwindigkeitsüberschusses der inneren Partikel gegenüber den äußeren kann es Jahrhunderte bis Jahrtausende dauern, bis die Spitze der inneren Vorläufer die letzten der äußeren Nachzügler eingeholt hat. Es entsteht auf diese Weise ein sich mit der Zeit immer mehr auch senkrecht zur Bahn nach allen Seiten ausbreitender Ring meteoritischer Körper, die sich um die Sonne in der ehemaligen Kometenbahn bewegen und nach Erlöschen des Kometen im Lichte der Sonne nicht mehr sichtbar sind.

Meteore und Meteorite

Bewegt sich die Erde auf ihrer Jahresbahn um die Sonne zufällig durch einen solchen Ring, so leuchten die dabei in die irdische Hochatmosphäre eindringenden Meteoriten je nach ihrer Größe als gewöhnliche Sternschnuppen oder als strahlende, oft flackernde Feuerkugeln auf.

Meteorströme. Man bezeichnet deshalb diese Ringe meteoritischer Körper als *kometarische Meteoritenströme* und entsprechend die zu den bestimmten Zeiten im Jahre am nächtlichen Himmel sichtbaren besonders zahlreichen Sternschnuppen als *kometarische Meteorschwärme.*
Die meisten haben sich offenbar in prähistorischer Zeit oder noch viel früher gebildet. Im Falle des Kometen Biela konnte die Entstehung des Novemberschwarmes der Andromediden (bzw. Bieliden) in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts direkt beobachtet werden. Der Komet zeigte bei seiner Wiederkehr im Jahre 1846 zwei Kerne, die sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 12,5 m/s voneinander entfernten, was auf einen radialen Abstandsunterschied von rund 67000 km deutete. Bei der nächsten Sonnennähe (1852) hatten sich die beiden Teilkometen auf etwa 2,5 Millionen km in der Bahn entfernt. Der übrige Prozeß der Auflösung war natürlich nicht zu beobachten. Danach wurde der Komet nie mehr gesehen. Statt dessen trat nach drei Umläufen am

27. November 1872 ein ungewöhnlich lebhafter Sternschnuppenfall ein und in abklingender Folge auch in den Jahren 1885 und 1892. Der Meteorschwarm war noch relativ eng begrenzt, so daß nicht alle Jahre, sondern nur in den Abständen der Umlaufzeit Meteore erschienen. Durch Störungen des Jupiter (der Komet gehörte zur Jupiterfamilie) wurde dann die Bahn der Hauptmasse verlagert, so daß höchstens vereinzelt Meteoriten dieses Stromes noch gelegentlich im November zu sehen sind (vgl. Tabelle).

Die bekanntesten stabilen Meteorströme
(nach C. Hoffmeister)

Strombezeichnung	Radiant		Maximum	Anzahl je Std.	Bemerkungen
	α	δ			
Quadrantiden	227°	+46°	Jan. 3	140	—
Lyriden	273°	+35°	April 22	40	Komet 1861 I
Mai-Aquariden	338°	— 1°	Mai 5	120	Komet Halley
August-Aquariden	343°	—17°	Aug. 3	40	ekliptikal
Perseiden	43°	+56°	Aug. 11	300	Komet 1862 III
Orioniden	94°	+16°	Okt. 19	50	Komet Halley
Geminiden	113°	+30°	Dez. 12	50	ekliptikal

Vier dieser 7 Ströme können eindeutig Kometen zugeordnet werden, ein Zeichen dafür, daß die Auflösung und Zerstreuung des Materials schon vor sich geht, wenn der Komet selbst noch eine beachtliche Erscheinung ist. Für die Quadrantiden ist der erzeugende Komet nicht bekannt, und zwei Ströme werden als *ekliptikal* bezeichnet, da ihre Bahnen nur wenig gegen die Ekliptik geneigt sind. Als *Radiant* oder Ausstrahlungspunkt (in der Tabelle durch die Rektaszension α und die Deklination δ angegeben) bezeichnet man denjenigen Punkt an der Sternsphäre, in dessen unmittelbarer Nähe die nach rückwärts verlängerten Bahnspuren der Mitglieder dieses Stromes sich schneiden. Das Vorhandensein eines Radianten beweist, daß die Bahnen der Strommeteoriten im Raume nahezu parallel verlaufen. Der Radiant ist also ein perspektivisches Phänomen.

Außer den kometarischen Meteoriten gibt es noch andere meteoritische Körper, die sich im interplanetarischen Raume

bewegen. Man bezeichnet sie mit einem Sammelbegriff als *sporadische Meteore* wegen ihres unberechenbaren Auftretens, das an keine bestimmte Zeit und Himmelsgegend gebunden zu sein scheint. In Wirklichkeit hat natürlich jeder Meteorit, wie klein er auch sei, eine bestimmte Bahn um die Sonne, gewöhnlich eine elliptische. Um sie zu bestimmen, müssen in der kurzen, meist unterhalb einer Sekunde liegenden Dauer des Aufleuchtens die Bewegungsrichtung und die Größe der Geschwindigkeit des Meteoriten durch Beobachtung ermittelt werden.

Tagesströme. Bei den hohen Eindringgeschwindigkeiten werden die Moleküle in der Hochatmosphäre nicht nur durch Zusammenstoß mit dem Meteoriten zum Leuchten angeregt, sondern gleichzeitig zu einem hohen Prozentsatz *ionisiert*; außerdem verdampft infolge des Aufpralls der Luftmoleküle der Meteorit an seiner Stirnseite; die dadurch frei werdenden, ebenfalls zum Teil ionisierten Atome ergeben vermischt mit den atmosphärischen Gasen einen Ionisationskanal, der je nach der Höhe längere oder kürzere Zeit braucht, bis er sich in der Ionosphäre zerstreut hat. Das um und hinter dem eindringenden Meteoriten befindliche ionisierte Gas ist wiederum ein *Plasma*. Trifft ein Radarimpuls auf das Plasma des Einschußkanals, so wird ein Teil seiner Energie zur Bodenstation reflektiert. Unabhängig von der Tageszeit und der Bewölkung lassen sich auf diese Weise Meteoriten beobachten. Meteorströme, die nur während der Tagesstunden tätig sind, können mit visuellen und photographischen Methoden nicht erfaßt werden, wohl aber von den Radargeräten. Man nennt einen solchen Meteorschwarm *Tagesstrom*.

Helligkeit. Ihrer absoluten Helligkeit nach teilt man die Meteorerscheinungen in bestimmte Typen ein (s. Tabelle S. 123). Die Helligkeit eines Meteors drückt man in den üblichen Sterngrößen aus. Man gibt einem Meteor z. B. die Helligkeit $+ 2^m$, wenn ein Stern 2. Größe, der sich mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie das Meteor bewegt, denselben Lichteindruck hervorruft. Als absolute Helligkeit be-

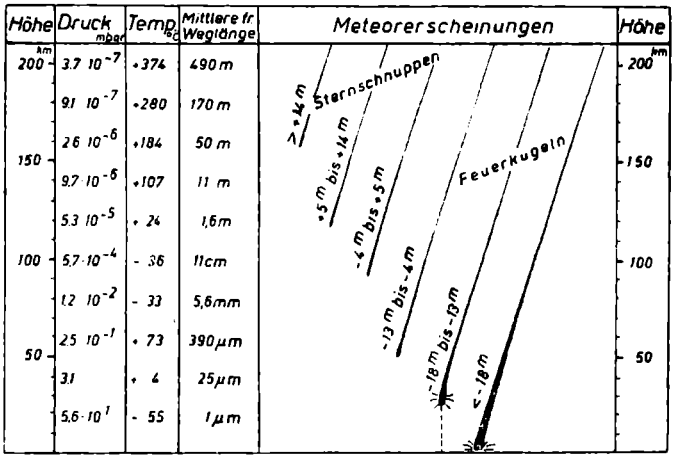
zeichnet man diejenige Sterngröße, in der ein Meteor aus 100 km Abstand erscheinen würde.

Die Einteilung der Meteorerscheinungen

Meteorerscheinung	absolute Helligkeit	Bemerkungen
Mikrometeore	schwächer als +14	Staubpartikel, nur im Fernrohr sichtbar
teleskopische Sternschnuppen	+5 bis +14	
frei sichtbare Sternschnuppen	—4 bis +5	mit bloßem Auge beobachtbar
gewöhnliche Feuerkugeln	—13 bis —4	
detonierende Feuerkugeln	—18 bis —13	Meteoritenfälle
verheerende Feuerkugeln	heller als —18	Zerstörungen

Meteorite. Bei im Durchschnitt gleicher Geschwindigkeit wird ein Staubteilchen, das von außen in die Erdatmosphäre hineinschießt, bereits in Höhen über 150 km abgebremst und verdampft (Abb. S. 124). Je größer das Teilchen ist, desto tiefer vermag es einzudringen. Bei etwa faustgroßen Meteoriten wird die größte Lichtentfaltung als Feuerkugel in etwa 40 bis 60 km Höhe erreicht. Noch größere Körper erzeugen einen hörbaren Donner, und die nicht völlig verdampften Reste fallen mit stark verminderter Geschwindigkeit zu Boden. Noch größere Körper von über 1 Tonne Gewicht behalten sogar noch einen mehr oder minder großen Teil ihrer kosmischen Geschwindigkeit und richten beim Aufschlag auf den Erdboden entsprechende Zerstörungen an (vgl. Tafel VI). In Arizona z. B. wurde von einem Riesenmeteoriten eine angenähert kreisförmige Mulde ausgeworfen mit einem Durchmesser von 1,2 km und einer Tiefe von rund 170 m.

E. Öpik hat die Energie berechnet, die zum Auswerfen eines solchen Tales erforderlich ist, und kommt zu dem Ergebnis, daß der Meteorit bei einer Endgeschwindigkeit von $v_e = 20$ km/s mit einer Anfangsmasse von $M_0 = 2 \cdot 10^{12}$ g



Höhenstaffelung der Hauptphasen der Meteorerscheinungen; in Stufen von 20 km Höhe sind der dort herrschende Druck in Millibar, mbar, die Temperatur in °C und die mittlere freie Weglänge eines Gasteilchens angegeben

= 2 Millionen Tonnen in die Erdatmosphäre eingetaucht ist. Der größte Teil dieser Masse wurde in den unteren Schichten der Erdatmosphäre verdampft und dadurch in feinster Verteilung weit zerstreut. Beim Aufschlag des Restkörpers auf die Erdoberfläche wurde dieser infolge des schlagartig ansteigenden Widerstandes deformiert und in Stücke zerrissen, deren größte beim Eindringen in den felsigen Boden zum Teil verdampften und somit zu einer Explosion führten, bei der das zertrümmerte Gestein und die kleineren meteoritischen Stücke herausgeworfen wurden. Bekannte Riesenmeteorite kleinerer Masse, die in historischer Zeit fielen, sind der Tunguska-Meteorit (30. 6. 1908) und der Meteorit vom Sikhote-Alin (12. 2. 1947). Der letztere hatte etwa 70 Tonnen Gewicht.

Die Meteoriten stoßen mit der Erde bzw. ihrer Atmosphäre zusammen. Die Ansicht, daß die Meteoriten durch die An-

ziehungskraft der Erde heruntergezogen würden, ist falsch. Ebenso irrig ist die Behauptung, daß ein großer Teil der Meteoriten die irdische Hochatmosphäre nur streifend durchfliegt und dann wieder ihren Bereich verlassen kann. Es liegt nicht eine einzige gesicherte Beobachtung dafür vor, wenngleich solche Fälle natürlich theoretisch möglich sind. Sehr vorsichtig ist auch die Feststellung aufzunehmen, daß bis zur Erdoberfläche gefallene Meteorite eine enorm tiefe Temperatur besitzen sollen, nämlich die des Weltraumes, die man zu etwa —270 °C oder 3 °K ansetzt. *Der Weltraum besitzt überhaupt keine Temperatur, sondern nur die Körper in ihm.* Ein Meteorit, der mit der Erdatmosphäre zusammenstößt, befand sich vorher dauernd im Strahlungsfelde der Sonne und hat demzufolge eine Temperatur, die je nach seiner Oberflächenbeschaffenheit zwischen —5 und +50 °C liegen dürfte. Lediglich sehr große Körper, die ein schlechtes Wärmeleitvermögen besitzen, können im Inneren auch tiefere Temperaturen haben, vor allem wenn sie in langgestreckten Bahnen aus größerer Aphelentfernung hereinkommen. Ein Körper aus Jupiterentfernung ist etwa 1,5 Jahre unterwegs und ist dabei der Sonnenstrahlung ohne den Schutz einer Atmosphäre ausgesetzt. Die absorbierte Sonnenenergie hat also Zeit, ins Innere einzudringen. Da die Erhitzung und Verdampfung in der Erdatmosphäre nur oberflächlich ist, so daß während dieser kurzen Zeit von höchstens einigen Sekunden das Innere unberührt bleibt, kann in einem derartigen extremen Falle auch einmal die Innentemperatur von etwa —50 °C vorkommen.

Die Beobachtung hat gezeigt, daß die Meteore der Anzahl nach nicht gleichmäßig über die verschiedenen Helligkeitsklassen verteilt sind. Auffallend helle Erscheinungen sind sehr selten. Von den schwächsten hingegen entgehen dem Beobachter sehr viele, so daß auch von ihnen nur wenige zu sehen sind. Am häufigsten sind Meteore der 4. Sterngröße. Nach den umfangreichen Beobachtungen von C. Hoffmeister ergibt sich für die Verteilung der Meteorhäufigkeit gemäß den Sterngrößen die in der Tabelle gegebene Übersicht.

Prozentuale Häufigkeit der mit bloßem Auge sichtbaren Meteore der Helligkeit m (nach C. Hoffmeister)

m	prozentuale Häufigkeit
− 2	0,1
− 1	0,3
0	0,5
+ 1	1,5
+ 2	5,8
+ 3	22,8
+ 4	41,1
+ 5	21,6
+ 6	6,3
	100,0 %

Aus solchen Beobachtungen läßt sich die Gesamtmasse des meteoritischen Materials abschätzen, das im Laufe eines Tages auf die Erde stürzt. Man erhält als Massenzuwachs der Erde je Tag die Menge von 27 Tonnen. Der größte Teil dieser Masse entfällt allerdings auf die am zahlreichsten vertretenen meteoritischen Körper, die als teleskopische Meteore bzw. Mikrometeore (interplanetarische Staubpartikel) bekannt sind. Aus diesem Massenzuwachs kann schließlich ein Wert für die Dichte der meteoritischen Materie im interplanetaren Raume abgeleitet werden, durch den sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne mit einer Geschwindigkeit von im Durchschnitt $v = 30$ km/s bewegt. Man erhält als mittlere Dichte $\bar{\varrho} = 2 \cdot 10^{-23}$ g/cm³, einen Wert, der durch unmittelbare Untersuchung der Mikrometeoriten mit Hilfe künstlicher Satelliten bestätigt worden ist und sich auch sonst mit der mittleren Dichte des interstellaren Mediums im Einklang befindet.

Wie aus der Tabelle über die Einteilung der Meteorerscheinungen hervorgeht, die man auf die Phänomene von Vollmondhelligkeit und mehr extrapolieren kann, entfällt nur ein verschwindend kleiner Bruchteil der täglich mit der Erde zusammenstoßenden Materie auf so große Körper, daß ein beachtliches Stück bis zur Erdoberfläche gelangen kann. Von diesen großen Körpern stürzen nun wieder etwa 70% auf die Wasserflächen der Erde und sind verloren. Von den auf festes Land fallenden rund 30% wird schließlich nur ein kleiner Teil beim Fallen beobachtet und gefunden. Die in die Hand des Menschen gelangenden Meteorite können nach jeder Richtung hin untersucht werden (vgl. Tafel VI). Man hat praktisch alle Grundstoffe in den Meteoriten gefunden und — von feineren Unterschieden abgesehen — drei

Hauptgruppen festgestellt: Steinmeteorite, Stein-Eisenmeteorite und Eisenmeteorite.
Nach den in der Geologie üblichen Methoden hat man auch das Alter der verschiedensten Meteorite bestimmt. Die erhaltenen Resultate liegen zwischen $6 \cdot 10^7$ und $6 \cdot 10^9$ Jahren und stehen auch im Einklang mit dem Alter der Erde und des Sonnensystems sowie mit dem Entwicklungsalter einzelner Sterne und ganzer Sternsysteme.

Zodiakallicht

Mit den Planetoiden, den Kometen und Meteoriten haben wir bereits den Hauptteil der sogenannten interplanetaren Materie kennengelernt. Übrig bleiben nur noch die staub- und gasförmigen Anteile des Zodiakallichtes, die das Licht der Sonne streuen und dadurch als zusätzliche Erhellung des Nachthimmels beobachtbar sind. Die Schwierigkeit der Wahrnehmung und Beobachtung des Zodiakallichtes beruht hauptsächlich darin, daß die Erhellung des nächtlichen Himmelsgrundes aus insgesamt sieben, zeitlich mehr oder weniger veränderlichen Quellen stammt, deren Kenntnis erforderlich ist, wenn man die Erscheinung richtig erfassen will. Das Zodiakallicht dürfte wahrscheinlich das am wenigsten veränderliche Leuchten des Untergrundes der Sphäre sein. Der Anteil des direkten Lichtes derjenigen Sterne, die unterhalb der Schwelle der Wahrnehmbarkeit liegen, besitzt, wie das Phänomen der Milchstraße zeigt, eine deutliche galaktische Konzentration. Das atmosphärische Streulicht besitzt zwei Komponenten; die kosmische (Streulicht der Sterne) und die terrestrische (Streulicht irdischer Lichtquellen) werden zeitlich veränderlich sein. Beim Beobachten wird man danach streben, seinen Standort so zu wählen, daß die terrestrische Komponente möglichst unterhalb der Schwelle liegt. Eine mit der Sonnentätigkeit stark schwankende Erhellung des Himmelsgrundes ist das Polarlicht, worunter hier jedoch nicht jene seltenen und auffälligen Erscheinungen gemeint sind, die man im allgemeinen darunter versteht, sondern ein allgemeines, äußerst schwaches

und sich über den ganzen Himmel hin erstreckendes diffuses Leuchten. Eine mit Fortschreiten der Nacht ebenfalls veränderliche Lichtquelle ist das durch die Tageseinstrahlung der Sonne hervorgerufene Leuchten der Moleküle und Atome der irdischen Hochatmosphäre (durch Rekombination in den *E*- und *F*-Schichten), ferner das durch eindringenden interplanetarischen Staub angeregte schwache Leuchten, dessen hellste und lokal begrenzte Formen als Leuchtstreifen bezeichnet werden. Die letzte Art der Helligkeitsüberlagerung bringt die Dämmerung, deren Abklingen und Anwachsen mit dem täglichen Umlauf der Sonne vor sich geht.

Am günstigsten ist das Zodiakallicht immer dann zu sehen, wenn der Tierkreis möglichst steil zum Horizont steht. In der Tropenzone, wo die Ekliptik während des ganzen Jahres nur wenig von der Vertikalen des Sonnenortes abweicht, findet man nach Ende der hellen Abenddämmerung im Westen und früh vor Beginn der hellen Morgendämmerung am Osthimmel das unter- bzw. aufgehende, mattleuchtende Tierkreislicht, das in groben Umrissen die Gestalt eines Dreiecks besitzt. Schaut man jedoch genauer hin, so erkennt man deutlich, daß die Dreiecksgestalt sich längs der Ekliptik über die „Spitze" hinweg fortsetzt in der sogenannten *Lichtbrücke* und sich im Gegenort der Sonne wieder verbreitert und heller wird, ohne daß dieser *Gegenschein* jedoch die Helligkeit des östlich bzw. westlich von der Sonne gelegenen *Hauptlichtes* erreicht. Nach Osten zu setzt sich der Gegenschein über die zweite Lichtbrücke bis zum westlichen Hauptlicht fort. In unseren Breiten steht der sonnennahe Ast der Ekliptik für nächtliche Beobachtungen nur zweimal im Jahre in steilster Lage zum Horizont, nämlich in den Frühjahrsmonaten abends am Westhimmel und während der Herbstmonate früh am Osthimmel. Zu diesen Zeiten kann das Hauptlicht bei guter Sicht und wolkenfreiem, mondlosem Himmel an einem von störenden irdischen Lichtquellen geschützten Ort ohne Mühe beobachtet werden, wenn man seine Augen an die Nachtdunkelheit vollständig adaptiert hat. Trotz zahlreicher visueller, photographischer und in

neuerer Zeit auch lichtelektrischer Beobachtungen sind noch längst nicht alle Fragen der Größe, Gestalt, Struktur und Herkunft der Zodiakallichtkörper geklärt. Sicher ist, daß sich an der Lichtstreuung neben festen Partikeln auch Elektronen beteiligen. Ebenso unzweifelhaft ist, daß eine deutliche Abplattung in bezug auf die Ekliptik, also eine Zuordnung zur Hauptebene des Planetensystems besteht. Diese Zuordnung zur Bahnebene der massereichsten Planeten deutet darauf hin, daß die Zodiakallichtpartikel dem Gravitationseinfluß der Planeten merklich unterworfen sind.

Ausblick. Das, was wir stolz unser Planetensystem nennen, macht massenmäßig nur etwa 0,00134 der Sonnenmasse aus, das sind 1,34 pro Mille. Die Rotationsenergie der Sonne ist etwa das 2,5fache der Umlaufsenergie der Planeten. Eine weitere, offenbar nicht zufällige Besonderheit des Planetensystems ist die Tatsache, daß — von einem geringen Prozentsatz massenmäßig nicht ins Gewicht fallender Kleinkörper: einigen Kometen und Meteoriten und auch Zodiakallichtpartikeln abgesehen — die Gesamtheit der planetarischen Körper im gleichen Umlaufsinne ihre Bewegung um die Sonne ausführt. Dabei ist ihre Hauptmasse nahezu in einer Ebene angeordnet. Zweifellos finden diese Eigenarten des Planetensystems ihre Erklärung in den bei der Entstehung mitwirkenden Umständen.
Gegen das Fixsternsystem, dem unsere Sonne als Mitglied angehört, ist der Bereich des Planetensystems nicht scharf abgegrenzt. Die Anziehungskräfte einzelner der Sonne benachbarter Sterne wie auch das allgemeine Schwerkraftfeld des gesamten Milchstraßensystems greifen in den Raum des Planetensystems ein, und es dürfte in den äußeren Bezirken ein reger Massenaustausch zwischen beiden Systemen stattfinden. Die Gravitationskraft der Sonne reicht, wie die eines jeden Körpers, über alle ausdenkbaren Grenzen hinaus; jedenfalls liegen bisher keine gegenteiligen endgültigen Erkenntnisse vor. Doch der von der Sonne beherrschte Raum endet praktisch in einer Entfernung von rund 100 000 AE. Um mit dieser Größe eine etwas anschaulichere Vorstellung

zu verbinden, drücken wir sie in *Lichtzeit* aus, d. h. wir geben die Zeit an, die ein von der Sonne ausgehendes Lichtquant braucht, um bis an die Grenze des zirkumsolaren Bereichs des Weltraumes zu gelangen. Die Strecke von der Sonne bis zur Erde (150 Millionen km) legt das Licht in $8^1/_3$ Minuten zurück; bis zu der mit bloßem Auge erreichbaren Grenze des Planetensystems, zum Saturn, braucht der Lichtstrahl 1 Stunde 20 Minuten, bis zum äußersten der heute bekannten planetarischen Körper, dem Pluto, beträgt die Laufzeit bei mittlerer Entfernung rund $5^1/_2$ Stunden. Die Grenze der von der Sonne gegen das Sternsystem behaupteten Wirkungssphäre wird vom Lichtstrahl erst in etwa $1^1/_2$ Jahren erreicht. Wir haben damit gleichzeitig ein neues Streckenmaß eingeführt: das *Lichtjahr*, das natürlich auch in den uns geläufigen Einheiten gemessen werden kann. Es ist 1 Lichtjahr (LJ) $= 9{,}46 \cdot 10^{17}$ cm $= 9{,}46 \cdot 10^{12}$ km.
Was die Anwesenheit planetarischer oder kometarischer Körper in diesem *äußeren Bereich* zwischen 1000 AE und 100000 AE betrifft, so wissen wir darüber nur, daß die Aphele einiger langperiodischer Kometen dorthin weisen. Der unmittelbaren Beobachtung sind planetarische Körper, die ihr Licht von der Sonne empfangen, in diesem Raume nicht zugänglich. Ein völlig weißer, kugelförmiger Körper mit dem Durchmesser D im Abstande r von der Sonne und dem Abstande Δ von der Erde würde bei Vollbeleuchtung als Stern der Größenklasse $m = -91{,}5 + 5 \lg (r \cdot \Delta) - 5 \lg D$ erscheinen, wenn die Strecken in cm ausgedrückt werden. Danach hätte ein so beschaffener planetarischer Körper von den Dimensionen des Jupiter in 1000 AE Entfernung die Helligkeit eines Sternes der Größe $m = +19{,}5$ und würde im Abstand von 100000 AE als Stern der Größenklasse $+39{,}5$ erscheinen. Bei einer Albedo $A < 1$ würde die Helligkeit entsprechend geringer sein. Der noch von der Sonne beherrschte äußere Bereich umfaßt ein Volumen von rund $1{,}4 \cdot 10^{55}$ cm³, in dem sich schätzungsweise eine Gesamtmasse befindet, die der des Planeten Jupiter kaum nachstehen dürfte. Diese Masse besteht aus Körpern der verschiedensten Art und Größe. Der bei weitem größte Teil

mag gasförmig sein: Elektronen, Protonen, aber auch Atome, Ionen, ja vereinzelt auch Moleküle und leichte Kerne bilden dieses Gas, das stellenweise Plasmacharakter trägt. Darin eingebettet finden sich einzelne und zusammengeballte feste Partikel der verschiedensten Größen, etwa 10^{11} Kometenkerne, eine für menschliche Begriffe große Anzahl meteoritischer Körper und eine unübersehbare Menge feinster Staubteilchen. Diese Körper bewegen sich im allgemeinen in elliptischen Bahnen, wobei es gelegentlich zu nahen Begegnungen bzw. zu Zusammenstößen kommen wird, insbesondere auch mit den Teilchen der sogenannten *interstellaren Materie*, ihren gas- und staubförmigen Komponenten, die den Bereich des Planetensystems durchziehen. Die energetische Komponente der interstellaren Materie, zu der man die kosmische Strahlung, das galaktische Strahlungsfeld, die elektrischen und magnetischen Felder u. a. zu rechnen hat, dürften in gleicher Weise mit den planetarischen Massen im äußeren Bereich in Wechselwirkung treten, und es scheinen die dadurch hervorgerufenen Auswirkungen von noch nicht absehbarer Bedeutung zu sein. Durch die somit verstärkten Zusammenstöße untereinander und mit Partikeln der interstellaren Materie kann ein Doppeltes eintreten: der dabei erfolgende Energieaustausch kann zum Planetensystem gehörende Partikel so beschleunigen, daß sie in den interstellaren Raum zu entweichen vermögen, oder ihnen einen so großen Energieverlust beibringen, daß sie in die innersten Bezirke des Systems fallen. Solche *Eindringlinge* kommen naturgemäß in der Nähe der Sonne auf praktisch parabolischen Bahnen an.

Der im Gegensatz zum äußeren Bereich des Planetensystems als innerer oder zentraler Bereich bezeichnete Raum umfaßt nur rund ein Millionstel des bisher betrachteten planetarischen Raumes. Dieser ebenfalls als kugelförmig angenommene zentrale Bereich hat trotzdem noch einen Radius von 1 000 AE, der also den mittleren Abstand des Pluto von der Sonne rund 25mal übertrifft.

In diesem Volumen nimmt das, was wir landläufig als Planetensystem bezeichnen, einen recht bescheidenen Raum

ein. Im Mittelpunkt befindet sich die Sonne. In ihrer näheren Umgebung sind vier erdähnliche Planeten anzutreffen: die Erde selbst, die Venus, der Mars und der Merkur. Man darf sogar unseren Mond zu dieser Art planetarischer Körper rechnen. Darauf folgt bis zur Zone der jupiterähnlichen Großplaneten der Gürtel der Kleinen Planeten oder Planetoiden, von denen bisher über 1600 ihrer Bahnlage nach bekannt sind, deren Gesamtzahl je nach der gewählten unteren Grenzgröße zwischen 50000 und 250000 geschätzt wird. Zählt man die kleinsten der in dieses Untersystem gehörigen Körper von den Dimensionen riesiger Meteorite mit, so dürfte die Gesamtzahl wohl in die Millionen gehen. Die in den inneren Bezirken des Planetensystems umlaufenden Körper solcher Ausmaße, daß sie die Meteorerscheinungen von den hellen Feuerkugeln bis zu den gerade noch sichtbaren gewöhnlichen Sternschnuppen erzeugen, sind wesentlich zahlreicher und dürften insgesamt wohl bei 100 Trillionen ($= 10^{20}$) liegen. Noch größer ist die Zahl der Mikrometeoriten, deren hellste Vertreter in lichtstarken Fernrohren zu sehen sind, deren schwächste jedoch als in die Erdlufthülle eindringende Staubteilchen nur dann eine mit bloßem Auge wahrnehmbare Leuchterscheinung hervorrufen, wenn sie in sehr großer Zahl auftreten. Eine anschauliche Vorstellung, was eine Quintillion ($= 10^{30}$) solcher Stäubchen von einem mittleren Durchmesser einiger Mikrometer (1 Mikrometer $= 1\ \mu m = 10^{-4}$ cm) im inneren Bereich zwischen Sonne und Jupiter bedeuten, ist kaum zu gewinnen.

Das System der *Planetoiden* oder — wie man die kleinsten von ihnen auch nennt — *Asteroiden* erstreckt sich über das Abstandsintervall von 1 bis 5 AE, wobei die überwiegende Mehrzahl im Abstandsbereich 2,1 bis 3,5 AE liegt. Es folgt dann die Zone der vier größten Planeten: Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun bis 30 AE, an die sich anscheinend wieder ein Bereich kleinerer Körper anschließt, von denen bisher erst einer, nämlich Pluto, aufgefunden worden ist. Im Gebiet der Großen Planeten befindet sich noch eine Reihe von Monden, von denen einige sogar den Erdmond übertreffen.

DAS MILCHSTRASSENSYSTEM

Verteilung der Fixsterne an der Sphäre

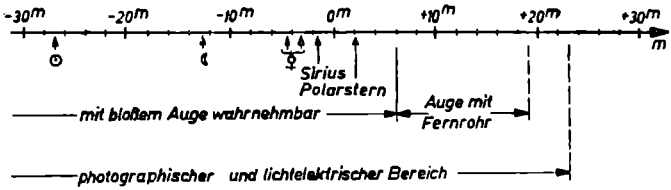
Beim Betrachten des nächtlichen Fixsternhimmels fallen dem Beobachter drei leicht erkennbare Tatsachen auf: Die mit bloßem Auge sichtbaren Sterne sind nicht gleichhell, sondern man kann sie, von den 8 hellsten abgesehen, in 6 Helligkeits- oder Größenklassen einteilen; vergleicht man aber die Sterne verschiedener Größenklassen, so fällt auf, daß ihre Anzahl mit abnehmender Helligkeit stark anwächst; betrachtet man schließlich die Verteilung der Sterne an der Sphäre, so ist klar erkennbar, daß sie nicht überall gleich dicht stehen, vielmehr nimmt ihre Häufigkeit in Richtung auf die Wolken der Milchstraße hin zu. Diese drei Tatsachen sind der Schlüssel zum Verständnis des Aufbaus unseres Milchstraßensystems, und es lohnt sich daher, sie etwas eingehender zu betrachten und dabei auch die teleskopischen und vor allem die photographischen Ergebnisse mit einzubeziehen.

Helligkeit. Die Einteilung der mit unbewaffnetem Auge sichtbaren Sterne in 6 Größenklassen muß schon im frühen Altertum eingeführt worden sein. HIPPARCH (um 130 v. u. Z.) verwendet bereits eine Helligkeitsskala mit einer Unterteilung in Drittel einer Größenklasse. Die Bezifferung der Größenklassen ist so, daß den hellsten Sternen die kleinsten Zahlen zugeordnet werden. Die Helligkeiten selbst wurden von erfahrenen Beobachtern geschätzt. Bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde diese Praxis, deren innere Genauigkeit naturgemäß nicht allzu hoch sein kann, bei der Schaffung aller Sternkataloge angewandt. Mit dem Aufkommen der Astrophysik entstand das Bedürfnis nach genaueren Angaben über die Helligkeit bzw. Strahlungsintensität der Sterne. In diesem Zusammenhang durchgeführte Untersuchungen brachten zunächst das überraschende Ergebnis, daß die subjektive Methode der Schätzung von Sternhelligkeiten bei den verschiedensten Beobachtern zu

nahezu den gleichen Werten geführt hatte. Der Grund für diese Tatsache ist darin zu suchen, daß die subjektiv empfundene Helligkeit m mit dem Lichtreiz, d. h. dem meßbaren Energiefluß S, durch eine Beziehung verbunden ist, die aus dem sogenannten *psychophysischen Gesetz* von WEBER-FECHNER folgt. Diese Beziehung lautet $m = c - 2{,}5 \lg S$. Wenn der Energiefluß in Erg je Quadratzentimeter und Sekunde, erg/cm²s, gemessen wird, ist die Konstante $c = -13{,}6$. Die heutigen Angaben der Sternhelligkeiten sind also exakte Werte, die für die verschiedenen lichtempfindlichen Aufnahmeelemente — z. B. in ausgesuchten Spektralbereichen empfindliche Photoplatten — für eine bestimmte Anzahl von Standardsternen sehr genau gemessen werden. Die beiden hauptsächlichsten Helligkeitsskalen sind die photographische und die visuelle. Die erste wird mit der gewöhnlichen, blauempfindlichen Platte gewonnen, die zweite heute meist mit einer sensibilisierten Platte zusammen mit einem Rotfilter bestimmt, das so ausgewählt wird, daß die resultierende Empfindlichkeitsfunktion mit derjenigen weitgehend übereinstimmt, die aus zahlreichen Versuchen für die Netzhaut des menschlichen Auges abgeleitet wurde. Auf diese Weise sind also auch die visuellen Sternhelligkeiten m_{vis} heute durch die wesentlich genaueren photovisuellen m_{pv} ersetzt. Die Helligkeitsbestimmung eines unbekannten Objektes an der Sternsphäre wird im allgemeinen nicht durch unmittelbaren Anschluß an einen Strahler bekannter Intensität durchgeführt, sondern erfolgt durch relativen Anschluß an Sterne, deren Helligkeit genau bekannt ist. Es wird also in der Praxis meist die Helligkeitsdifferenz $m - m_0 = \Delta m = -2{,}5 \lg S/S_0$ verwendet. Die Tabelle gibt für einige markante Werte der Sterngrößendifferenz Δm das zugeordnete Intensitätsverhältnis S/S_0 der beiden zum Vergleich stehenden Lichtquellen. Aus der Tabelle folgt, daß zwischen den Grenzhelligkeiten von -30^m bis $+30^m$ ein Inten-

Helligkeitsdifferenz und Intensitätsverhältnis

Δm	S/S_0
0,0	1,000
0,5	1,584
1,0	2,512
1,5	3,981
2,0	6,310
2,5	10,000



Übersicht über die Helligkeitsskala der Gestirne in Sterngrößen.

sitätsverhältnis von 24 Zehnerpotenzen liegt (Abb.). So ist z. B. unsere Sonne rund 90 trillionenmal so hell als die schwächsten, gerade noch beobachtbaren Sterne.

Das unbewaffnete Auge kommt etwa bis zur 6. Größe; mit dem Durchmesser des verwendeten Teleskops rückt die Reichweite zu immer schwächeren Sternen. Man spricht von einem Helligkeitsgewinn Δm, den ein bestimmtes Fernrohr bietet. Die Tabelle zeigt, daß bei den größten Teleskopen ein merklicher Helligkeitsgewinn nur erzielt werden kann, wenn deren Ausmaße beträchtlich vergrößert werden. Ein Spiegel mit einem Durchmesser von 6 m bringt gegenüber dem 5-m-Spiegel einen Helligkeitsgewinn von noch nicht einmal einer halben Größenklasse. Für ältere Beobachter ist der Wert außerdem kleiner als für junge in Übereinstimmung mit der Tatsache, daß ältere Menschen die schwächsten Sterne nicht mehr zu sehen vermögen.

Mit einem geringen Helligkeitsgewinn wächst allerdings die Anzahl der sichtbaren Sterne bedeutend; so würde man z. B. mit dem 6-m-Spiegel etwa 25% mehr Sterne sehen als mit dem 5-m-Spiegel.

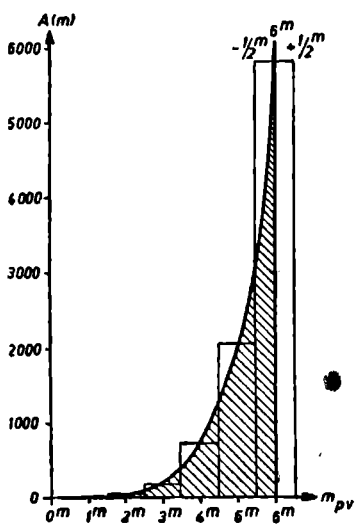
Helligkeitsgewinn Δm durch Fernrohre bekannter Objektivdurchmesser

D_{cm}	Δm	D_{cm}	Δm
	m		m
2,5	2,5	15	6,4
3	2,9	20	7,0
3,5	3,2	30	7,9
4	3,5	50	9,0
5	4,0	80	10,0
6	4,4	100	10,5
7	4,7	200	12,0
8	5,0	250	12,5
9	5,3	500	14,0
10	5,5	600	14,4

Anzahl der Sterne. Derartige Betrachtungen kann man aber nur anstellen, wenn man den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Sterne und der Helligkeit kennt. Die umfangreichen photovisuellen und photographischen Untersuchun-

gen liefern dazu die Grundlage. Es ist bei der großen Zahl der Sterne klar (vgl. Tafel VII), daß man nicht den ganzen Himmel mit der erforderlichen Genauigkeit durchmustern kann, sondern sich auf charakteristische, vorher sorgfältig ausgewählte Felder, die sogenannten *Selected Areas*, beschränken muß. Ein solcher großzügiger Plan wurde von KAPTEYN entworfen und im internationalen Rahmen durchgeführt. Er umfaßt 206 ausgewählte Felder, von denen jedes einzelne im Durchschnitt 1,6□° (Quadratgrad) Himmelsfläche bedeckt, so daß von der gesamten Sphäre etwa 0,8% bearbeitet sind. Es könnte gewagt erscheinen, von einem so kleinen Teil der gesamten Himmelsfläche Werte abzuleiten, die für unser ganzes Milchstraßensystem gültig sein sollen. Doch da bei der Auswahl der Felder jede Bevorzugung irgendwelcher Gebiete der Milchstraße vermieden wurde und die Gesamtzahl der erfaßten Sterne rund 8 Millionen beträgt, steht in dem 1905 von KAPTEYN angeregten Plan der Selected Areas ein für statistische Untersuchungen durchaus geeignetes Beobachtungsmaterial zur Verfügung.

Die Frage nach der Anzahl der Sterne kann in zweifacher Art beantwortet werden. Einmal möchte man wissen, wie viele Sterne einer bestimmten Helligkeitsklasse m beobachtet sind. Antwort auf diese Frage gibt die Funktion A (m), bei der der Helligkeitsbereich m $\pm 1/2$ beträgt. Andererseits interessiert auch die gesamte Anzahl der Sterne, die heller sind als eine vorgegebene Grenzgröße m und die man mit N (m) bezeichnet. In der Abbildung sind die Werte von A (m) für



Verlauf der Sternanzahlen A (m) und die Definition von N (m)

m = 2, 3, 4, 5 und 6 durch Rechtecke dargestellt, während die schraffierte Fläche die Funktion N (m) bis zum Werte m = 6 darstellt.

Einen Überblick über die Sternanzahlen in den einzelnen Helligkeitsbereichen gibt die Tabelle. Die Anzahlen beziehen sich auf die totale Himmelssphäre. Der Anstieg der Sternanzahlen $\alpha = A(m + 1)/A(m)$ vermittelt gleichzeitig eine Vorstellung über den weiteren Verlauf der Kurve der Abbildung. Das Strahlungsvermögen aller Sterne würde im visuell erfaßten Bereich etwa 1230 Sternen der 1. Größe oder einem Stern der Größe —6,72 entsprechen. Auffällig ist nun, daß für die photographisch erfaßten Sterne die entsprechenden Werte kleiner sind. Das gesamte Licht der Sterne würde im photographischen Bereich etwa der Strahlung von 640 Sternen der 1. Größe bzw. einem Stern der Größe —6,00 entsprechen.

Berücksichtigt man die in der Abbildung gegebene Definition von N (m), so erhält man nach der Tabelle die Anzahl der mit bloßem Auge sichtbaren Sterne, wenn man eine bestimmte Grenzgröße vorgibt. Für ein durchschnittlich gutes Auge darf man diese Grenze auf $m_g = 6^m$ ansetzen; für $N_{\parallel}(6)$ erhält man 5875. Als Faustregel folgt daraus, daß oberhalb des Horizontes im Durchschnitt etwas weniger als 3000 Sterne zu sehen sind. Diese relativ geringe Zahl dürfte die meisten überraschen. Noch erstaunlicher erscheint es, daß im Durchschnitt jedem der mit bloßem Auge sichtbaren Sterne eine Himmelsfläche von rund 7□° zur

Die Funktion A (m) und der Anstieg α, aus Sternzählungen abgeleitet

m_{pv}	A (m)	α
— 1	2	3
0	6	2,3
1	14	4,8
2	67	2,9
3	197	3,7
4	734	2,8
5	2067	2,8
6	5830	2,8
7	16400	2,7
8	44200	2,8
9	122000	2,9
10	359000	2,5
11	902000	2,7
12	2430000	2,4
13	5820000	2,4
14	14000000	2,4
15	33500000	2,1
16	71600000	2,0
17	143000000	2,0
18	285000000	1,5
19	431500000	1,7
20	733000000	1,8
21	1303000000	

Verfügung steht. Auf mittleren Abstand umgerechnet erhält man für zwei beliebige Sterne fünf bis sechs Vollmonddurchmesser. Hierbei täuscht natürlich die Größe des scheinbaren Durchmessers von Mond und Sonne, die der Mensch im allgemeinen viel zu groß in Erinnerung hat. Die Konzentration der Sterne zum Milchstraßen- oder galaktischen Äquator hin bewirkt, daß in der Milchstraße selbst der durchschnittliche Abstand zweier Sterne nur rund vier Vollmondbreiten beträgt, am Pol der Milchstraße dafür aber fast acht Monddurchmesser.

Galaktische Konzentration. Für die weiteren Betrachtungen ist es zweckmäßig, die photographischen Sterngrößen zu Rate zu ziehen. Wegen der Größe der Sternanzahlen an der gesamten Himmelssphäre pflegt man mit den auf die Himmelsfläche von 1□° bezogenen Sternanzahlen zu rechnen, die wir zum Unterschied mit $\mathfrak{A}$(m) bezeichnen wollen. Weil die Anzahlen der Sterne bis zur 3. Größe zu gering sind, um statistische Untersuchungen mit ihnen ausführen zu können, beginnt man im allgemeinen erst mit der 4. Größenklasse. Die Tabelle liefert uns die aus Beobachtungen gegebene Übersicht über das photographische Sternmaterial.
Auch hier überrascht die geringe Zahl $N(21)$, die als Summe aller photographisch erfaßbaren Sterne bis zur 21. Größenklasse sogar kleiner ist als die Zahl $A(21)$ der visuell im Bereich $21 \pm {}^1/_2$ sichtbaren. Die galaktische Konzentration der Sterne, die mit abnehmender Helligkeit anwächst, deutet darauf hin, daß unser Sternsystem in bezug auf die Milchstraßenebene stark abgeplattet ist. Auf diese Fragen kann aber erst genauer eingegangen werden, wenn die sphärische Betrachtungsweise verlassen und zur räumlichen Vorstellung übergegangen wird. Die ersten tastenden Vorstöße in den Raum des Milchstraßensystems begannen um die Mitte des 18. Jahrhunderts. Sie waren durch Vergleiche mit anderen Sternansammlungen gestützt, die man für gleichartige Sternsysteme hielt, und beruhten vorwiegend auf geschätzten Werten (Kant, Lambert). Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde mit den Mitteln der damaligen Zeit

Die Sternanzahlen $\mathfrak{A}(m)$ in der Milchstraße ($B=0°$) und am Pol der Milchstraße ($B=90°$), daraus abgeleitet die ***galaktische Konzentration*** *$K = \mathfrak{A}(m, 0°) / \mathfrak{A}(m, 90°)$ sowie die Gesamtzahlen der photographisch erfaßten Sterne an der ganzen Sternsphäre $N(m)$.*

m_{pg}	$\mathfrak{A}(m)$		K	$N(m)$
	$B = 0°$	$B = 90°$		
4	$1{,}6 \cdot 10^{-2}$	$4{,}79 \cdot 10^{-3}$	3,30	$3{,}24 \cdot 10^{3}$
5	$5{,}25 \cdot 10^{-2}$	$1{,}51 \cdot 10^{-2}$	3,47	$9{,}77 \cdot 10^{3}$
6	$1{,}55 \cdot 10^{-1}$	$4{,}36 \cdot 10^{-2}$	3,55	$3{,}02 \cdot 10^{4}$
7	$4{,}26 \cdot 10^{-1}$	$1{,}20 \cdot 10^{-1}$	3,55	$8{,}50 \cdot 10^{4}$
8	1,26	$3{,}16 \cdot 10^{-1}$	3,98	$2{,}34 \cdot 10^{5}$
9	3,80	$8{,}31 \cdot 10^{-1}$	4,57	$6{,}45 \cdot 10^{5}$
10	$1{,}10 \cdot 10^{1}$	1,90	5,75	$1{,}74 \cdot 10^{6}$
11	$3{,}16 \cdot 10^{1}$	4,26	7,41	$4{,}68 \cdot 10^{6}$
12	$8{,}71 \cdot 10^{1}$	9,55	9,12	$1{,}20 \cdot 10^{7}$
13	$2{,}24 \cdot 10^{2}$	$1{,}95 \cdot 10^{1}$	11,48	$3{,}09 \cdot 10^{7}$
14	$5{,}75 \cdot 10^{2}$	$3{,}71 \cdot 10^{1}$	15,5	$7{,}59 \cdot 10^{7}$
15	$1{,}41 \cdot 10^{3}$	$6{,}31 \cdot 10^{1}$	22,4	$1{,}74 \cdot 10^{8}$
16	$2{,}88 \cdot 10^{3}$	$1{,}15 \cdot 10^{2}$	25,1	$3{,}98 \cdot 10^{8}$
17	$6{,}92 \cdot 10^{3}$	$1{,}90 \cdot 10^{2}$	36,3	$8{,}90 \cdot 10^{8}$
18	$1{,}6 \cdot 10^{4}$	$3{,}16 \cdot 10^{2}$	50,0	$1{,}82 \cdot 10^{9}$
19	$3{,}2 \cdot 10^{4}$	$5{,}0 \cdot 10^{2}$	63	$3{,}31 \cdot 10^{9}$
20	$5{,}0 \cdot 10^{4}$	$6{,}3 \cdot 10^{2}$	79	$6{,}16 \cdot 10^{9}$
21	$7{,}9 \cdot 10^{4}$	$7{,}9 \cdot 10^{2}$	100	$1{,}05 \cdot 10^{10}$

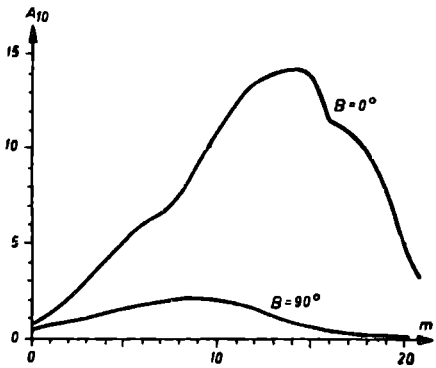
ein systematischer und durch Beobachtungstatsachen wesentlich gestützter Vorstoß unternommen (HERSCHEL).

Bevor diese Untersuchungen betrachtet werden sollen, ist noch die Frage des Gesamtleuchtens der Sterne zu behandeln, die von einer bestimmten Größenklasse an die Helligkeit des Himmelsuntergrundes bildet, wenn man von den beim Zodiakallicht zusammenhängend erwähnten flächenhaften Leuchterscheinungen absieht. Durch das Licht der unterhalb der Empfindlichkeitsschwelle einer vorgegebenen Aufnahmeapparatur befindlichen Sterne wird sowohl der visuelle als auch der photographische Eindruck der eigentlichen Milchstraße hervorgerufen. Will man nun die Frage beantworten, wie sich die Anteile der einzelnen Größenklassenbereiche zum Gesamtleuchten vereinigen, so ist zu beachten, daß die helleren Sterne einen größeren Beitrag liefern. Der meßbare Energiezufluß S bzw. S_0 zweier Sterne,

deren Helligkeiten um eine Größenklasse differieren, steht im Verhältnis $S:S_0 = 1:2{,}512$ nach der früher gegebenen Formel $\Delta m = -2{,}5 \lg \frac{S}{S_0}$, da $\frac{-1}{2{,}5} = \lg \frac{S}{S_0} = -0{,}4000$. Wäre also die Anzahl der Sterne der nächstschwächeren Größe jeweils das 2,512fache der helleren Größenklasse, so würden alle Bereiche ungefähr den gleichen Beitrag liefern. Ein Blick auf die Tabelle Seite 137 sagt uns, daß bis zur 12. Größe der Anstieg der Sternanzahlen a größer als 2,5, danach jedoch kleiner ist. Die Anteile der Größenklassenbereiche am Untergrundsleuchten des Himmels werden also bis zur 12. Größe ansteigen, danach wieder abfallen. Vergleicht man dagegen die Zone der Milchstraße (galaktische Breite $B = 0°$) mit den Polgebieten des galaktischen Systems ($B = 90°$), so ergibt sich, daß die mittlere Leuchtdichte des Himmelsuntergrundes in der Milchstraße um etwa 2,3 Größenklassen heller ist als an den Polgebieten.

Räumlicher Aufbau des Sternsystems

Um den ersten mit wissenschaftlichen Methoden durchgeführten Versuch der Erforschung unseres Milchstraßensystems, d. h. vor allem der räumlichen Anordnung der Sterne zu verstehen, müssen wir zuvor eine Betrachtung über die Beziehung zwischen der Helligkeit und der Entfernung der Sterne anstellen. Das Problem wäre sonst sofort gelöst, sobald man von jedem Stern an der Sphäre seine Ent-



Untergrundhelligkeit des Himmels, hervorgerufen durch die Sterne der Größenklasse m, *ausgedrückt in Anzahlen* A_{10} *der Sterne 10. Größe;* $B = 0°$ *in der Milchstraße,* $B = 90°$ *an den Polen der Milchstraße*

fernung kennen würde. Dadurch könnte man auch seine Lage im Raume wissen. Doch einmal schon wegen der großen Anzahl der Sterne und dann wegen der technischen Undurchführbarkeit der Entfernungsbestimmung für jeden von ihnen ist, wie man ohne große Überlegung einsieht, die Aufgabe auf diesem direkten Wege nicht angreifbar. Es ist bezeichnend, daß die erste brauchbare Methode in der Tat eine statistische war, wie es nach Lage der Dinge nicht anders sein konnte.

Die Helligkeit, in der uns die Sterne nachts erscheinen, nennt man ihre *scheinbare Helligkeit*. Das Eigenschaftswort *scheinbar*, das sei besonders betont, ist hier Teil eines Fachausdrucks und hat als solcher nichts zu tun mit dem Sinn dieses Wortes, wie wir es im Alltag gebrauchen. Es drückt also nicht eine gewisse Unsicherheit aus, sondern ist eine nach physikalischen Methoden exakt meßbare Größe wie die Länge oder die Masse. Alle bisher betrachteten Helligkeiten der Sterne waren scheinbare Helligkeiten. Wenn wir durch Messung feststellen, daß die scheinbare Helligkeit der Sonne $m = -26^{m}86$ ist, so besagt dieses Ergebnis, daß für uns die Sonne $13 \cdot 10^{9}$ mal heller erscheint als Sirius, der hellste Fixstern. Wir können aber damit nicht entscheiden, ob es nicht doch Sterne gibt, die in *Wirklichkeit* oder wie man meist sagt „*absolut* genommen" heller als unser Tagesgestirn sind. Um das unmittelbar etwa mit den Augen entscheiden zu können, müßte man die zum Vergleich herangezogenen Gestirne in die gleiche Entfernung bringen. Da dies naturgemäß nicht ausführbar ist, muß man diesen Prozeß durch eine Umrechnung ersetzen. Dabei wird man die *absolute Helligkeit* M aus der *scheinbaren* m unter Verwendung der Entfernung r erhalten, wobei man sie auf eine bestimmte, aber willkürlich wählbare Vergleichsentfernung umrechnen muß. Die leicht ableitbare Formel lautet:

$$M = m + c^{*} - 5 \lg r.$$

Der Zahlenwert der Konstanten c^{*} richtet sich nach der Größe der Vergleichsentfernung und nach dem Entfernungsmaß, mit dem man rechnet. Aus der Praxis der Ent-

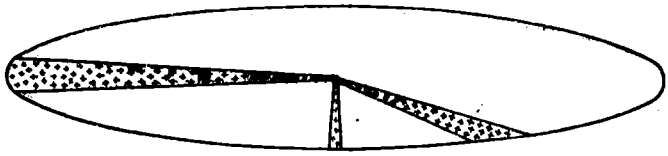
fernungsbestimmung und in Anlehnung an die bereits vorhandene Astronomische Einheit AE hat man zur interstellaren Entfernungseinheit die *Parsek* (auch Parsec), Abkürzung pc, geschaffen. Es merkt sich sehr leicht, daß 1 pc die Entfernung ist, aus der die AE, also der Abstand Erde–Sonne gerade unter einem Winkel von 1″ erscheint. Dieser Winkel heißt *Parallaxe*, und so ist auch die Wortbildung *Parsek* (Parallaxensekunde) sofort verständlich. Mit Hilfe einer Rechentafel, die heute in jeder Schule gebraucht wird, stellt man unschwer fest, daß

$$1\ \mathrm{pc} = 206\,265\ \mathrm{AE} = 3{,}086 \cdot 10^{18}\ \mathrm{cm}$$

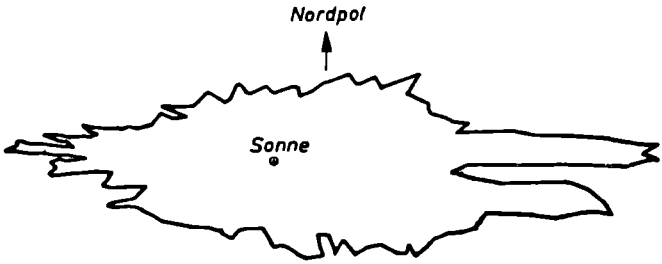
oder rund 31 Billionen km ist. Die Vergleichsentfernung, auf die man die absolute Helligkeit bezieht, ist $r_0 = 10$ pc. Sodann wird die Konstante $c^* = 5$. Berechnet man beispielsweise für die Sonne die absolute Helligkeit, so ergibt sich $M_\odot = +\,4^{m}72$. Die Bedeutung der eben abgeleiteten Formel beruht nun darin, daß man mit ihrer Hilfe entweder die absolute Helligkeit eines Sternes berechnen kann, wenn man die Entfernung bestimmt hat, oder die Entfernung ermitteln kann, wenn man etwa auf einem anderen Wege seine absolute Helligkeit gewonnen hat. In dieser Richtung liefen die Überlegungen, die W. Herschel angestellt hat, um ein Bild von der Gestalt des Milchstraßensystems zu gewinnen.

Herschels Untersuchungen. Mit Hilfe eines seiner für die damalige Zeit beachtlichen Spiegelteleskope gelang ihm der bis dahin tiefste Vorstoß in den Fixsternraum. Wenn es ihm dabei nicht gelang, die Ausmaße unseres Sternsystems in absoluten Einheiten anzugeben, so lag dies wesentlich daran, daß damals noch keine praktische Möglichkeit bestand, einen zuverlässigen Vergleich zwischen der gewaltigen Helligkeit der Sonne und der etwa ein Zehnmilliardstel betragenden Helligkeit der hellsten Fixsterne durchzuführen. Davon abgesehen lieferten seine Untersuchungen aber doch eine Vorstellung von der räumlichen Gestalt des Sternsystems. Das Prinzip seiner Methode wird bis heute noch angewandt und soll deshalb kurz erläutert werden.

In dem Gesichtsfelde eines jeden Fernrohres erblickt man einen bestimmten Ausschnitt der Sternsphäre. Bei HERSCHEL entsprach die Größe des Gesichtsfeldes rund $^1/_{20}$ □°. Auf diesen Ausschnitt projizieren sich alle Sterne, die in dem vom Fernrohr optisch erfaßten Kegel (mit der Spitze im Auge des Beobachters) bis zur scheinbaren Grenzhelligkeit dieses Instrumentes enthalten sind (Abb.). Nimmt man nun zur ersten Orientierung an, daß der Raum gleichmäßig von Sternen erfüllt ist, so gibt die an einer bestimmten Stelle der Sphäre beobachtete Anzahl der Sterne zugleich die Größe des von den Sternen eingenommenen Raumkegels und somit die Länge dieses Kegels als Grenzentfernung des Sternsystems in dieser Richtung an. HERSCHEL lotete an 1088 Stellen auf diese Art das Milchstraßensystem aus und erhielt so ein etwa linsenförmiges System, dessen kleinster Durchmesser rund $^1/_5$ des größten Durchmessers beträgt, wobei die Kante dieser *Sternlinse* mit der Milchstraßenebene zusammenfällt und der kleinste Durchmesser in Richtung auf die Pole der Galaxis zeigt. Wie man sich leicht überzeugt, wächst das Volumen zweier Kegel mit gleichem Öffnungswinkel, deren Höhen sich wie 1 : 5 verhalten, proportional zur dritten Potenz der Höhen, so daß die extremen Sternanzahlen im Verhältnis 1 : 125 stehen sollten.
Ein Teilergebnis der Untersuchungen von Herschel ist in der Abbildung S. 144 dargestellt. Danach befindet sich unsere Sonne nahe dem Mittelpunkt des Sternsystems. Das gleiche Prinzip, das im Altertum zum geozentrischen Planetensystem geführt hat, taucht hier, fast 3000 Jahre später, nochmals auf. Es ist einfach der Ausdruck für die Tatsache, daß der



Die Anzahlen der im Gesichtsfeld eines Fernrohres sichtbaren Sterne sind den dritten Potenzen der Grenzentfernungen proportional



Querschnitt durch unser Sternsystem senkrecht zur Milchstraßenebene nach den Sternzählungen von W. Herschel; die Sonne befindet sich nahezu im Mittelpunkt des Milchstraßenraumes; rechts ist die Aufgabelung der Sommermilchstraße zu erkennen; oben ist der Nordpol der Galaxis

Beobachter sich stets im Mittelpunkt der von seinem Standort aus beobachtbaren Welt empfindet.
Eine weitere Annahme, mit der HERSCHEL rechnete, war die unter den damaligen Umständen und bei den vorhandenen Kenntnissen naheliegende, daß alle Sterne im Durchschnitt die gleiche *Leuchtkraft*, also *absolute Helligkeit* haben. Überlegungen und Vergleiche mit den Beobachtungen zeigten jedoch, daß beide Annahmen — gleiche Raumerfüllung und gleiche absolute Helligkeit — nicht ohne weiteres gleichzeitig mit den Beobachtungen in Einklang zu bringen sind. HERSCHEL gewann so die Einsicht, daß seine Ergebnisse nur zu einem vorläufigen Bilde über den Aufbau des Sternsystems geführt haben.
Bei allen seinen Untersuchungen hatte HERSCHEL nicht an die Möglichkeit gedacht, daß die Helligkeit der Sterne durch irgendwelche zwischen Beobachter und den Gestirnen selbst befindliche lichtabschirmende Stoffe beeinträchtigt sein könnte. Es entsprach diese Einstellung durchaus der damals allgemein herrschenden Ansicht, daß der Raum zwischen den Planeten und Fixsternen als absolutes Vakuum zu betrachten sei. Somit ist diese stillschweigend gemachte Voraussetzung des Fehlens jeder *interstellaren Absorption* durchaus verständlich.

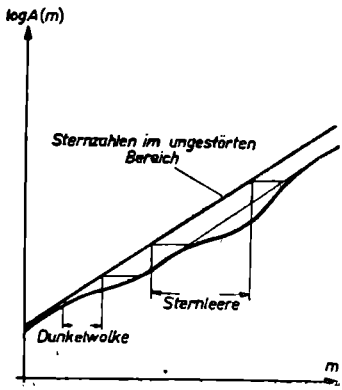
Bestimmung von Dunkelwolken. Die späteren, an HERSCHEL anknüpfenden Untersuchungen brachten im wesent-

lichen Verfeinerungen der Methode, indem z. B. der Einfluß von Sternen verschiedener Leuchtkraft in Rechnung gestellt und das umfangreiche Beobachtungsmaterial der verschiedenen Durchmusterungen verarbeitet wurde. Die Schematisierung bzw. Typisierung wurde weiter beibehalten, so daß zu Beginn des 20. Jahrhunderts das *typische Sternsystem* nach den Arbeiten H. v. SEELIGERS mit einer ausgesprochen zentralen Stellung der Sonne in Gestalt einer Linse erhalten wurde, dessen Äquatordurchmesser 10000 pc und dessen Polardurchmesser 2000 pc betrug. Im Gegensatz zu diesen alle örtlichen Ungleichheiten ausgleichenden Verfahren versuchte KAPTEYN ein der Wirklichkeit stärker angepaßtes Bild unseres Sternsystems zu gewinnen, in dem jede größere Ungleichheit die ihr von Natur aus zukommende Bedeutung beibehalten sollte, wobei weder gleichförmige räumliche Sterndichte noch gleiche Leuchtkraft angenommen werden. Auch hier wird die Wirkung der interstellaren Absorption noch unterschätzt und nicht berücksichtigt. Die Dimensionen des Kapteynschen Sternsystems waren gegenüber dem Seeligerschen nur um rund 50% vergrößert. Mit dem Übergang zur Untersuchung einzelner Milchstraßenwolken, der durch PANNEKOEK vollzogen wurde, kam die individuelle Untersuchung der Dunkelwolken der Milchstraße auf und führte zur Entdeckung der allgemeinen interstellaren Absorption. An dieser Entdeckung ist M. WOLF wesentlich beteiligt. An einem Beispiel seien der Grundgedanke der Wolfschen Methode und ihre Bedeutung für die Erforschung des Sternsystems gezeigt.

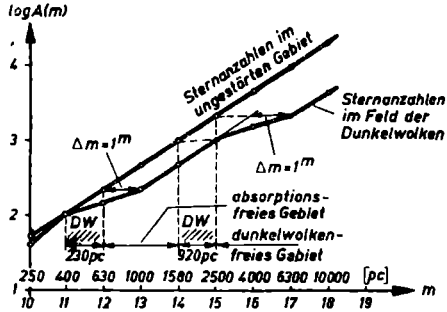
Aus der bereits früher mitgeteilten Formel für die scheinbare Helligkeit m und die Entfernung r der Sterne folgt, daß eine enge Beziehung stets dann zu erwarten sein wird, wenn die betrachteten Sterne nahezu die gleiche absolute Helligkeit M besitzen. Diese einschränkende Bedingung ist aber für viele Zwecke vertretbar. Bei einer durchschnittlichen absoluten Helligkeit $M = +3{,}0$ haben wir eine Entfernung $r = 2{,}512 \cdot 10^{0{,}2\,m}$ pc, also eine einfache Beziehung zwischen der scheinbaren Helligkeit und der Entfernung. Äußerlich tritt eine Dunkelwolke als sternarmes Gebiet in

Erscheinung. HERSCHEL hielt diese Gebiete für wirklich sternleer. Bei einer besonders ausgeprägten Stelle im Sternbild Skorpion schrieb er in sein Beobachtungstagebuch die Bemerkung, daß hier ein Loch im Himmel zu sein scheine. Da ihm das Bestimmen der Helligkeitsklassen der Sterne Schwierigkeiten bereitete, übersah er die Möglichkeit, eine wirkliche *Sternleere* von einer durch Absorption hervorgerufenen sternarmen Gegend der Sphäre zu unterscheiden.

Durch Auszählen der Sterne einer Himmelsgegend, also durch Gewinnen der Funktion $A(m)$, kann man nämlich nicht nur die Entfernung und Tiefenerstreckung einer Dunkelwolke bestimmen (Abb.), sondern gleichzeitig entscheiden, welcher Art die an der Sphäre sichtbare sternarme Gegend ist. Die Ausmaße der Wolke senkrecht zum Visionsradius sind im Winkelmaß meist unmittelbar auf der photographischen Platte erkennbar. Die entsprechenden Dimensionen in Parsek können erst angegeben werden, sobald der Abstand der vorderen Front der Wolken bekannt ist. Der Gang der Untersuchung ist etwa folgender: Zuerst wird in dem ungestörten Gebiet außerhalb der Dunkelwolke die Funktion $A(m)$ ausgezählt. Wegen der großen Sternanzahlen ist es praktisch, in der Ordinate nicht die Anzahl selbst, sondern den Logarithmus der Anzahl $A(m)$ gegen die Helligkeit in Sterngrößen m aufzutragen. Die an der Abszisse über der Helligkeitsskala angeschriebene Entfernungsskala ist nach der eben mitgeteilten Formel berechnet und gibt eine Vorstellung davon, in welcher Entfernung im Durchschnitt Sterne einer bestimmten scheinbaren Helligkeit sich befinden. Die im



Schematische Analyse zur Unterscheidung einer sternarmen Gegend als Dunkelwolke oder wirkliche Sternleere



Erläuterung der Wolfschen Methode zur Bestimmung der Entfernung und der Tiefenerstreckung von Dunkelwolken

Bereich der sternarmen Gegend in gleicher Weise gewonnenen Anzahlen A(m) werden im allgemeinen von der ersten Kurve der ungestörten Verteilung nach unten abweichen. Bleibt nach dieser Abweichung die A(m)-Kurve parallel zur Kurve der ungestörten Sterngegend, so handelt es sich um eine Dunkelwolke, deren Absorptionswirkung alle hinter ihr stehenden Sterne betrifft. Steigt dagegen nach der Abweichung nach unten die A(m)-Kurve des sternarmen Gebietes wieder an und mündet in die ursprüngliche Kurve ein, so handelt es sich um eine wirkliche, räumlich begrenzte Sternleere, deren Auswirkung naturgemäß nur die Sterne der Helligkeitsklassen betreffen kann, in deren Entfernungsbereich sich die Sternleere befindet.

Zur Deutung des Phänomens einer Dunkelwolke geht man in den Ergebnissen der Auszählung davon aus, daß die Häufigkeitsverteilung der scheinbaren Helligkeiten A(m) im Gebiet der Dunkelwolken grundsätzlich die gleiche ist wie außerhalb dieser Bereiche und daß die beobachtete Abweichung allein durch die Absorption in der Dunkelwolke hervorgerufen wird (Abb.).

Bis zu den Sternen der 11. Größe, die etwa im Abstand von 400 pc liegen, verlaufen beide Kurven gleichartig, wenn man bei den gewonnenen Zahlen von zufälligen Streuungen absieht. Dann setzt im Bereich der Dunkelwolke die Absorption ein, die bis zu den Sternen der 13. Größe zunimmt und zuletzt $\Delta m = 1^m$ beträgt. Die vorliegende Dunkelwolke beginnt also im Abstand von 400 pc und reicht, da die Sterne der 13. Größe ohne die Wirkung der Dunkelwolke 12. Größe wären, bis 630 pc, hat also eine Tiefenerstreckung von

230 pc. Bei den Sternen der 15. Größe, die ohne die Wirkung der ersten Dunkelwolke von der 14. Größe wären, also im Abstand von 1580 pc, beginnt eine zweite Dunkelwolke, die ebenfalls eine Absorption von $\Delta m = 1^m$ aufweist. In diesem Abstand entspricht jedoch die Absorption von einer Größenklasse einer Raumestiefenerstreckung von 920 pc, so daß im Abstande von 2500 pc ihre rückwärtige Begrenzung erreicht wird. Dahinter liegt, ebenso wie zwischen 630 und 1580 pc Entfernung, durch Beobachtungen bis in einen Abstand von 4000 pc belegt ein von Absorptionswirkungen freies Raumgebiet.
Man gibt die Absorptionswirkung von Dunkelwolken gewöhnlich in Sterngrößen je Kiloparsek an. Die erste Dunkelwolke ist mit $\Delta m / \Delta r = 4{,}35$ (^{m}/kpc) optisch wesentlich dichter als die zweite, deren Absorption nur $\Delta m / \Delta r = 1{,}09$ (^{m}/kpc) beträgt. Die Abbildung gibt natürlich einen glatten, idealisierten Fall wieder. In vielen Gebieten verläuft schon die Häufigkeitskurve des ungestörten Sternfeldes nicht so glatt, und oft erfordert die Deutung des Verlaufs der Kurve des gestörten Bereiches der Dunkelwolke ein großes Geschick, um ein den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechendes Ergebnis zu erhalten.

Allgemeine Absorption. Nachdem sich auf Grund zahlreicher nach dieser Methode durchgeführter Untersuchungen die Erkenntnis durchgesetzt hatte, daß die sternarmen Gebiete der Milchstraße, die sich als dunkle Flächen vom leuchtenden Himmelsgrund abheben, durch Dunkelwolken hervorgerufen werden, war der Schritt nicht mehr weit zu der Einsicht, daß auch im galaktischen Raum außerhalb der ausgeprägten Dunkelwolken eine allgemeine Absorption vorhanden ist, deren Größe mit etwa 0,6 bis 1,2 ^{m}/kpc angegeben wird und wohl von Natur aus etwas unterschiedlich sein wird. Insbesondere hat sich gezeigt, daß diese allgemeine Absorption in Richtung auf die Pole der Milchstraße einen minimalen Betrag erreicht, also von der galaktischen Breite abhängig ist. Diese Abhängigkeit rührt daher, daß die lichtabsorbierende Materie in der galaktischen

Hauptebene stark konzentriert ist, so daß sich der größte Teil innerhalb einer etwa planparallelen Schicht von 600 pc Dicke befindet. Nach unserer heutigen Kenntnis besitzt diese Materie keine gleichförmige Verteilung, sondern ist in zahlreiche und relativ zueinander bewegliche Wolken aufgegliedert, die einander durchdringen, sich auflösen und von neuem bilden können.

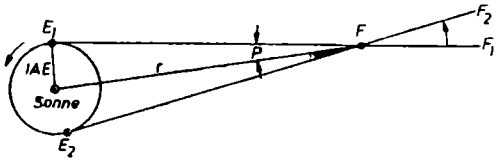
Die unter der Voraussetzung eines absorptionsfreien interstellaren Raumes abgeleitete Entfernungs-Helligkeits-Beziehung ist durch ein Zusatzglied $A \cdot r$ zu verbessern, das die von der galaktischen Breite abhängige allgemeine Absorption A in ^{m}/pc berücksichtigt:

$$m = M - 5 + 5 \lg r + A \cdot r.$$

Alle Untersuchungen des Aufbaus unseres Sternsystems, bei denen die Wirkung der interstellaren Absorption nicht berücksichtigt wurde, sind verbesserungsbedürftig; sie haben zu Vorstellungen geführt, die von der Wirklichkeit um so mehr abweichen, je größer die berechneten Entfernungen sind. Da infolge der Absorptionswirkung die Sterne in ihrer Helligkeit gemindert, also lichtschwächer erscheinen als sie ohne Absorption wären, liegt die Abweichung von der Wirklichkeit in der Richtung, daß die Abstände zu groß erhalten wurden. So wären die Ausmaße unseres Sternsystems nach Berücksichtigung der interstellaren Absorption erheblich zusammengeschrumpft, wenn sich nicht inzwischen durch die Indienstnahme riesiger Teleskope mit wesentlich größerer Reichweite doch noch eine Vergrößerung unseres Milchstraßensystems ergeben hätte, bewirkt durch das Vordringen in bisher unerreichbare Raumestiefen.

Trigonometrische Parallaxen. An dieser Stelle ist es nützlich, sich zu vergegenwärtigen, auf welcher Grundlage und auf welchen Methoden die Entfernungsbestimmungen im Weltall beruhen. Das Fundament und der Ausgangspunkt aller Distanzmessungen ist die Bestimmung der trigonometrischen Parallaxen (Abb. S. 150).

Die Verschiebung $F_1 F_2$, die ein Fixstern F an der Sphäre



Bestimmung der Parallaxe eines Fixsterns

infolge der Jahresbewegung der Erde um die Sonne von E_1 nach E_2 erleidet, ist abhängig von dem bekannten Abstand Erde–Sonne = 1 AE und dem gesuchten Abstand r von der Sonne zum Fixstern. Aus dem Dreieck Fixstern–Erde–Sonne hat man

$$\sin p = \frac{p''}{\varrho''} = \frac{1\ \text{AE}}{r} \text{ oder } r = \frac{1\ \text{AE} \cdot \varrho''}{p''}.$$

Drückt man den Abstand in der Entfernungseinheit Parsek aus:

$1\ \text{AE} \cdot \varrho'' = 1{,}496 \cdot 10^{13} \cdot 2{,}0626 \cdot 10^{5} = 3{,}086 \cdot 10^{18}\ \text{cm} = 1\ \text{pc}$,

so erhält man die einfache Beziehung $r = \frac{1}{p''}$ [pc]; wenn die jährliche Parallaxe in Bogensekunden bestimmt ist, hat man im Kehrwert sogleich den Abstand in Parsek, pc. An dem Weiterausbau dieser wichtigen Grundlage jeder kosmischen Entfernungsbestimmung wird laufend gearbeitet. Von rund 3600 trigonometrisch vermessenen Sternparallaxen liegt eine Übersicht ihrer Größen vor.

Die Tabelle zeigt die Häufigkeitsverteilung und läßt erkennen, daß rund die Hälfte der erfaßten Sterne Parallaxen unterhalb 0″02 besitzt. Da die Unsicherheit, mit der der Wert der Parallaxe bestimmt werden kann, von der gleichen Größe ist, muß man bei so kleinen Werten äußerst vorsichtig sein. Unsere Kenntnis der Sternentfernungen beruht also letzten Endes

Verteilung der trigonometrischen Parallaxen

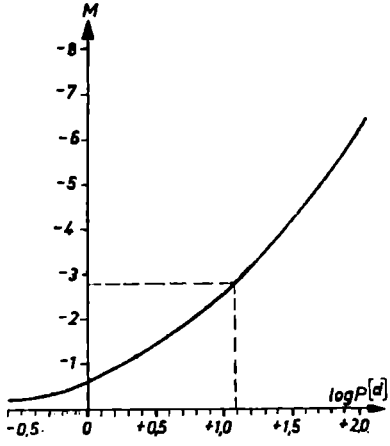
Größenbereich	Anzahl der Sterne
kleiner als 0″02	1800
0″02 bis 0″05	1300
0″05 bis 0″08	350
0″08 bis 0″11	80
größer als 0″11	100
	Summe: 3630

auf rund 2000 Sternparallaxen, deren Werte zwischen 0″,02 und 0″,76 liegen. Die auf diesem direkten Wege erschlossene Raumkugel hat demnach einen Durchmesser von etwa 100 pc, entsprechend einem Volumen von 523000 pc³. Da in diesem Volumen nach einer groben Abschätzung 10000 bis 50000 Sterne enthalten sind, so folgt daraus, daß erst ein geringer Prozentsatz selbst der nächsten Sterne wirklich vermessen ist.

Photometrische Parallaxe. Eine der wichtigsten indirekten Methoden der Entfernungsbestimmung ist die der *photometrischen Parallaxen*, obwohl in diesem Falle keine eigentliche Parallaxe, also kein Winkel gemessen wird. Die Entfernung r hängt von der Differenz der scheinbaren und der absoluten Helligkeit, von dem Entfernungsmodul (m — M) ab und kann als Parallaxe p dargestellt werden:

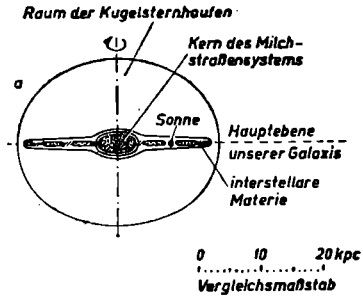
$$m - M = -5\left(1 + \lg\frac{1}{r}\right); \; p = 10^{-[1 + 0{,}2\,(m - M)]}\,['].$$

Die Bestimmung der photometrischen Parallaxe läuft also auf die der absoluten Helligkeit M hinaus. Von den Wegen zu ihrer Bestimmung ist der über die Perioden-Helligkeits-Beziehung gewisser veränderlicher Sterne der üblichste und sicherste. Die in Frage stehenden Sterne sind sogenannte pulsierende Riesensterne von den Typen RR-Lyrae und δ Cephei (Abb.). Aus noch keineswegs geklär-



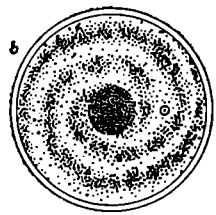
Die Perioden-Helligkeits-Beziehung der pulsierenden Sterne. Für einen Stern mit der Lichtwechselperiode P = 12,6ᵈ (Tage) findet man, da lg P = 1,10, über die empirisch bestimmte Kurve die mittlere absolute Helligkeit M = — 2,8 *(in der Astronomie wird der dekadische Logarithmus häufig mit log bezeichnet).*

ten Gründen der inneren Energievorgänge befinden sich diese Sterne in einem labilen mechanischen Gleichgewicht, so daß sie sich periodisch zusammenziehen und wieder ausdehnen. Es gibt Sterne dieser Art mit den verschiedensten Perioden zwischen Bruchteilen von Tagen bis über 100 Tage. Merkwürdig ist hierbei zweierlei: daß jeder dieser Sterne in einer Periode schwingt, die er genau einhält, und daß seine mittlere absolute Helligkeit eindeutig von der Dauer der Pulsationsperiode abhängt. Findet man irgendwo im Weltall einen solchen veränderlichen Stern und gelingt es, die Periode seines Lichtwechsels abzuleiten, so hat man dadurch seine absolute Helligkeit gewonnen. Zusammen mit der scheinbaren Helligkeit, die wegen der Absorption der interstellaren Materie zu korrigieren ist, erhält man seinen Entfernungsmodul und damit seinen Abstand von der Sonne.
Der Umstand, daß die Pulsationsveränderlichen absolut sehr helle Sterne sind, ermöglicht ein tiefes Eindringen in den Raum. Ja es ist sogar möglich, die Abstände der benachbarten Sternsysteme mit ihrer Hilfe zu bestimmen. Die ersten Erfolge in dieser Richtung bei den Kugelsternhaufen bahnte die Erkenntnis an, daß unsere Sonne eine stark exzentrische Stellung im gesamten Milchstraßensystem einnimmt. Das Sternsystem, dessen Erforschung HERSCHEL einleitete und das zu Beginn unseres Jahrhunderts bei einem Durchmesser von 12 kpc die Sonne in sehr zentraler Stellung einschloß, war nur ein Teil des viel größeren galaktischen Systems, zu dem auch das System der Kugelsternhaufen gehört. Bei sorgfältiger Berücksichtigung der absorbierenden Wirkung der interstellaren Materie gelang der Nachweis, daß die Flächen gleicher Sterndichte in der Sonnenumgebung in Richtung auf das Sternbild Schütze auseinanderlaufen. In dieser Richtung ist also das viel größere Kerngebiet der Milchstraße zu suchen. Dieser Befund über die Lage des Milchstraßenzentrums ist in Übereinstimmung mit dem System der Kugelsternhaufen, das den Außenraum unserer Galaxis erfüllt. Ohne jetzt auf alle einzelnen Beobachtungstatsachen einzugehen, die das heutige Bild rechtfertigen, betrachten wir eine schematische Darstellung des Milch-



Schematische Darstellung unseres Milchstraßensystems; a Aufriß, b Grundriß

straßensystems (Abb.) im Aufriß (Schnitt durch das galaktische Zentrum und die Sonne) und im Grundriß.



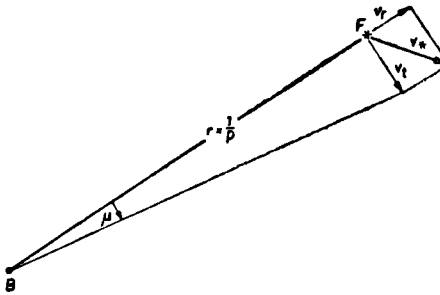
Das Milchstraßensystem. Das, was früher als typisches oder lokales Sternsystem bezeichnet wurde, ist ein mehr oder weniger zufälliger Ausschnitt aus dem etwa in Scheibenform angeordneten Bereich der *Feldsterne*. Das etwa ellipsoidische Kerngebiet, das den größten Teil der stellaren Materie umschließt und folglich auch die größte Massenansammlung innerhalb unserer Galaxis darstellt, ist wegen der ausgedehnten interstellaren Materie von unserem Standpunkt aus unmittelbar nicht sichtbar. Erst die Infrarotphotographie mit ihrem wesentlich größeren Durchdringungsvermögen vermochte die durch die interstellare Materie gegebene kosmische Sichtbehinderung zu überwinden und ermöglichte ein Vordringen auf das Zentrum unserer Galaxis hin.

Von der Gesamtmasse des Milchstraßensystems befinden sich etwa 75% im Kerngebiet, der Rest verteilt sich auf die Feldsterne, die den scheibenförmigen Raum wahrscheinlich in spiraliger Anordnung erfüllen, und auf die interstellare Materie, die in einer etwa 600 pc dicken Schicht noch stärker zur galaktischen Hauptebene konzentriert ist als die Sterne. Die Gesamtanzahl der Sterne liegt bei etwa 150 Milliarden, wobei die durchschnittliche Masse eines Sternes etwas unterhalb der Sonnenmasse anzusetzen ist. Etwa ein Drittel der Feldsterne gehört einem *Doppel-* oder *Mehrfachsystem* an. Kleinere Gruppen, die eine Gemeinschaft zu bilden

scheinen, heißen *Assoziationen*. Weiter befinden sich im Raum der Feldsterne rund 400 sogenannte *offene Sternhaufen*, auch *galaktische Haufen* genannt. Da der sichtbare Raum der Feldsterne etwa $^1/_8$ des gesamten Raumes sein dürfte, ist in unserem Milchstraßensystem mit einer Gesamtzahl von rund 3500 offenen Sternhaufen zu rechnen. Einer der bekanntesten offenen Haufen ist das *Siebengestirn* oder die *Plejaden*. In Auflösung befindliche galaktische Sternhaufen haben sich meist so weit über den Himmel verstreut, daß sie als solche nur noch an der gemeinsamen Bewegung erkennbar sind. Man nennt sie deshalb meist *Bewegungssternhaufen* oder *Sternfamilien*. Die *Bärenfamilie*, so genannt, weil von den sieben hellen Sternen des Großen Bären fünf zu ihr gehören, hat Vertreter am nördlichen und südlichen Himmel. Dieser Bewegungshaufen hat sich also bereits in einen so großen Raum verstreut, daß die Anzahl der nicht zu ihm gehörigen Sterne die Anzahl der Mitglieder bei weitem übertrifft. Auch im Bereich der Spiralarme sind die Feldsterne nicht gleichförmig verteilt, sondern zu mehr oder weniger großen und langgestreckten Sternwolken vereinigt. Die in der Sonnenumgebung befindlichen Sternwolken sind es, die der Milchstraße die eigentümliche Struktur geben. Man nennt sie deshalb auch *Milchstraßenwolken*.

Der Raum außerhalb des linsenförmigen galaktischen Systems wird von den sogenannten *Kugelsternhaufen* eingenommen, von denen wir gegenwärtig etwa 100 kennen, deren Anzahl aber wohl mindestens doppelt so groß sein dürfte. Während die Durchmesser der offenen Sternhaufen zwischen 1,5 und 15 pc und ihre Mitgliederzahlen zwischen einem Dutzend bis etwa 500 betragen, liegen die Durchmesser der Kugelsternhaufen mit relativ geringer Streuung um den Wert 60 pc. Die im Bereich zwischen 100 000 bis über 10 000 000 zählenden Mitglieder erfüllen einen nahezu kugelförmigen Raum mit starker Konzentration zum Mittelpunkt hin. Würde unsere Sonne einem der beiden Haupttypen der Sternhaufen angehören, so würde uns der nächtliche Sternhimmel eine erheblich größere Zahl sehr heller Sterne von der durchschnittlichen Helligkeit der Planeten zeigen.

Eigenbewegung. Die Bezeichnung *Fixstern* wurde zu einer Zeit geschaffen, in der es noch nicht möglich war, Eigenbewegungen der Sterne relativ zueinander festzustellen. Heute wissen wir, daß es im Weltall nirgends Ruhe und Stillstand gibt, sondern daß alles in Bewegung ist. Zufolge dieser Bewegung erfahren die Fixsterne laufend geringfügige Veränderungen ihrer Lage (Position) an der Sphäre, deren Größe von der Entfernung des Gestirns von der Erde abhängt. Im günstigsten Fall, nämlich für die nächsten Sterne, erreicht diese Eigenbewegung den Betrag von einigen Bogensekunden im Jahre. Die Gewinnung dieser Verschiebungen der Sternörter erfordert eine Präzisionsbestimmung der Fundamentalkoordinaten in zwei hinreichend weit auseinanderliegenden Zeitpunkten (Epochen). Je größer der Epochenunterschied der beiden Beobachtungen ist, desto geringere Eigenbewegungen können erfaßt werden. Die *Eigenbewegung* (*EB*) ist ein senkrecht zum Visionsradius — das ist die Richtung des Lichtstrahls vom Stern zum Beobachter — liegender Vektor. Seine Lage an der Sphäre oder genauer in der im Sternpunkt an die Sphäre gelegten Tangentialebene wird durch die beiden Komponenten (nach Rektaszension und Deklination) in den Koordinaten in jedem Fundamental-Sternkatalog angegeben. Man bezeichnet den *EB*-Vektor mit dem Buchstaben μ und mißt in der Einheit Bogensekunden pro Jahr, [''/a]. Mit Hilfe der Eigenbewegung kann aber, wenn gleichzeitig auch die Entfernung bzw. die Parallaxe bekannt ist, nur die tangentiale Komponente der räumlichen Geschwindigkeit v_t des Sternes bestimmt werden (Abb. S. 156); in einer Ebene durch den Vektor der Eigenbewegung *EB* und den Beobachtungsort erhält man: $v_t = \frac{\mu}{p}\left[\frac{\mathrm{AE}}{\mathrm{a}}\right] = 4{,}74\,\frac{\mu}{p}$ [km/s], da eine astronomische Einheit 1 AE = $1{,}496 \cdot 10^8$ km und ein Jahr a = $3{,}156 \cdot 10^7$ s ist. Neben dieser formalen Beziehung zwischen μ und v_t gibt es noch eine anschauliche, die aus der Abbildung folgt.



Geschwindigkeitsvektor v_* der räumlichen Bewegung des Fixsterns F, zerlegt in die tangentiale v_t und in die radiale Komponente v_r für den Beobachter B; μ Eigenbewegung

Radialgeschwindigkeit. Die zweite Komponente der räumlichen Sterngeschwindigkeit ist die sogenannte Radialgeschwindigkeit *RG*, die in Richtung des Visionsradius *r* liegt. Sie wird in Richtung auf den Beobachter hin negativ (Verkleinerung des Abstandes *r*), im entgegengesetzten Sinne positiv gezählt und kann mit Hilfe des Doppler-Effektes gewonnen werden, also aus der Verschiebung von Spektrallinien. Die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit ist demnach nur dann möglich, wenn von dem betreffenden Stern ein Spektrum hinreichender Dispersion gewonnen werden kann. Wenn mit *c* die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet wird, λ die Wellenlänge der benutzten Linie im irdischen Laboratorium ist und die Verschiebung $\Delta\lambda = \lambda^* - \lambda$ sich aus der Lage der Linie im Sternspektrum λ^* ergibt, so lautet die Formel zur Berechnung der Radialgeschwindigkeit $v_r = c\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$. Hier ist die Maßeinheit von v_r die gleiche, in der man die Lichtgeschwindigkeit mißt. Das Ergebnis ist unabhängig vom Abstand des Sternes, da in der Formel weder *r* noch *p* vorkommen.

Sonnenbewegung. Unter Verwendung der beiden eben betrachteten Geschwindigkeitskomponenten läßt sich die räumliche Geschwindigkeit zusammensetzen: $v_*^2 = v_t^2 + v_r^2$. Diese räumliche Geschwindigkeit v_* ist nach dem Wege, auf dem sie gewonnen wurde, bezogen auf die Sonne. Da aber unsere Sonne auch nur ein Stern unter den anderen Sternen des Milchstraßensystems ist, müssen wir annehmen,

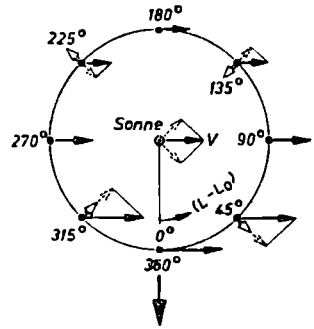
daß auch sie eine räumliche Bewegung ausführt. Diese zunächst natürlich nach Größe und Richtung unbekannte räumliche Bewegung der Sonne wird sich in der Bewegung der übrigen Sterne widerspiegeln, und folglich muß es möglich sein, aus den Eigenbewegungen und Radialgeschwindigkeiten einer möglichst großen Zahl über den ganzen Sternhimmel regellos verteilter Sterne die Sonnenbewegung abzuleiten. Die Raumbewegung der Sonne kann dargestellt werden durch einen Geschwindigkeitsvektor, in der astronomischen Ausdrucksweise durch die Koordinaten des Zielpunktes der Sonnenbewegung, des sogenannten *Apex*, und durch die Größe der Geschwindigkeit selbst. Die Lage des Sonnenapex an der Sphäre wird gegeben durch die Fundamentalkoordinaten $\alpha_A = 271°$, $\delta_A = +30°$. Der Betrag der Apexgeschwindigkeit der Sonne ist $v_\odot = 19{,}4$ km/s. Diese Angaben beziehen sich auf die Bewegung der Sonne relativ zu dem Schwerpunkt derjenigen Umgebungssterne, deren Radialgeschwindigkeiten als Beobachtungsunterlagen benutzt wurden. Der Zielpunkt, dessen Lage an der Sphäre auch aus den Eigenbewegungen bestimmt werden kann, liegt an der Grenze der Sternbilder *Herkules* und *Leier*. Die Apexbewegung der Sonne zeigt also keine überzeugende Beziehung zur Milchstraßenhauptebene und erweist sich somit als eine zufällige Bewegung, der im Rahmen unseres galaktischen Systems keine besondere Bedeutung zukommt.

Um überhaupt typische Eigenarten der Sternbewegung festzustellen, müssen an die Eigenbewegungen und Radialgeschwindigkeiten die Beträge der Auswirkungen der Sonnenbewegung angebracht werden. Die dann übrigbleibenden Werte zeigen insofern ein merkwürdiges Verhalten, als die erfaßten Sterne zwei Strömen anzugehören scheinen, die in ungefähr entgegengesetzter Richtung einander durchdringen. Ein solches Bild der Bewegungsverhältnisse in unserem Sternsystem ist in jeder Hinsicht unbefriedigend. Es hat dann später auch eine vernünftige Deutung im Rahmen des großen galaktischen Systems gefunden. Den Übergang zu dieser Auffassung schufen die Untersuchungen der Apex-

bewegung der Sonne relativ zu den verschiedensten Sterngruppen. Das wichtigste dieser Ergebnisse war die Entdeckung, daß die Sonne relativ zum System der Kugelsternhaufen eine Geschwindigkeit von $v_{\odot} = 200$ km/s besitzt, die nach einem Punkt in der Milchstraße gerichtet ist, der nahe bei dem hellsten Stern im Schwan, dem Deneb, liegt. Da sich auf Grund von Entfernungsbestimmungen mit Hilfe der Veränderlichenparallaxen die zentrale galaktische Stellung des Systems der Kugelsternhaufen ergeben hatte, konnte die große Relativbewegung der Sonne gegen dieses System nur als Zeichen dafür gedeutet werden, daß eine allgemeine Umlaufbewegung um das Zentrum der Milchstraße besteht, die man — vom Ganzen aus betrachtet — als *Rotation der Milchstraße* bezeichnete. An dieser Bewegung nimmt unsere Sonne als Stern unter Sternen selbstverständlich auch teil.

Rotation der Milchstraße. Der Anblick unseres galaktischen Systems (vgl. Abb. S. 153), insbesondere seine abgeplattete, rotationssymmetrische Gestalt, legt den Gedanken an eine allgemeine Umdrehung um die kleinste Achse des Kerngebietes nahe. Unsere Sonne, die sich inmitten des scheibenförmigen Feldgebietes befindet, müßte sich mit den Sternen ihrer Umgebung um das Zentralgebiet bewegen. Wir wissen aus unmittelbarer Anschauung nichts über die Form dieser Bewegung, über die dabei eingeschlagenen Bahnen. Doch in einer Hinsicht sehen wir völlig klar, daß nämlich *auch diese Bewegungen gemäß dem Newtonschen Gravitationsgesetz erfolgen.* Zufolge der bereits erörterten Massenverteilung muß erwartet werden, daß sich die Sterne im Feldgebiet ungefähr nach dem 3. Keplerschen Gesetz bewegen. Mangels einer genaueren Kenntnis wird man zur Annahme gedrängt, daß die Bahnen der Feldsterne, also auch die unserer Sonne, in erster Näherung Kreise sind, bei der Sonne mit dem Bahnradius $r = 8{,}2$ Kiloparsek, kpc (1 kpc = 1 000 pc). Hier erhebt sich nun die für uns äußerst wichtige Frage, ob es eine Möglichkeit gibt, aus dem kinematischen Verhalten der Sterne der Sonnenumgebung einen Schluß auf die Be-

Bewegung der Sonne und einiger sie umgebender Feldsterne nach dem 3. Keplerschen Gesetz



wegung im galaktischen System zu ziehen. Es ist in der Tat möglich, auf statistischem Wege, d. h. durch Untersuchung eines größeren Kollektivs von Feldsternen, sowohl in den Radialgeschwindigkeiten als auch in den Eigenbewegungen Effekte festzustellen, die man erwarten sollte, wenn die gemachten Voraussetzungen im Durchschnitt zutreffen, wenn nämlich die Bewegung in kreisförmigen Bahnen um das Zentrum bei Gültigkeit der Geschwindigkeits-Abstandsbeziehung $v \sim r^{-1/2}$ (3. Keplersches Gesetz) verläuft. In der schematischen Abbildung sehen wir die Sonne umgeben von Sternen in allen möglichen galaktischen Längen L, wobei aus praktischen Gründen die Längendifferenz $L-L_0$ (für 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°) ringsum aufgetragen ist. Jeder einzelne Stern soll sich gemäß unserer Annahme auf einer Kreisbahn um das galaktische Zentrum bewegen, das in großer Entfernung nach unten hin gelegen sein soll. Würde das Gebiet der Feldsterne unseres Milchstraßensystems starr wie ein Rad rotieren, so änderte sich am Anblick der Sonnenumgebung nichts. Nach dem 3. Keplerschen Gesetz ist aber die Geschwindigkeit V der näher beim Zentrum umlaufenden Sterne größer als die der Sterne, die in weiterem Abstande einherlaufen. Daraus folgt z. B. für die Radialgeschwindigkeit das in der Abbildung dargestellte Verhalten. Für den bei $L-L_0 = 45°$ stehenden Stern ist die in Richtung Sonne–Stern liegende Geschwindigkeitskomponente um den Betrag des kleinen Pfeiles größer als die entsprechende Komponente der Sonne. Der Stern entfernt sich also in diesem Maße von der Sonne, die Spektrallinien sind nach dem langwelligen Bereich (rot) verschoben. Je größer der Abstand des Sternes von der Sonne in dieser Richtung

ist, desto größer wird wegen der gleichermaßen anwachsenden Geschwindigkeitsdifferenz dieser Effekt sein. An den Stellen $L-L_0 = 0°$, $90°$, $180°$ und $270°$ verschwindet der Effekt der Radialgeschwindigkeit: bei 0° und 180°, weil die beiden Geschwindigkeitsvektoren mit dem der Sonne parallel liegen, bei 90° und 270°, weil sie gleich groß sind. Das Verhalten der Eigenbewegungen in Abhängigkeit von der galaktischen Längendifferenz $L-L_0$ ergibt sich in ähnlicher Weise, wenn man berücksichtigt, daß die Geschwindigkeitsvektoren der betrachteten Sterne zufolge ihrer Bewegung auf Kreisbahnen in dem Gebiet der voraus- und zurückliegenden Gestirne nicht parallel zueinander sind. Aus der rechnerischen Analyse dieser Effekte können weiterhin Rückschlüsse gezogen werden auf die Größe des Abstandes der Sonne vom galaktischen Zentrum und der Zentralmasse unseres Milchstraßensystems. Man hat auf diese Weise den Abstand zu $r_\odot = 8{,}2$ kpc und die Masse des Milchstraßenkerns zu $\mathfrak{M}_G = 1{,}3 \cdot 10^{11}$ Sonnenmassen, $\mathfrak{M}_\odot$, ermittelt.

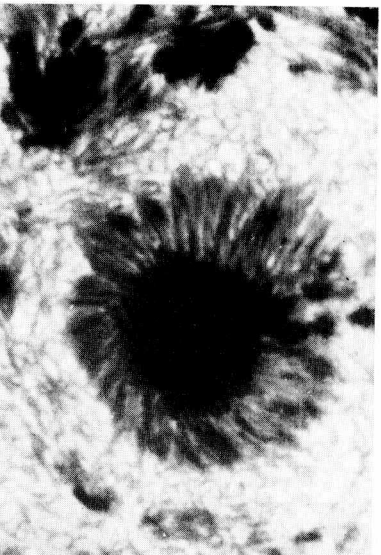
Die Physik der Sterne

Die bisherigen Betrachtungen eröffneten uns einen Überblick über die Ergebnisse, die vom Aufbau und von den Bewegungsverhältnissen unseres Milchstraßensystems gewonnen wurden. Dabei konnte man immer wieder darüber staunen, wie es möglich war, mit Hilfe astronomischer und teilweise auch schon physikalischer Überlegungen in so große Raumestiefen einzudringen. Das Erreichte läßt die kühnsten Hoffnungen selbst der Begründer des astronomischen Weltbildes am Ausgang des Mittelalters weit hinter sich. Kopernikus, Brahe, Galilei und Kepler, denen die Fixsterne noch unausdenkbar fern lagen, würden von der geistigen Besitzergreifung unseres Sternsystems mit Verwunderung und Begeisterung Kenntnis nehmen. Gewiß haben die genannten Großen die grundsätzliche Möglichkeit der Erkenntnis unseres Sternsystems bereits zu ihrer Zeit klar im Bewußtsein getragen. An dieser Möglichkeit zweifeln, hieße der exakten Naturwissenschaft unnatürliche

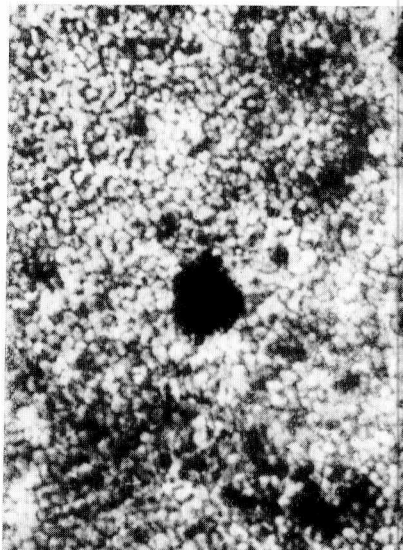
Sonne mit Flecken und Randverdunklung

Tafel IX

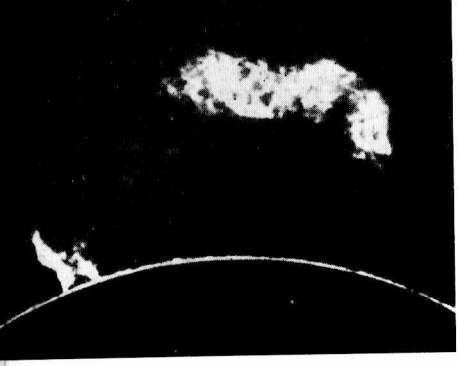
Fleck mit Penumbra



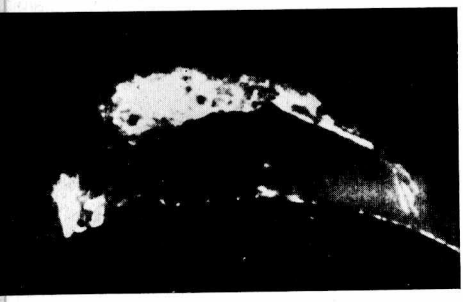
Granulation der Sonne mit kleinen Flecken und Poren



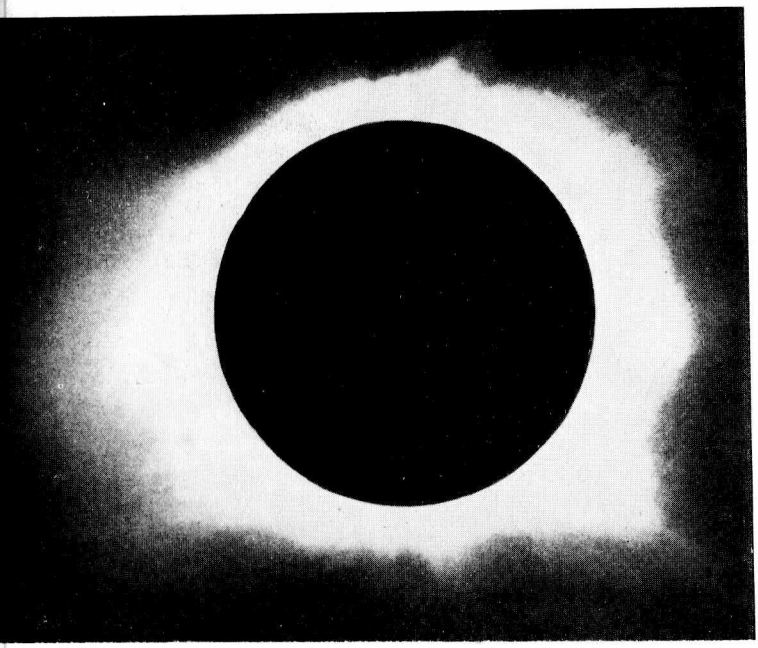
Tafel X



Aufsteigende Protuberanzen (Aufnahmen von Pettit am Mount Wilson)



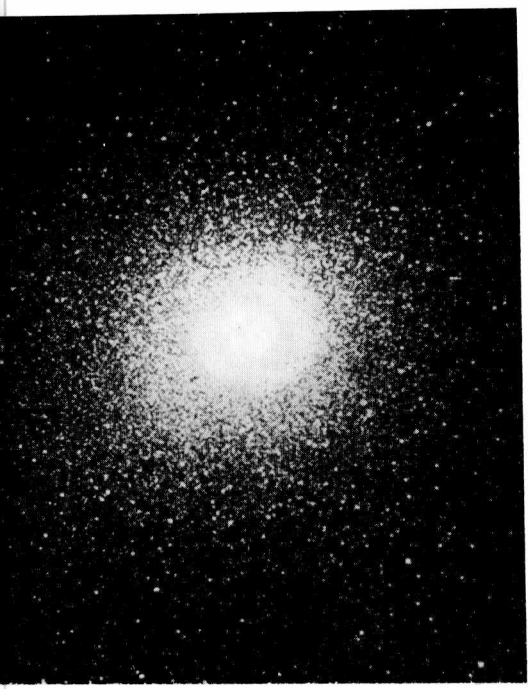
Sonnenkorona (Minimumstyp)



Tafel XI *Der Eulennebel (M 97) im UMa*

Die Plejaden (Aufnahme von E. Bartl, Sternwarte Apolda)

Tafel XII



Kugelsternhaufen im Sternbild Herkules (M 13)

Grenzen setzen. Doch wenn zur damaligen Zeit jemand den Entschluß gefaßt hätte, die chemische Zusammensetzung und die Temperaturverhältnisse der Sterne zu untersuchen, so wären wohl selbst die kühnsten Forscher skeptisch geworden. Gewiß nicht, weil sie daran zweifelten, daß die Welt erforschbar ist, sondern weil sie wußten, daß die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse ihrer Tage zu diesem Wagnis noch nicht ausreichten, daß höchstens die Möglichkeit wissenschaftlich bemäntelter Phantasie bestand. Gegen diese Art Träumerei kämpft jedoch der Forscher jederzeit ebenso eifrig wie gegen die Unwissenheit selbst.

Vor etwa 100 Jahren wurde mit der Begründung der qualitativen Spektralanalyse durch KIRCHHOFF und BUNSEN der Grundstein zu einer wissenschaftlichen Astrophysik gelegt. Damit waren eine neue Erkenntnisquelle und ein neuer Forschungsbereich für die Astronomie erschlossen. Doch es war erst ein Anfang. Seit der Feststellung der Absorptionslinien im Sonnenspektrum durch FRAUNHOFER im Jahre 1814 waren 46 Jahre vergangen. Die nächsten 46 Jahre sollten eine unerwartet rasche Entwicklung der theoretischen Physik bringen, die ihrerseits die Voraussetzung für die Fortschritte und Erfolge der Astrophysik geschaffen hat. Mit der Entzifferung der Hieroglyphen des Lichtes, der Sprache der elektromagnetischen Strahlung, begann diese Entwicklung. Vor den Gesetzen der Strahlung, deren Krönung das Plancksche Gesetz für den Schwarzen Körper darstellt, hatte man bereits mit Hilfe der beiden Hauptsätze der Thermodynamik und des schon im 17. Jahrhundert entdeckten Gasgesetzes versucht, eine Vorstellung über die Zustände in den Sternen zu gewinnen. Ein volles Verständnis für die Einzelheiten eines Sternspektrums war grundsätzlich erst mit Hilfe der Erkenntnisse der sogenannten *Quantentheorie* möglich. Zu ihrem Arbeitsbereich gehört vor allem die Erforschung der Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie.

Es ist nicht zu erwarten, daß die Fixsterne alle gleichartig aufgebaut und zusammengesetzt sein werden. Man unterscheidet sie daher nach verschiedenen Merkmalen, die man

meist als *Zustandsgrößen* bezeichnet, weil sie es sind, die den physikalischen Zustand eines Sternes charakterisieren. Einige dieser Zustandsgrößen werden unmittelbar aus Beobachtungen gewonnen, andere wieder aus den zuerst gewonnenen abgeleitet. Die zwölf Zustandsgrößen sind 1. die *Leuchtkraft*, 2. das *Spektrum*, 3. die *effektive Temperatur*, 4. der *Radius*, 5. die *Masse*, 6. die *Rotationsdauer*, 7. das *Magnetfeld*, 8. die *Abplattung*, 9. die *chemische Zusammensetzung*, 10. die *mittlere Energieerzeugung*, 11. die *mittlere Dichte* und 12. die *Schwerebeschleunigung an der Oberfläche*. Zwischen diesen Größen bestehen gewisse gesetzmäßige Beziehungen. Im folgenden sollen die wichtigsten dieser Größen etwas eingehender besprochen werden.

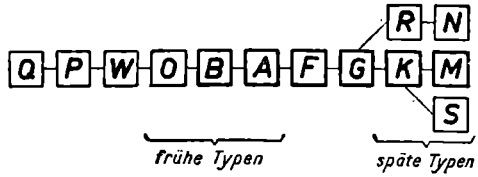
Leuchtkraft. Als Leuchtkraft L eines Sternes bezeichnet man die von ihm innerhalb einer Sekunde insgesamt ausgestrahlte Energie. Von dieser Strahlungsleistung fällt, wenn der Stern sich im Abstand r befindet, auf eine senkrecht zur Strahlungsrichtung gestellte Auffangfläche von $Q = 1\ \mathrm{cm}^2$ der Strahlungsstrom

$$S_b = \frac{L}{4\pi r^2}\left[\frac{\mathrm{erg}}{\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{s}}\right].$$

Der Index b bedeutet *bolometrisch* und besagt, daß es sich um Sternstrahlung aller Wellenlängen handelt. Die bolometrische Sternhelligkeit $\mathrm{m}_b = c_b - 2{,}5 \lg S_b$ wird auf dem Umwege über die photographische oder photovisuelle Helligkeit m_{pg} oder m_{pv} bestimmt. Mit Hilfe der Sternparallaxe p erhält man die absolute bolometrische Helligkeit $\mathrm{M}_b = \mathrm{m}_b + 5 + 5 \lg p$ und schließlich aus der Beziehung $\mathrm{M}_b = 88{,}6 - 2{,}5 \lg L$ die Leuchtkraft L des betreffenden Sternes. Aus praktischen Gründen gibt man die Leuchtkraft vielfach in Einheiten der Leuchtkraft unserer Sonne an.

Spektrum, Leuchtkraftklassen und HERTZSPRUNG-RUSSEL-*Diagramm*. Das Spektrum eines Sternes besteht aus dem kontinuierlichen Untergrund, kurz *Kontinuum* genannt, und den *Absorptions-* bzw. gelegentlich auch *Emissionslinien*, die sich dunkel oder hell vom Untergrund abheben. Das Licht eines Sternes stammt also aus verschiedenen Tiefen

Schematische Darstellung der Spektralklassifikation

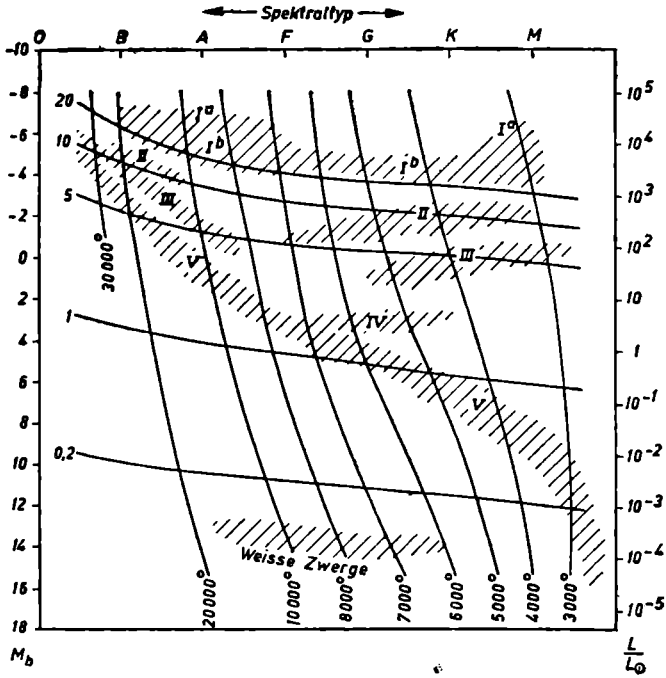


der Außenschichten dieses selbstleuchtenden Himmelskörpers. Da die Temperatur der Sterngase mit zunehmender Tiefe ebenfalls ansteigt, die Menge und Art der Strahlung aber wesentlich von der Temperatur abhängen, erhalten wir von dem Stern ein Gemisch verschiedenartigster Strahlen, die aus verschiedenen Tiefen der äußeren Schichten stammen.

Aus dem Vorkommen und dem Intensitätsverhältnis bestimmter Linien wird der Spektraltyp eines Sternes festgestellt. 99% aller Sterne lassen sich in die sechs Hauptspektralklassen einordnen, die mit den Buchstaben B, A, F, G, K, M bezeichnet werden. In dieser Folge stellt die Spektralreihe eine Skale abnehmender Oberflächentemperatur dar. Sterne mit noch höheren Oberflächentemperaturen sind die O-Sterne, die sogenannten Wolf-Rayet-*Sterne des Typs* W, die Zentralsterne der *planetarischen Nebel*, die sogenannten P-*Sterne* und die *Neuen Sterne* oder *Novae* bzw. *Supernovae* Q. Bei den kühlen Sternen kennt man noch die Klasse der R- und N- und der S-*Sterne* (Abb.). Zur genaueren Festlegung der Spektraltypen hat man noch eine dezimale Unterteilung eingeführt. So ist unsere Sonne z. B. ein G2-Stern.

Aus bestimmten Feinheiten der Linien und aus Intensitätsverhältnissen kann die *Leuchtkraftklasse* eines Sterns bestimmt werden. Diese Unterscheidung von Sternen des gleichen Spektraltyps ist notwendig, weil es Sterne sehr unterschiedlicher Leuchtkraft gibt, die demselben Spektraltyp angehören. Mit den Leuchtkraftklassen I bis V werden folgende Sterngruppen gekennzeichnet: I. Übergiganten, II. Helle Giganten, III. Giganten, IV. Untergiganten, V. Zwerge oder Hauptreihensterne (Abb. s. nächste Seite).

Trägt man die Sterne ihrer Leuchtkraft L (bzw. der absoluten bolometrischen Helligkeit M_b) gemäß gegen ihren Spektraltyp auf, so ist die von den Sternen überdeckte Fläche des



Die Leuchtkraftklassen der Sterne

Diagramms, das nach den beiden Forschern Hertzsprung und Russel benannt ist, nicht gleichförmig von Sternpunkten erfüllt, sondern man erhält gewisse Häufungsbereiche. Sie sind als schraffierte Gebiete mit den entsprechenden römischen Zahlen versehen. Die von oben nach unten verlaufenden Linien sind Isothermen (Linien gleicher Temperatur), und die von links nach rechts schwach fallenden Linien verbinden die Orte von Sternen gleicher Masse. In der früheren, aber heute noch in den meisten Büchern üblichen Spektralklassifikation unterschied man nur drei Klassen bei denselben Spektraltypen: die Übergiganten (vor den Typ wurde ein kleines c gestellt, z. B. cB2), die Giganten, z. B. gG1, und die Zwerge, z. B. unsere Sonne dG2, die in der neuen Bezeichnungsart mit G2V angegeben wird.

Das Vorkommen bestimmter Linien ist an eine entsprechende Temperatur und Dichte (bzw. den entsprechenden Druck) der Gase, also an geeignete Anregungsbedingungen gebunden. Wenn also z. B. im Spektrum Linien eines bestimmten chemischen Elementes vorherrschen, Linien anderer Stoffe aber nicht festzustellen sind, so ist dies kein Beweis dafür, daß der eine Stoff vorhanden ist, die anderen aber fehlen; vielmehr hat sich auf Grund spektralanalytischer Untersuchungen, deren Zweck eine mengenmäßige Bestimmung der verschiedenen Grundstoffe war, herausgestellt, daß der Wasserstoff, H, in den Sternen wie überhaupt im Weltall weitaus das häufigste Element ist. An zweiter Stelle steht das Helium, He, dann folgen in weitem Abstand die anderen, schwereren Kerne. In Prozenten der Anzahlen $N(Z)$ und der Massenhäufigkeit $M(Z)$ ausgedrückt erhält man für die zehn häufigsten Elemente die in der Tabelle gegebene Übersicht. Dieses Ergebnis ist von außerordentlicher Bedeutung; denn die Häufigkeitsverteilung der verschiedensten Arten von Atomkernen im Weltall ist ein wesentliches Faktum, dessen Erklärung zu den Aufgaben der Kosmologie bzw. in das Arbeitsgebiet der Kosmogonie gehört. Die Frage der Entstehung oder genauer der Bildung kosmischer Materie aus den Elementarteilchen sowie die ihrer Weiterentwicklung im Inneren der Sterne und damit die der ver-

Die zehn häufigsten Elemente

Element		Kernladungszahl Z	Anzahl in %	Masse in %
Wasserstoff	H	1	83,9	55,6
Helium	He	2	15,9	42,1
Sauerstoff	O	8	0,07	0,72
Neon	Ne	10	0,06	0,86
Stickstoff	N	7	0,02	0,19
Kohlenstoff	C	6	0,013	0,10
Eisen	Fe	26	0,006	0,24
Magnesium	Mg	12	0,004	0,07
Silizium	Si	14	0,004	0,07
Schwefel	S	16	0,001	0,03
			99,978 %	99,98 %

schiedenartigen chemischen Zusammensetzung stellarer Massenanhäufungen hängt mit diesen Ergebnissen eng zusammen. Auf diesem heute noch wenig durchforschten Gebiet liegen begreiflicherweise noch verhältnismäßig wenig Ergebnisse vor.

Die Abhängigkeit der Intensität der Sternstrahlung kann aus dem kontinuierlichen Untergrund der Spektren (vgl. Tafel VIII) entnommen werden. Dieses Kontinuum wird an den Stellen der Absorptionslinien um einen geringen Betrag geschwächt, der überdies von Linie zu Linie verschieden groß ist, sowohl was die Tiefe der Linie als auch was ihre Breite betrifft. Schon beim ersten flüchtigen Betrachten erkennt man, daß die sogenannten *frühen* Spektraltypen (B und A) weniger Linien besitzen als die *späten* (K und M). Die Bezeichnungen *früh* und *spät* in bezug auf die Sternspektren entstammen zwar einer heute überholten kosmogonischen Auffassung, sie haben sich aber so stark eingebürgert, daß sie heute noch, allerdings nur als Fachausdrücke, oft gebraucht werden. Der Grund für die Linienarmut der frühen Sterne ist die hohe Temperatur ihrer Oberflächenschichten, bei der die meisten Atome bis auf Wasserstoff und Helium zum größten Teil ionisiert sind, so daß ihre Linien nicht im sichtbaren Gebiet liegen. Je niedriger die Temperatur, desto mehr Kernarten können ihre Leuchtelektronen wieder an sich binden, desto zahlreicher werden die durch sie erzeugten Linien. Daß auch sie in den Sternatmosphären vorhanden sind, wird nun erst erkennbar. Der Linienreichtum bei den späten und kühlen Sternen enthält neben Tausenden von Atomlinien sogar einzelne Molekülbanden, wie etwa die des Titanoxyd-Moleküls, TiO.

Art und Menge der Sternstrahlung hängen in komplizierter Weise vom physikalischen und chemischen Aufbau der äußeren Schichten der Sterne ab. Ein Strahlungsgesetz, das für diesen allgemeinen Fall gültig ist, kennen wir noch nicht. Man hilft sich auf die Weise, daß man die Gesetze des schwarzen Strahlers zum Vergleich heranzieht, insbesondere das Plancksche Strahlungsgesetz, das überall dort streng gilt, wo sich ein Körper vollkommen im thermischen Gleich-

gewicht befindet, d. h. soviel Energie abgibt, wie er aus dem umliegenden Raum erhält. Daß diese Bedingung für die äußeren, in den Weltraum strahlenden Schichten eines Sternes nicht streng gelten kann, versteht sich von selbst; daß sie aber doch nahezu erfüllt ist, darf als eine unerwartete Vereinfachung betrachtet werden, die uns die Natur bietet. So gibt es hier auch eine dem *Wienschen Verschiebungsgesetz* entsprechende Beziehung, derzufolge die kühlen Sterne rötlich erscheinen und die heißen weiß bis bläulichweiß. Bei den späten Typen liegt das Maximum der spektralen Ausstrahlung im infraroten Gebiet, bei den Sternen mit Oberflächentemperaturen zwischen 4000 und 8000 °K verschiebt sich das Maximum vom roten Ende des Spektrums zum violetten, bei den frühen Typen schließlich liegt es im ultravioletten Wellenlängenbereich. Aus der Erfahrung des täglichen Lebens ist bekannt, daß ein Körper, der allmählich erhitzt wird — etwa der Glühdraht einer elektrischen Lampe —, zuerst dunkelrot leuchtet, dann über hellrot zu gelb übergeht und schließlich, wenn seine Temperatur einige tausend Grad erreicht, in blendend bläulichweißem Lichte strahlt.

Die Strahlung eines Sternes, die wir in den Meßgeräten empfangen, ist weder mengenmäßig noch ihrer spektralen Zusammensetzung nach die vom Stern ausgesandte. Außer der bereits früher behandelten Absorption durch die interstellare Materie, die eine auch von der Wellenlänge abhängige, also *selektive* Abschwächung bewirkt, ist es vor allem das quadratische Ausbreitungsgesetz der Strahlung, das die Intensität der aus der Oberfläche der Sternkugel mit dem Radius R austretenden Strahlung auf die Oberfläche einer Raumkugel mit dem Radius r gleich der Entfernung Stern–Beobachter verteilt, so daß der sogenannte Verdünnungsfaktor der Sternstrahlung $V = \left(\frac{R}{r}\right)^2$ wird. Die Sonnenstrahlung wird von der Sonnenphotosphäre bis zur Obergrenze der Erdatmosphäre auf den 46500sten Teil verdünnt, die Strahlung des Sirius dagegen auf den 4270billionten Teil $= 2{,}34 \cdot 10^{-16}$.

Die Erdatmosphäre siebt außerdem noch einen Teil aus der Sternstrahlung heraus, und zwar in Höhen über 100 km im kurzwelligen Ultraviolett; im Höhenbereich der mit Ozon angereicherten Schichten zwischen 25 und 50 km verschwindet alle Strahlung bis etwa $\lambda = 2\,900$ Å = 290 nm, und es treten in noch geringeren Höhen die starken Absorptionsbanden des Sauerstoff- (O_2-), des Wasser- (H_2O-) und des Kohlendioxyd- (CO_2-) Moleküls der Erdatmosphäre im Bereiche des Infrarot auf. Infolge der RAYLEIGH-Streuung in den untersten und dichtesten Schichten wird auch in dem noch übrigbleibenden Wellenlängenbereich die kurzwellige Strahlung stärker gestreut als die langwellige. Dieser Vorgang bewirkt bekanntlich die Blaufärbung des durchstrahlten Luftraumes und die Rotfärbung der durch die Atmosphäre betrachteten Gestirne, wobei der Farbton um so stärker ins Rötliche geht, je länger der von den Strahlen in der Atmosphäre zurückgelegte Weg ist. In welcher Weise der Lichtweg s und die Extinktion der Strahlung, ausgedrückt in Sterngrößen Δm_ε, von der Zenitdistanz abhängen, zeigt uns die Tabelle.

Lichtweg s und Extinktion Δm_ε der Sternstrahlung als Funktion der Zenitdistanz z

z	s	Δm_ε
		m
0°	1,00	0,00
20	1,06	0,02
40	1,30	0,12
60	1,99	0,38
70	2,90	0,74
80	5,60	1,78
85	10,4	3,64
89	27,0	10,1
90	40,0	15,1

Farbindex. Um eine Vorstellung von der spektralen Energieverteilung der Sternstrahlung zu gewinnen, muß man das Spektrum des betreffenden Sternes haben. Die Intensitätsmessung im Spektrum ist eine zeitraubende Arbeit und nur möglich, wenn der Stern so hell ist, daß man ihn spektralphotometrisch untersuchen kann. Aus diesen Gründen hat man schon frühzeitig nach einem Ersatz für den Spektraltyp gesucht. Ein sehr grober Ersatz ist die Farbe des Sternlichtes. Ein farbtüchtiger Beobachter kann ohne Schwierigkeit erkennen, ob es sich um einen frühen, mittleren oder späten Typ handelt. Doch bleibt die Feststellung der Farbe stets nur

ein subjektives Kriterium geringer Genauigkeit. Einen objektiven Ersatz für den Spektraltyp bietet der sogenannte Farbindex. Photographiert man ein Sternfeld — am besten gleichzeitig mit zwei gleichartigen Instrumenten — auf zwei Plattensorten, auf eine *Sternplatte*, die den blauen Spektralbereich erfaßt, und auf eine panchromatische Emulsion kombiniert mit einem bestimmten Rotfilter, so wird ein früher Spektraltyp sich auf der blauempfindlichen Platte heller abbilden als auf der rotempfindlichen. Bei einem späten Typ wird es gerade umgekehrt sein. Bildet man nun die Differenz zwischen den beiden Sternhelligkeiten, der photographischen und der photovisuellen, so wird diese bald positiv, bald negativ sein. Man nennt diese Differenz den *Farbindex FI* und schreibt $FI = m_{pg} - m_{pv}$. Die Tabelle gibt die Zuordnung des Farbindex zu den sechs Hauptspektraltypen.

Beziehung zwischen Farbindex FI und Spektraltyp, aufgeteilt nach den 3 Hauptleuchtkraftklassen

Spektraltyp	*FI*		
	Zwerge	Riesen	Überriesen
O5	−0,45		
B0	−0,42		
A0	−0,17		
F0	+0,15	+0,22	
F5	+0,28	+0,40	+0,34
G0	+0,42	+0,60	+0,70
G5	+0,58	+0,82	+1,05
K0	+0,77	+1,06	+1,41
K5	+1,08	+1,35	
M0	+1,31	+1,50	

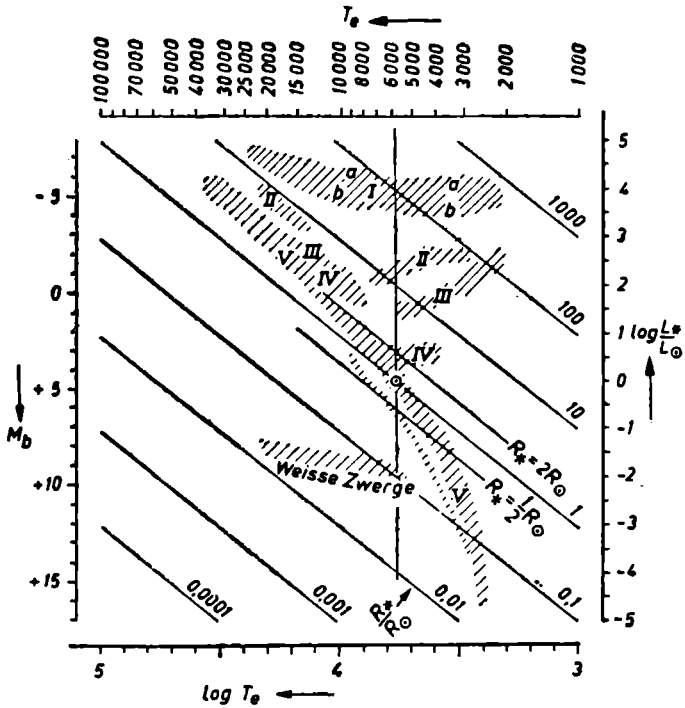
Effektive Temperatur. Noch enger ist der Farbindex mit der *Oberflächentemperatur* der Sterne verknüpft, die wesentlich auch die Farbe des Sternes bestimmt. Das Problem, diese Zustandsgröße zu bestimmen, erscheint bei der großen Entfernung der Sonne und der Sterne so gut wie aussichtslos. Doch darf man nicht übersehen, daß diese hohen Temperaturen niemals direkt meßbar sein können, sondern stets nur indirekt aus der Strahlung bestimmt werden müssen. Schon die für irdische Begriffe hohen Temperaturen von Flammen,

Glühdrähten oder Metallschmelzen werden durch Strahlungsmessungen ermittelt. Im Prinzip das gleiche Verfahren wird bei den Sternen angewandt. Die für unsere Betrachtungen wichtigste Temperatur ist die *effektive* T_e. Ihr Begriff sei am Beispiel der Sonne erläutert.

Von der enormen Strahlungsfülle der Sonne gelangt, wie wir bereits wissen, nur ein bescheidener Bruchteil zur Erde, wird von der Erdatmosphäre in der oben beschriebenen Weise noch weiter geschwächt und kann dann schließlich gemessen werden. Bezieht man den gemessenen Leistungsstrom auf die obere Grenze der Erdatmosphäre und gibt die Energie an, die in 1 Sekunde durch 1 Quadratzentimeter einfällt, so hat man die sogenannte *Solarkonstante* $S = 1{,}37 \cdot 10^6$ [erg cm^{-2} s^{-1}] bestimmt. Da die Sonne aber offenbar nicht nur auf den eben betrachteten Quadratzentimeter im Abstande $r = 1$ AE diesen Leistungsstrom schickt, sondern in alle Richtungen des Raumes, so braucht man die Solarkonstante nur mit der Anzahl der Quadratzentimeter der Oberfläche der Kugel, deren Radius der Erdbahnhalbmesser ist, zu multiplizieren und erhält dann die Leuchtkraft der Sonne $L = 3{,}86 \cdot 10^{33}$ [erg s^{-1}]. Da diese Leistung laufend aus dem Sonneninneren durch die Oberfläche in den Weltraum hinausgestrahlt wird, liegt die folgende Frage nahe: *Wie heiß muß die Oberfläche eines Körpers von der Größe der Sonne sein, wenn er die gleiche Leistung wie sie ausstrahlen soll?* Da die so definierte Temperatur den gleichen Strahlungseffekt hervorbringen soll wie die tatsächlichen Temperaturen der Außenschichten der Sonne, so nennt man sie ihre *effektive Temperatur* und erkennt, daß sie im Grunde genommen nichts anderes ist als ein *Maß für die Gesamtstrahlung*. Aus den angegebenen Zahlen findet man als effektive Temperatur der Sonne $T_\odot = 5785$ °K, und zwar nach dem aus der Planckschen Strahlungsformel folgenden Gesetz für die Gesamtstrahlung des Schwarzen Körpers. Dieses Gesetz wurde unabhängig und bereits *vor* der Planckschen Strahlungsformel im vorigen Jahrhundert von Stefan und Boltzmann gefunden. Nach ihm gilt für die Gesamtstrahlung eines kugelförmigen Körpers $L = 4\pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$.

Wenn für die Strahlungskonstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-5}$ [erg $\cdot$ cm^{-2} s^{-1} grd^{-4}] eingesetzt wird und die Leuchtkraft $L_\odot$ und der Sonnenradius $R_\odot$ bekannt sind, kann die effektive Temperatur der Sonne berechnet werden. Schwieriger ist es, die effektiven Temperaturen für die Fixsterne zu bestimmen.
Betrachten wir die Oberflächentemperaturen der Fixsterne, so ergibt ein Vergleich mit irdischen Verhältnissen, daß die Materie in den Außenschichten der Sterne weder fest noch flüssig, sondern nur gasförmig sein kann. Theoretische Überlegungen sowohl als auch die Beobachtungen eruptiver Vorgänge auf der Sonne zeigen, daß die Temperatur nach innen hin ansteigt, so daß man zu dem Schluß gelangt, daß die Sonne und somit auch die Sterne durch und durch aus Gas bestehen

Radius und Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm. Der *Radius* des Sternes als Maß für die lineare Größe der Sterngaskugel tritt in Verkettung mit zwei anderen Zustandsgrößen äußerst anschaulich im *Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm* in Erscheinung. Dieses *TL*-Diagramm, wie man es abgekürzt bezeichnet, ist eine Abart des zuerst entworfenen HERTZSPRUNG-RUSSEL-*Diagramms*, auch als *Farben-Helligkeits-Diagramm* bezeichnet, gewissermaßen seine Übertragung ins Physikalische. An die Stelle der Farbe bzw. des Spektraltyps tritt hier die effektive Temperatur, und die bolometrische Helligkeit wird durch die Leuchtkraft ersetzt. Das Bild der Verteilung der Sterne im *TL*-Diagramm (s. Abb. nächste Seite) unterscheidet sich nicht grundsätzlich vom Aussehen des HERTZSPRUNG-RUSSEL-Diagramms.
Sucht man den Bildpunkt der Sonne $\odot$ entsprechend $T_e = 5785$ °K (lg $T_e = 3{,}762$, in der Astronomie wird oft auch das Zeichen log für den dekadischen Logarithmus verwendet; vgl. Abb. nächste Seite) und $\frac{L_*}{L_\odot} = 1$ auf und denkt sich durch ihn zwei Parallele zu den Koordinatenachsen gelegt, so wird das ganze Feld in vier Rechtecke aufgeteilt. Ganz allgemein kann man feststellen, daß alle

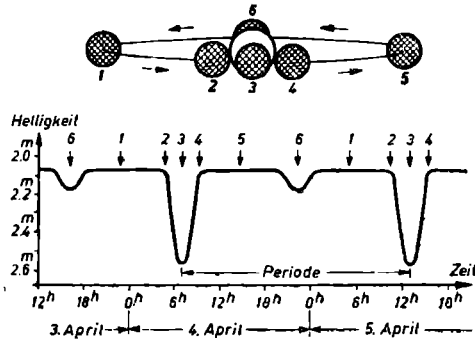


Das Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm

Sterne, die oberhalb der gedachten Waagerechten durch den Sonnenpunkt gelegen sind, hinsichtlich der Gesamtstrahlung, also bolometrisch, heller sind als unser Tagesgestirn, die darunterliegenden jedoch eine geringere Leistung abstrahlen; alle Sterne, deren Bildpunkte sich rechts von der Senkrechten befinden, haben eine geringere Oberflächentemperatur als die Sonne, strahlen also je Oberflächeneinheit weniger aus als die Sonne, und schließlich alle links von der Senkrechten liegenden entsprechend mehr, und zwar in um so stärkerem Maße, je weiter sie von der Geraden entfernt sind. Zeichnet man nun schließlich noch die Gerade, auf

der alle Sterne liegen müßten, die bei gleicher Größe wie die Sonne alle möglichen Temperaturen des betrachteten Bereiches haben, so erhält man die von links nach rechts geneigte Gerade $\lg \frac{L_*}{L_\odot} = 4 \lg T_e - 15{,}05$ und erkennt sofort, daß die Sterne der Hauptreihe nach links oben in zunehmendem Maße größer sein müssen als die Sonne, nach rechts unten aber kleiner. In der ersten Richtung kommt man auf der Hauptreihe in das Gebiet der *Weißen Riesen*, in der entgegengesetzten Richtung in den Bereich der *Roten Zwerge*. Gehen wir jetzt auf der Senkrechten durch den Sonnenpunkt nach oben bis zum Punkt $\frac{L_*}{L_\odot} = 4$ bzw. nach unten bis zum Punkt $\frac{L_*}{L_\odot} = 0{,}25$, so können diese Unterschiede in der Leuchtkraft zufolge der gleichgebliebenen Temperatur nur die Folge einer um die genannten Beträge größeren bzw. kleineren strahlenden Fläche sein. Da der Radius proportional der Quadratwurzel aus der Oberfläche beziehungsweise dem Querschnitt ist, so haben wir in den Schnittpunkten der Waagerechten $\frac{L_*}{L_\odot} = 4$ bzw. $\frac{L_*}{L_\odot} = 0{,}25$ mit der Senkrechten $\lg T_e = 3{,}762$ die Bildpunkte zweier Sterne, von denen der obere einen doppelt so großen, der untere aber einen halb so großen Radius hat wie die Sonne. Zwei Parallelen zur schrägen Geraden durch diese beiden Schnittpunkte verbinden die Bildpunkte aller Sterne mit doppeltem bzw. halbem Sonnenradius. Gemäß diesen Überlegungen kann man das ganze Feld des *TL*-Diagramms mit schrägen Parallelen überziehen und erkennt dann unmittelbar, daß die am weitesten ausgedehnten Sterne die *Roten Überriesen* sind, die kleinsten dagegen im Bereich der *Weißen und Roten Zwerge* liegen.

Die *photometrische Methode* der Bestimmung von Sternradien setzt einen Doppelstern vom Typ der *Bedeckungsveränderlichen* voraus. Es handelt sich also um zwei leuchtende Sonnen, die sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen, und zwar in einer Ebene, die nahezu in Richtung



Zur Erklärung der Vorgänge bei einem Bedeckungsveränderlichen

zur Sonne, also auch zum Beobachter liegt, so daß sich während eines Umlaufs zweimal eine gegenseitige Bedeckung ereignet. Im oberen Teil der Abbildung sieht man die Bahn der lichtschwächeren Komponente eines optischen Doppelsterns relativ zur helleren Komponente, in Wirklichkeit bewegen sich beide um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Die sechs hervorgehobenen Phasen der relativen Bahn sind in der darunter befindlichen Lichtkurve angegeben: 1 Normallicht, hell; 2 Beginn, 3 Mitte und 4 Ende des Hauptminimums; 5 Normallicht; 6 Mitte des Nebenminimums. Die Dauer der Periode des Lichtwechsels beträgt 30^h, sie wird meist vom Hauptminimum zum nächsten Hauptminimum gerechnet; die Dauer der Minima beträgt etwa 5^h. Im allgemeinen werden die beiden Komponenten dieses Doppelsternes nicht die gleiche Oberflächentemperatur besitzen. Dann wird, wenn die beiden Sterne ungefähr die gleiche Größe haben, wie es meist der Fall ist, die Helligkeitsabnahme bei der Bedeckung des heißen Sternes stärker sein (*Hauptminimum*) als bei der Bedeckung des kühleren durch den heißeren (*Nebenminimum*). Aus der Dauer der beiden Minima im Verhältnis zur Dauer der ganzen Periode des Lichtwechsels und aus der Form des Helligkeitsabfalles läßt sich die Größe der beiden Sterne in Einheiten des Bahnradius angeben. Kennt man von einem solchen Bedeckungsveränderlichen außerdem noch den Verlauf der Radialgeschwindigkeit während einer Periode des Lichtwechsels, so kann man die Dimensionen der beiden Sterne einschließlich des Bahnradius auch in metrischen Einheiten ausdrükken. Komplizierter werden die Berechnungen, wenn die

Bahn stark elliptisch ist, was aus der Kurve der Radialgeschwindigkeit bzw. aus der unsymmetrischen Lage der Minima zu erkennen ist, wenn ferner die beiden Körper so nahe umeinander kreisen, daß sie durch gegenseitige Anziehung (Flutkräfte) und durch die starken dabei auftretenden Zentrifugalkräfte eine von der Kugelgestalt merklich abweichende Körperform erhalten, oder wenn zufolge sehr unterschiedlicher Oberflächentemperaturen der beiden Komponenten die Beleuchtung der lichtschwächeren Sonne durch die hellere noch weitere Besonderheiten hervorruft. In der Tabelle sind für sieben Bedeckungsveränderliche die Spektraltypen und Radienverhältnisse gegeben.

Verhältnis der Sternradien R_* von Bedeckungsveränderlichen zum Sonnenradius $R_\odot$

Stern	Spektren		Radienverhältnis $R_*/R_\odot$	
ζ Aurigae	K5	B9	293	4
β Aurigae	A0	A0	2,8	2,8
α Geminorum				
Begleiter C	M1	M1	0,6	0,6
V Puppis	B1	B3	8,4	7,7
W Ursae Majoris	F8	F8	0,8	0,8
Z Herkulis	F2	F2	1,8	3,3
σ Aquilae	B8	B8	3,6	3,6

Nun werden zur Übersicht in einer Tabelle die Radienverhältnisse für die wichtigsten Leuchtkraftklassen der Sterne im *TL*-Diagramm mitgeteilt. Gleichzeitig sind auch die effektiven Temperaturen T_e derselben Sternklassen gegeben, die vom Radienverhältnis abhängig sind, wie aus der Formel $\lg T_e = 3{,}762 + 0{,}25 \lg \frac{L_*}{L_\odot} - 0{,}5 \lg \frac{R_*}{R_\odot}$ hervorgeht. Es zeigt sich, daß einem bestimmten Spektraltyp nur innerhalb bestimmter Leuchtkraftklassen eine bestimmte Temperatur eindeutig zugeordnet ist.

Masse. Die Masse $\mathfrak{M}$ der Sterne ist eine der wichtigsten Größen, die den physikalischen Zustand und die Entwicklung eines Sternes wesentlich bestimmen. Sie ist die Mitgift,

Übersicht über die Radienverhältnisse $R_*/R_\odot$ und die effektiven Temperaturen der hauptsächlichsten Sternklassen im TL-Diagramm

Sp	$R_*/R_\odot$				T_e [°K]			
	HR	R	ÜR	WZ	HR	R	ÜR	WZ
O5	20				23000			
B0	9		20		18300		25800	
B5	3,9		30		13900		14500	
A0	2,2		40	0,020	10900		10300	6120
A5	1,7		50	0,020	8750		7700	5780
F0	1,5		63	0,018	7530		6500	5460
F5	1,2		80	0,016	6560		5450	5150
G0	1,0	10	100		6260	4540	4860	
G5	0,9	15	125		5780	4240	4600	
K0	0,83	24	200		5030	3520	3860	
K5	0,75	48	400		4000	3320	3250	
M0	0,60	76	500		3730	2960	2760	
M5	0,25	160	800		3650	2280	2400	

Sp Spektraltyp, HR Hauptreihensterne, R Riesensterne, ÜR Überriesen, WZ Weiße Zwerge

die der einzelne Stern bei seiner Geburt von der Natur aus erhalten hat und die seinen Lebensweg im wesentlichen vorzeichnet. Die Masse ist zwar eine dynamische Größe, die entweder als träge Masse den Widerstand angibt, den ein Körper seiner Inbewegungsetzung entgegenstellt, oder die als schwere Masse selbst die Kraft bestimmt, die zwischen den Himmelskörpern wirkt; aber sie ist auch das Maß für die Menge der Materie, die den betrachteten Körper bildet. Über ihre Größe können wir nur etwas erfahren, wenn es uns gelingt, in dem von ihr hervorgerufenen Gravitationsfelde das Verhalten eines oder mehrerer Körper zu beobachten.

Für unser Problem ist vor allem das 3. Keplersche Gesetz maßgebend, um bei den *visuellen, photometrischen* oder *spektroskopischen Doppelsternen* eine Massenbestimmung durchzuführen. Für unseren Fall vereinfachen wir das 3. Keplersche Gesetz dadurch, daß wir die große Halbachse in AE, die Umlaufzeit in Jahren und die Massen in Sonnenmassen ausdrücken. In dieser normierten Form haben wir $\frac{a^3}{U^2} = \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2$; wenn aus den Beobachtungen die Umlaufzeit U

des Doppelsternes und die große Halbachse a bekannt sind, erhält man die Summe der Massen beider Komponenten in Sonnenmassen. So sind bei den sogenannten *photometrischen Doppelsternen*, die wir bereits als *Bedeckungsveränderliche* kennengelernt haben, die Dimensionen des Systems bei gleichzeitiger Kenntnis der Radialgeschwindigkeit bestimmbar. Für die in der Tabelle Seite 175 enthaltenen Bedeckungsveränderlichen sind in der folgenden Tabelle die Massenverhältnisse $\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$ und die mittleren Dichten $\bar{\varrho}$ mitgeteilt, die nach dieser Methode sich ergeben.

Massenverhältnisse $\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$ und mittlere Dichten $\bar{\varrho}$ für sieben photometrische Doppelsterne

Stern	$\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$		$\bar{\varrho}$ · [g/cm³]	
ζ Aur	32	13	0,0000013	0,2
β Aur	2,4	2,4	0,11	0,11
α Gem C	0,5	0,5	2,6	2,6
V Pup	19	19	0,044	0,058
W UMa	0,7	0,5	2,1	1,5
Z Her	1,6	1,3	0,29	0,04
σ Aql	6,2	5,1	0,15	0,12

Eine Zusammenstellung auf diesem Wege gewonnener mittlerer Massen, in der Hauptsache für die Sterne der Hauptreihe, enthält die folgende Tabelle. Die angeführten Spektraltypen sind ebenfalls Mittelwerte, und zwar jeweils aus der Anzahl N gebildete.

Mittelwerte von Gesamtmassen spektroskopischer Doppelsterne, von den weißen Überriesen entlang der Hauptreihe des TL-Diagramms bis zu den gelbroten Zwergen

Spektraltyp	Anzahl N	$\overline{\mathfrak{M}}$
O 8	5	31
B 1	11	15
B 3	13	11
B 5	7	9
A 2	13	2,7
F 2	16	2,0
G 5	4	1,7
K 8	2	0,7

Dichte. Mit der Kenntnis von Masse und Radius der Sterne ist auch die *mittlere Dichte* $\bar{\varrho}$ gewonnen. Für die gleichen Sternklassen, deren Radienverhältnisse und effektive Temperaturen in der Tabelle Seite 176 zu finden sind,

seien in einer Tabelle nun die Massenverhältnisse und die mittleren Dichtewerte gegeben. Über den mechanischen Aufbau der Sternkugeln sind somit alle wesentlichen Größen bekannt.

Massenverhältnisse $\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$ und mittlere Dichte ϱ für Sterne verschiedener Spektraltypen Sp und Leuchtkraftklassen

Sp	$\mathfrak{M}/\mathfrak{M}_\odot$				ϱ · [g/cm³]			
	HR	R	ÜR	WZ	HR	R	ÜR	WZ
O5	32		160		$5{,}6\cdot10^{-3}$			
B0	16		50		$3{,}2\cdot10^{-2}$		$9{,}0\cdot10^{-2}$	
B5	5,9		25		$1{,}0\cdot10^{-1}$		$1{,}2\cdot10^{-2}$	
A0	3,0		16	0,56	$2{,}6\cdot10^{-1}$		$3{,}5\cdot10^{-1}$	$1{,}0\cdot10^{5}$
A5	2,0		13	0,56	$3{,}8\cdot10^{-1}$		$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}0\cdot10^{5}$
F0	1,5		11	0,63	$4{,}8\cdot10^{-1}$		$7{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}6\cdot10^{5}$
F5	1,2		10	0,71	$6{,}8\cdot10^{-1}$		$2{,}8\cdot10^{-5}$	$2{,}5\cdot10^{5}$
G0	1,0	3,1	10		$9{,}6\cdot10^{-1}$	$2{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$	
G5	0,87	3,2	11		1,2	$1{,}0\cdot10^{-3}$	$6{,}3\cdot10^{-6}$	
K0	0,76	3,5	13		1,3	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-6}$	
K5	0,62	3,6	15		1,5	$3{,}3\cdot10^{-5}$	$3{,}5\cdot10^{-7}$	
M0	0,49	3,8	16		2,2	$8{,}7\cdot10^{-6}$	$2{,}2\cdot10^{-7}$	
M5	0,22		20		14		$5{,}6\cdot10^{-8}$	

Die Sonne als strahlender Stern

Der uns am nächsten stehende Stern der Milchstraße ist die Sonne. Die hier interessierenden Zustandsgrößen sind in der Tabelle gegeben.

Die wichtigsten Zustandsgrößen der Sonne

Leuchtkraft	$L = 3{,}86 \cdot 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$
Masse	$\mathfrak{M} = 1{,}99 \cdot 10^{33}$ g
Temperatur	$T_e = 5786$ °K
Radius	$R = 6{,}96 \cdot 10^{10}$ cm
mittlere Dichte	$\bar{\varrho} = 1{,}41 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
mittlere Energieerzeugung	$\bar{\varepsilon} = 1{,}94 \frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{s}}$
Schwerebeschleunigung an der Oberfläche	$g = 2{,}74 \cdot 10^4 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
Rotationsdauer (siderisch)	$U_* = 25$ bis 31 Tage

Wegen der relativ geringen Entfernung des Tagesgestirns von der Erde ($r = 1{,}496 \quad 10^{13}$ cm) kennen wir hier Vorgänge und Erscheinungen in den oberflächennahen Schichten, die sonst bei keinem Stern direkt beobachtbar sind

Sonnenflecken. Schon beim Betrachten mit dem bloßen Auge — entweder durch eine berußte Scheibe oder durch ein entsprechend dichtes Buntglas — erkennt man die Helligkeitsabnahme der Sonnenscheibe zum Rande hin. Sie ist eine Folge davon, daß man in der Mitte tiefer in die Außenschichten der Sonne hineinschauen kann als am Rande, in heißere Schichten also, die folglich mehr Licht ausstrahlen. Damit in Einklang steht auch die Tatsache, daß die *Randverdunklung* im Bereich der kurzwelligen Strahlen stärker ist als bei den langwelligen. Zu gewissen Zeiten kann man auch mit unbewaffnetem Auge dunkle Flecken auf der Sonnenscheibe wahrnehmen, die in Wirklichkeit weit ausgedehnte Gruppen von *Sonnenflecken* sind (vgl. Tafel IX).

Schon im 17. Jahrhundert stellte man fest, daß die Häufigkeit der Sonnenflecken in einer rund 11jährigen Periode schwankt. Die Länge der Periode ist jedoch nicht konstant,

sondern kann zwischen 7 und 16 Jahren liegen. Die *Sonnentätigkeit*, oft auch *Aktivität* der Sonne genannt, die sich nicht nur auf die Fleckenbildung, sondern auch auf die *Fackeln*, die *Eruptionen*, die *Granulation*, die *Protuberanzen* und die *Korona* erstreckt, ist kein eigentlich periodischer Vorgang, sondern wird von vielen Nebeneffekten beeinflußt, so daß kein Zyklus nach der Art des Ablaufs der Einzelvorgänge und der Menge der produzierten Flecken dem anderen gleicht.

Zu Beginn einer Periode treten die Flecken nördlich und südlich des Sonnenäquators in 30 bis 40° Breite auf. Später, etwa um die Mitte des Maximums, liegen die Entstehungsherde der Flecken in 10 bis 20° Breite und wandern bis zum Ende des Zyklus bis unter 10° heliographischer Breite. In der letzten Phase eines abklingenden Zyklus erscheinen in höheren Breiten bereits die ersten Flecken der neuen Periode (Minimum).

Ein normaler Sonnenfleck besteht aus einem im Kontrast zur leuchtenden Umgebung (*Photosphäre*) fast schwarz erscheinenden Kerngebiet, der *Umbra*, das von einem halbschattigen Hof, der *Penumbra*, umgeben ist (vgl. Tafel IX). Das dunkle Kerngebiet strahlt bei einer Temperatur von rund 4400 °K nur etwa ein Drittel der Energiemenge in den Raum wie ein gleichgroßes Flächenstück der ungestörten Photosphäre. Diese erscheint, abgesehen von der bereits erwähnten Randverdunklung, bei schwacher Vergrößerung gleichförmig hell. Wendet man mehr als 30fache Vergrößerung an, so löst sich die Photosphäre in eine dichtgedrängte Menge heller Flecken auf, die Granulation (vgl. Tafel IX). Die Durchmesser dieser hellen Inselchen liegen bei 1″ bis 2″, was in der Entfernung Erde–Sonne 700 bis 1500 km entspricht. Fehlt in dieser Feinstruktur der Photosphäre irgendwo eines dieser Körnchen oder gar mehrere, so nennt man dann diese dunkle Stelle eine *Pore*. Die Lebensdauer der Granulen liegt bei 2 bis 5 Minuten, das Aussehen der Granulation ändert sich also ständig. Überhaupt ist die Lebensdauer aller Gebilde an der Sonnenoberfläche begrenzt.

So entwickelt sich ein Sonnenfleck aus einer Pore in einigen Tagen zu einem Kern mit Penumbra, der im allgemeinen nach einer Woche wieder verschwindet. Um die Zeit des Fleckenmaximums treten dagegen häufig ausgedehnte Gebilde auf, die aus mehreren großen Flecken und zahlreichen kleineren bestehen und zuweilen über Monate hinweg unter stetiger Änderung ihres Aussehens sichtbar bleiben. Aus der Verlagerung der Sonnenflecken auf der Sonnenscheibe von Ost nach West schließt man auf eine Rotation der Sonne. Sie beträgt relativ zur Erde 26,9 Tage am Sonnenäquator, dagegen 33,5 Tage in etwa 80° heliographischer Breite in Übereinstimmung mit den Messungen des Doppler-Effektes am östlichen bzw. westlichen Sonnenrande.

Aus dem allgemeinen *Magnetfelde der Sonne* von wahrscheinlich nur 1 bis 2 Gauß heben sich die starken Magnetfelder der Flecken- und anderen Störgebiete der Sonnenoberfläche hervor, die bis einige tausend Gauß Feldstärke erreichen und in tieferen Schichten verankert sind.

Bei der Entstehung einer *Fleckengruppe* kommt es zunächst zur Ausbildung zweier Hauptflecken, deren Magnetfelder entgegengesetzt *polarisiert* sind. In dem Zyklus, der im Jahre 1954 begann, lag auf der Nordhalbkugel im westlichen Fleck der magnetische Nordpol, im östlichen der Südpol. Auf der Südhalbkugel der Sonne liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Bemerkenswert ist nun, daß im folgenden Zyklus die Polarität wechseln wird, so daß man zu dem Schluß gedrängt wird, daß eine volle Periode der Sonnentätigkeit 22 Jahre dauert, also einen Doppelzyklus umfaßt. Von den physikalischen Ursachen der Entstehung der Flecken und der Fleckenzyklen hat man heute noch keine endgültige Vorstellung. So viel scheint sicher, daß man zum Verständnis dieser Vorgänge auf die Magneto-Gasdynamik zurückgreifen muß. Eine derartige Theorie ist kürzlich von STEENBECK entwickelt worden. Sie erklärt fast alle bekannten Tatsachen des Fleckenphänomens qualitativ einleuchtend und liegt auch quantitativ in der richtigen Größenordnung.

Chromosphäre. Die Strömung im Gebiete eines Sonnenflecks scheint am Grunde der beobachtbaren Schicht, im Bereich der Photosphäre, von innen nach außen zu gehen, im Bereich der rund 15 000 km darüber lagernden *Chromosphäre* in umgekehrter Richtung zu verlaufen. Diese oberste Schicht der Sonnenatmosphäre bildet den Übergang von der Photosphäre zur Korona und kann wegen ihrer relativ geringen Strahlung nur gesehen werden, wenn auf irgendeine Weise die intensive Lichtfülle der Sonnenoberfläche ausgeschaltet wird. Dies ist z. B. bei einer totalen Sonnenfinsternis der Fall, wenn der Mond gerade die Photosphäre abdeckt. Der dann für wenige Augenblicke sichtbare schmale, rosarote Saum hat dieser Schicht, der Chromosphäre, den Namen gegeben.

In Verbindung mit den Flecken, aber auch in fleckenfreien Gebieten treten die sogenannten Fackeln auf, flußnetzartig verästelte Lichtadern, die sich zum größten Teil in der Chromosphäre finden, wie aus ihrer deutlichen Sichtbarkeit im Bereich des Sonnenrandes hervorgeht. Fackeln verändern ihr Aussehen meist sehr langsam. Bisweilen kommt es aber im Gebiet einer Fackel zu einem plötzlichen Strahlungsausbruch, einer sogenannten *Eruption*, bei der im sichtbaren Bereich des Lichtes nur wenig wahrzunehmen ist. Die Hauptausstrahlung einer Eruption liegt im Ultravioletten unterhalb 200 nm und ruft beim Eindringen in die Erdatmosphäre im Bereich der *D*-Schicht zwischen etwa 50 und 80 km Höhe eine starke Ionisation hervor, die über eine Zeit von einigen Minuten bis fast zu einer Stunde anhalten kann und zu starken Störungen der drahtlosen Übertragungen im Kurzwellenbereich (MÖGEL-DELLINGER-*Effekt*) führt. Auch im Bereich der Zentimeter- bis Meterwellen, deren Beobachtung zu den Aufgaben der *Radioastronomie* gehört, tritt eine starke zusätzliche Strahlung auf, und schließlich erfährt sogar die Intensität der *solaren kosmischen Strahlung* eine Erhöhung. Nicht nur in unmittelbarem Zusammenhang mit den Flecken, sondern auch an anderen Stellen der Sonnenoberfläche finden sich Magnetfelder, deren Kraftlinien das Gerüst jener Erscheinungen bilden, die wir *Protuberanzen*

nennen (vgl. Tafel X). Sie halten sich im Durchschnitt in Höhen von 30 000 bis 60 000 km auf und zeigen bei einer Länge bis zu 200 000 km eine große Anzahl mannigfaltiger Formen. Ihre Dichte ist etwas größer als die ihrer Umgebung, ihre Temperatur im allgemeinen niedriger, etwa 4000 °K, so daß sie sich auf photographischen Aufnahmen der Sonne im Lichte der Wasserstofflinie H_α als dunkle, wurmartige Gebilde abheben. In der Literatur werden sie vielfach als *Filamente* bezeichnet. Als helle Erscheinungen können sie nur außerhalb des Bereiches der Sonnenscheibe gesehen werden, entweder wenn bei einer Finsternis der Mond die Lichtfülle der Photo- und Chromosphäre abdeckt oder wenn mit Hilfe einer entsprechenden Vorrichtung in Spezialfernrohren (*Spektrohelioskop*) das helle Sonnenlicht herausgeblendet wird.

Korona. Protuberanzen zeigen insofern ein bemerkenswertes Verhalten, als sie aus einem Zustand langsamer Veränderungen sich plötzlich und meist radial nach außen in Bewegung setzen. Die dann als *eruptive Protuberanzen* bezeichneten Gebilde erreichen in ausgeprägten Fällen Geschwindigkeiten von 100 bis über 500 km/s und Höhen von 100 000 bis 1 500 000 km, dringen also in den Bereich der *Sonnenkorona* ein (vgl. Tafel X). Auch dieses Phänomen zeigt wie die übrigen solaren Erscheinungen eine Abhängigkeit vom Fleckenzyklus: Im Maximum ist die Korona wesentlich symmetrisch zur Sonne mit stark ausgeprägten Strahlen, zur Zeit des Minimums erscheint die Rotationsachse abgeplattet mit schwacher Strahlenentwicklung an den Polen. Die Helligkeit der Korona nimmt nach außen ab, der größte Teil ihres Leuchtens ist gestreute Sonnenstrahlung. Ihre Eigenstrahlung liegt in Emissionslinien, die von vielfach ionisierten Metallatomen des Eisens, Nickels u. a. herrühren. Auf verschiedenen Wegen wurde für die Korona eine Temperatur von durchschnittlich $1{,}3 \cdot 10^6$ °K abgeleitet. Über den der Beobachtung zugänglichen Bereich hinaus setzt sich die Korona bis in den Gas- und Staubkörper des Zodiakallichtes fort.

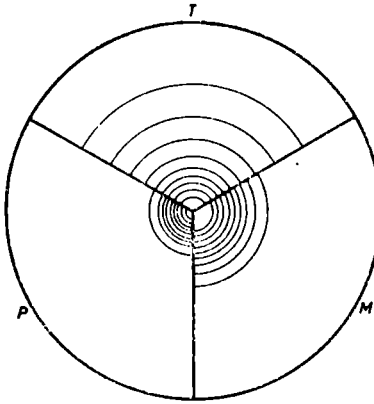
Energiequellen. Die von der Sonne dauernd ausgestrahlte Leistung liegt mit $L_{\odot} = 3{,}86 \cdot 10^{33}$ erg/s so hoch, daß von den üblichen Energiequellen keine ausreicht, um diesen Verlust zu decken. Weder chemische Energien noch der von Robert MAYER vermutete Meteoritenhagel, noch die durch Kontraktion zu gewinnende potentielle Energie der Sonnenmasse reichen hierzu aus. Eine Sonne aus reinem *Anthrazit* würde bei gleichbleibender Ausstrahlung nicht ganz 6000 Jahre existieren können, in Wirklichkeit freilich sehr bald in ihrer Intensität nachlassen und dafür länger strahlen. Doch die Geologen können überzeugend nachweisen, daß die Sonne seit etwa einer Milliarde Jahren mit wesentlich unverminderter Stärke leuchtet. Die Erzeugung eines *Meteoritenhagels* zur Ergänzung der Sonnenenergie erfordert eine Dichte der Meteoritenwolke, die bei der bekannten Größe der Einzelkörperchen optisch im Lichte der Sonne bemerkbar sein müßte, ganz abgesehen davon, daß der dann am irdischen Himmel sichtbare Dauermeteorstrom ein unvorstellbar imposantes Schauspiel bieten würde. Selbst die erheblich ergiebigere *Kontraktionsenergie* kann die Sonnenausstrahlung für die von den Geologen geforderte Zeitdauer nicht decken. Während der letzten 10^9 Jahre strahlte unsere Sonne 43mal soviel Energie aus, wie sie aus der Zusammenziehung von einem weit über die Grenzen des Planetensystems reichenden ursprünglichen Radius auf ihre heutige Größe hätte gewinnen können. Die Verhältnisse werden erheblich ungünstiger, wenn wir die heute erkannte Lebensdauer der Sonne von mindestens $6 \cdot 10^9$ Jahren unseren Betrachtungen zugrunde legen. Die Kontraktionsenergie kann also im Dasein der Sonne und mithin der Sterne nur zeitweise eine Rolle gespielt haben. Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts wurde deshalb von den Astronomen die Existenz von Energiequellen mindestens für den kosmischen Bereich gesucht, die wesentlich ergiebiger sein müßten als alle bis dahin bekannten.

Auch die Entdeckung der *Radioaktivität* im Jahre 1896 brachte noch nicht die erwartete Klärung; Radium hatte eine viel zu geringe Halbwertszeit und das natürliche Uran eine

zu geringe Leistung. Erst mit der Entdeckung der *Kernenergien* war das Problem wenigstens grundsätzlich gelöst, und wir wissen heute, daß die Sterne während der längsten Entwicklungsphasen ihres Daseins ihre Strahlungsenergie aus *Kernprozessen* decken. Bei dem hier zuerst in Frage stehenden Prozeß des Aufbaus von Helium aus Wasserstoff wird im Mittel 0,71 % der beteiligten Masse in Energie umgewandelt gemäß dem von EINSTEIN im Jahre 1905 formulierten Äquivalenzprinzip von Masse und Energie $\Delta E = c^2 \cdot \Delta m$. Ein fast gänzlich aus Wasserstoff bestehender Stern mit der Masse unserer Sonne hätte somit $\Delta E = 1{,}27 \cdot 10^{52}$ erg zur Verfügung und könnte bei der gleichen Strahlungsleistung wie die Sonne etwa $1{,}05 \cdot 10^{11}$ Jahre unvermindert strahlen.

Für den genannten Kernaufbau stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, der *Proton-Proton-Prozeß* und der *Kohlenstoffzyklus*. Beim ersten Prozeß vereinigen sich zuerst zwei Protonen unter Aussendung eines Positrons zu einem Deuteron, das mit einem weiteren Proton das Heliumisotop, $^3_2$He, bildet. An dieser Stelle wird eine Reihe weiterer Reaktionen möglich. In überwiegendem Maße werden zwei solcher Heliumisotope miteinander einen Helium-4-Kern aufbauen und zwei Protonen in Freiheit setzen. Der zweite Zyklus ist, wie sein Name andeutet, an das Vorhandensein von Kernen des Kohlenstoff 12 gebunden. Trifft ein solcher mit einem Proton zusammen, so wird das instabile Isotop Stickstoff 13 gebildet, das unter Abgabe eines Positrons in Kohlenstoff 13 zerfällt. Nun erfolgen zweimal nacheinander Einfänge je eines Protons, und es werden erst Stickstoff 14 und dann Sauerstoff 15 aufgebaut, der durch Emission eines Positrons in Stickstoff 15 übergeht. Der Zusammenstoß mit einem Proton führt schließlich zum Zerfall in den Kern von Helium 4 und den ursprünglichen Kern von Kohlenstoff 12, der nun erneut bei einem gleichartigen Prozeß mitwirken kann; er spielt also die Rolle eines Katalysators, der zum Einleiten des Prozesses notwendig ist, am Ende aber wieder abgegeben wird.

Zur Deckung ihres Energiebedarfs muß also die Sonne im



Verteilung des Druckes P, der Temperatur T und der Masse M im Innern der Sonne

Durchschnitt je Sekunde $3{,}8 \cdot 10^{38}$ Protonen in Heliumkerne verarbeiten; sie verliert dabei durch ihre Ausstrahlung in der gleichen Zeit $4{,}5 \cdot 10^{12}$ g ihrer Masse. Wesentlich für die eben dargelegte Theorie der Energieerzeugung ist nun der Umstand, daß die schon etwa zwei Jahrzehnte früher aus der Theorie vom *inneren Aufbau der Sterne* gefolgerte Temperatur und Dichte des Zentralgebietes der Sonne so hoch sind, daß die genannten Kernaufbauprozesse überhaupt und in ausreichendem Maße ablaufen können (Abb.). Im Zentrum der Sonne herrschen ein Druck von $P_c = 4 \cdot 10^{17}$ dyn/cm² und eine Temperatur $T_c = 2 \cdot 10^7$ °K. Die im Bild dargestellten 10 Kugelschalen zeigen bei Druck und Temperatur deren Abnahme nach außen in Zehnteln der Zentralwerte. Für die Masse enthalten die zentrale Kugel und jede darüber liegende Schale je ein Zehntel der Sonnenmasse. Am stärksten ist der Druck, am schwächsten die Temperatur zum Zentrum hin konzentriert. Eine anschauliche Vorstellung von der Massenverteilung im Sonneninnern gewinnt man vielleicht durch die Feststellung, daß $^9/_{10}$ der Sonnenmasse in einer Kugel eingeschlossen sind, deren Volumen noch nicht 7 % des Sonnenvolumens ist. Die Übereinstimmung der Ergebnisse dieser beiden voneinander unabhängig entwickelten Theorien ist ein überzeugender Beweis für die Leistungsfähigkeit der kühnen Untersuchungen des Inneren der Sterne und gibt uns wieder einmal die Gewißheit, daß es innerhalb der Reichweite der Meßinstrumente keine Naturvorgänge gibt, die der Erforschung unzugänglich wären.
Was für die Sonne gilt, trifft in entsprechendem Maße auch für die Sterne zu. Insbesondere reicht die in den Kernpro-

zessen zur Verfügung stehende Leistung selbst zur Befriedigung des großen Bedarfs der heißesten Riesensterne für einige Millionen Jahre aus, was etwa der Verweilzeit dieser verschwenderischen Strahler auf dem Hauptast im Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm entspricht.

Veränderliche Sterne

Bisher haben wir nur Sterne kennengelernt, deren Zustandsgrößen über lange Zeiten hin nahezu konstant sind. Im Hinblick auf die allgemeine Entwicklung der Weltkörper gibt es freilich strenggenommen keinen unveränderlichen Stern. Unter der Bezeichnung *veränderliche Sterne* oder *Variable* versteht man jedoch solche Sterne, bei denen sich innerhalb von Stunden oder Tagen merkbare Veränderungen feststellen lassen. Die zunächst auffälligste Änderung ist die der Helligkeit, die in der ersten Zeit seit der Entdeckung dieser Art Himmelskörper vom 17. bis Mitte des 19. Jahrhunderts ausschließlich Gegenstand der Forschung gewesen ist. Als erster Veränderlicher wurde bereits im Jahre 1596 der Stern *o* Ceti (Omikron im Walfisch), auch Mira, der Wunderbare genannt, entdeckt. Es folgte Algol (*β* Persei) im Jahre 1667. Algol ist physikalisch betrachtet ein unveränderlicher Stern. Er ist aber ein Doppelstern, der sich mit seinem etwas lichtschwächeren Begleiter um den gemeinsamen Schwerpunkt gerade so bewegt, daß sich diese beiden Sterne für die Bewohner der Erde während eines Umlaufs zweimal gegenseitig bedecken (vgl. Abb. Seite 174). Diese durch die Lage ihrer Bahnebene nur zufällig einen Lichtwechsel zeigenden Sterne, meist *Bedeckungsveränderliche* oder *photometrische Doppelsterne* genannt, haben wir bereits kennengelernt. Hier sollen nur die *physisch veränderlichen* Sterne betrachtet werden, von denen man zwei Hauptgruppen unterscheiden kann: 1. die *periodisch Veränderlichen*, zu denen die Klassen der *Mira-Sterne*, der *δ Cephei-Sterne* und der *RR Lyrae-Sterne* gehören, und 2. die *unperiodisch Veränderlichen*, zu denen man *halbregelmäßig, unregelmäßig* und *zeitweilig Veränderliche* rechnet.

Die letzte Klasse ist die der *Novae* und *Supernovae*, die im allgemeinen wohl nur einmal aufleuchten. Schließlich gibt es eine Menge noch nicht klassifizierter Veränderlicher, deren Lichtwechsel zwar feststeht, deren Einordnung in eine der genannten Klassen aber noch nicht vorgenommen werden konnte, weil die dazu erforderlichen Beobachtungen des genauen Helligkeitsverlaufs noch nicht gemacht sind. Die Tafel gibt eine Übersicht über die Verteilung der bekannten Veränderlichen auf die verschiedenen Klassen (unter Ausschluß der Bedeckungsveränderlichen).

Die relative Häufigkeit der physisch veränderlichen Sterne

Mira-Sterne	41 %	halb- und unperiodische Veränderliche	7 %
δ Cephei-Sterne	6	Novae bzw. Supernovae	1
RR Lyrae-Sterne	16	noch nicht klassifizierte Veränderliche	29

Die Gesamtheit der bis heute gefundenen physisch veränderlichen Sterne beträgt nach unserer Kenntnis 8000, Bedeckungsveränderliche dagegen kennen wir etwa 1650. Die physisch veränderlichen Sterne sind für den Astrophysiker von größter Bedeutung, denn sie bieten ihm die Möglichkeit, den Ablauf von der Natur selbst dargebotener physikalischer Experimente allergrößten Umfanges zu beobachten. Es ist dies bis heute die einzige Möglichkeit, parallel verlaufende Änderungen der Zustandsgrößen zu untersuchen. Bei den Variablen ändern sich nicht nur die Lichtausstrahlung, sondern die Oberflächentemperatur, damit auch der Temperatur-, Druck- und Dichteverlauf im Inneren, der Sternradius und das Spektrum.

Periodisch Veränderliche. Von den periodisch Veränderlichen haben die Mira-Sterne einen Lichtwechsel, dessen Dauer vornehmlich im Bereich von 100 bis 750 Tagen liegt. Nach kürzeren Perioden hin schließen sich daran die δ Cephei- und RR Lyrae-Sterne an, die das Intervall von 1,5 Stunden bis zu 60 Tagen überspannen, wobei die Perioden von 20 Stunden bis 1 Tag und von 60 bis zu 100 Tagen schwach

besetzt sind und bei 12 Stunden und 5 Tagen Häufungsstellen zu sein scheinen. Man benutzt die Lücke der Perioden bei 1 Tag zur Abgrenzung der kurzperiodischen RR Lyrae-Sterne von den δ Cephei-Sternen

Bei den drei behandelten Klassen von Veränderlichen wird der Lichtwechsel durch ein überraschend regelmäßiges Wachsen und Schrumpfen des Sternradius bei gleichzeitiger Änderung der Oberflächentemperatur hervorgerufen; beide Erscheinungen treten jedoch mit einer gewissen Phasenverschiebung ein. Der Helligkeitsanstieg wird wesentlich hervorgerufen durch einen Temperaturanstieg um durchschnittlich 1 000 °K bei mittlerem Radius. Die Ausdehnung des Sternes erreicht ihren Höhepunkt, während gleichzeitig Temperatur und Leuchtkraft abnehmen — offensichtlich gerade als Folge der Ausdehnung. Die Kontraktion vermag zunächst den Helligkeitsrückgang nicht aufzuhalten; den kleinsten Durchmesser erreicht der Stern jedoch erst dann, wenn Temperatur und Leuchtkraft bereits wieder zunehmen. Diese Vorgänge sind ein Zeichen dafür, daß die betreffenden Sterne eine innere Krise durchmachen, zu der entweder die Energieerzeugung oder der Energietransport den Anstoß gibt. Der Stern pulsiert mechanisch in seiner Eigenschwingung; eine zu hohe Energielieferung bläht ihn auf und verbraucht Energie; das dadurch eintretende Leistungsdefizit läßt den Stern wieder zusammensinken und somit das Spiel von neuem beginnen. Auffällig ist, daß die Vertreter dieser drei Klassen Riesen bzw. Überriesen sind, und zwar liegen die Mira-Sterne im Bereich der roten M-Sterne, wogegen die Vertreter der beiden anderen Klassen den Spektraltypen B bis G angehören. Es sind durchweg Sterne großer Massen, bei denen auch die Energieproduktion sehr hoch ist. Nach neuerer Auffassung findet in diesem Stadium der Sternentwicklung der Auf- und Abbau der schweren Atomkerne im Inneren der Sterne bei Temperaturen bis 10^9 °K statt, wobei geringfügige Temperaturänderungen nach oben oder unten die genannten Prozesse so rasch zum Ablauf bringen, daß eine Katastrophe gerade noch verhindert wird. Am harmlosesten und lang-

samsten laufen diese Prozesse bei den Mira-Sternen ab, bei denen infolge der gewaltigen Dimensionen vom 100- bis 400fachen des Sonnendurchmessers die Oberflächentemperatur sich nur um 500 °K zu ändern braucht. Dafür pulsiert der Radius um etwa 20%, während bei den heißeren Sternen die lineare Änderung nur 10% beträgt. Die Helligkeitsänderung erreicht jedoch wieder bei den kühlen Mira-Sternen eine größere Amplitude und schwankt um mehrere Größenklassen.

Unregelmäßig Veränderliche. Unter den nichtperiodischen Veränderlichen gibt es sowohl Zwergsterne, die in unmittelbarer Nähe der Hauptreihe stehen, als auch Riesensterne, die das weite Gebiet zwischen den roten M-Sternen und den weißen B-Sternen bevölkern. Bei den *Hauptreihenveränderlichen* scheint es sich um Sterne zu handeln, die entweder das Vorstadium der Sternentstehung (*Protostern*) insofern abschließen, als die Kernprozesse gerade anlaufen, oder die als vollausgereifte Zwerge einen so großen Heliumkern gebildet haben, daß sie nunmehr im Begriffe stehen, die Hauptreihe zu verlassen und in das Gebiet der Riesen abzuwandern. Beide Übergangsstadien haben Entwicklungskrisen zur Folge, die sich in unregelmäßigen Änderungen der Helligkeit, der Temperatur und des Radius äußern.

Bei den unregelmäßig veränderlichen Riesen scheinen andere Ursachen eine Rolle zu spielen. *Riesensterne* sind nicht einheitlich aufgebaut, sondern bestehen aus zwei oder mehreren Schalen. Liegen über dem Energie produzierenden Kern noch zwei Schichten, so besitzt dieser Teil des Sternes im allgemeinen mehrere Eigenschwingungen, die sich unter Umständen überlagern. Bei vielen dieser Sterne läßt sich der Lichtwechsel durch Überlagerung mehrerer Schwingungen darstellen.

Hier gibt es nun zahlreiche Sterne, deren Veränderlichkeit sich in Helligkeitsausbrüchen äußert, die meist äußerst selten erfolgen, so daß ein allmählicher Übergang zu den Novae besteht. Während bei den sogenannten novaähn-

lichen Sternen meist mehrere Lichtausbrüche beobachtet worden sind, kennen wir noch keine echte Nova, die zweimal aufgeleuchtet ist.
Die Umstände, die bei einem Stern zu der Novakatastrophe führen, sind uns unbekannt. Der Name Nova oder Supernova ist sachlich nicht berechtigt, aber nicht mehr zu ändern. Die deutsche Bezeichnung *Neuer Stern* zeigt den Irrtum der ersten Entdecker solcher Sterne sehr deutlich. Seit Anwendung der Photographie in der Astronomie ist es in vielen Fällen möglich gewesen, am Ort der Nova in der zurückliegenden Zeit einen Stern nachzuweisen, den man als *Pränova* bezeichnet. Nach Beendigung des Lichtausbruches nennt man diesen Stern *Post-* oder *Exnova*.
Daß es sich in jedem Fall um eine *Sternkatastrophe* handelt, zeigt schon die Geschwindigkeit des Lichtausbruches. Vielfach innerhalb von Stunden, höchstens von Tagen steigt die Leuchtkraft des Sternes auf das 8000- bis 60000fache an. Dabei expandiert die Atmosphäre des Sterns mit Geschwindigkeiten zwischen Hunderten bis über 1000 km/s. Die insgesamt ausgestrahlte Energie liegt bei 10^{45} erg. Es handelt sich also um eine Menge, die unsere Sonne in ungefähr 8000 Jahren ausstrahlt. Man hat abgeschätzt, daß in einem Sternsystem von der Größe unserer Milchstraße etwa 40 *Novae im Jahre* aufleuchten, von denen wegen des Abdeckungseffektes etwa drei wirklich zu beobachten sind. Zahlreiche Novae sind auch bereits im Andromedanebel und anderen benachbarten extragalaktischen Sternsystemen beobachtet worden. Es handelt sich in jedem Fall um Sterne aus der Nähe der Hauptreihe, die nur unwesentlich heller sind als unsere Sonne, jedoch eine höhere Oberflächentemperatur besitzen. Wahrscheinlich stehen sie am Ende ihrer Entwicklung, womit eine noch stärkere Instabilität erreicht wird als im Bereich der Veränderlichen.
Deutlich unterschieden von den Novaausbrüchen, die in einem weiten Bereich des Helligkeitszuwachses schwanken, sind die Erscheinungen der *Supernovae*, bei denen die Energie- und die Massenabgabe noch 3 bis 4 Zehnerpotenzen höher liegen. Diese Energiemengen sind von der Größen-

ordnung der in einem Stern enthaltenen thermischen Energie, was zur Folge hat, daß hier der bisherige Bestand des Sternes selbst in Frage gestellt ist und der Stern eine einschneidende Veränderung erfährt. Ein merklicher Bruchteil der Sternmasse wird in den Weltraum ausgestoßen. Um den sehr heißen, aber nunmehr sehr lichtschwachen Stern bleiben diese Massen als *planetarischer Nebel* sichtbar.
Insgesamt sind bisher etwa 50 Supernova-Ausbrüche beobachtet worden, die meisten von ihnen ereigneten sich in *extragalaktischen Sternsystemen.* In unserer Milchstraße sind bisher drei Supernovae festgestellt worden, die vom Jahre 1054, in deren Gefolge der Krebsnebel im Stier entstand, und die beiden nicht so hellen Erscheinungen aus den Jahren 1572 (in der Cassiopeia) und 1604 (im Ophiuchus). In dem noch heute mit über 1000 km/s expandierenden Krebsnebel spielen sich Prozesse ab, die außer dem visuellen und photographisch erfaßbaren Licht auch eine intensive Radiostrahlung aussenden.
Was sich beim Aufleuchten einer Supernova ereignet, wissen wir noch nicht, es gibt darüber nur Vermutungen. So wird diese Erscheinung als das Aufleuchten stellarer Materie beim Zusammensturz zu einem tatsächlich neuen Stern gedeutet. Nach einer anderen Auffassung handelt es sich hierbei um die Bildung eines Doppelsternes. Beim Auseinanderreißen des vorher bereits stark deformierten ursprünglichen Sternes in die beiden Komponenten muß im Augenblick der Trennung für kurze Zeit Materie nach außen gelangen, die vorher unter sehr hohem Druck stand und dabei eine sehr hohe Temperatur besaß, so daß explosionsartig größere Massen unter Ausstrahlung gewaltiger Energiemengen in den umliegenden Weltraum befördert werden.

Mehrfache Sterne und Sternhaufen

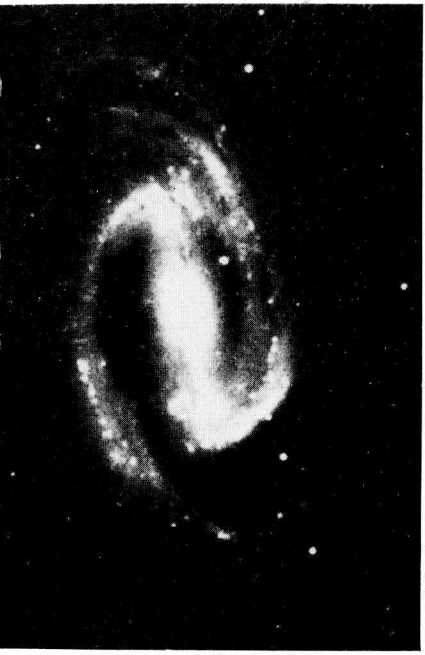
Da die Sterne an der Sphäre, von ihrer Konzentration zur Milchstraße abgesehen, verhältnismäßig gleichartig verteilt sind — insbesondere sind es die helleren, mit bloßem Auge sichtbaren Sterne —, so erscheint die Frage berechtigt, wie-

Der Trifidnebel im Schützen (M 20)

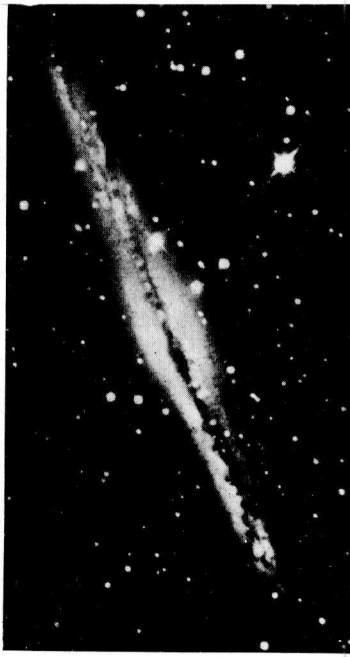
Tafel XIII

Dunkelwolken und Globulen in der Milchstraße

Tafel XIV *Der große Nebel in der Andromeda (M 31) mit seinen beiden elliptischen Begleitern (M 32 oberhalb und NGC 205 unterhalb des Spiralnebels)*



Balkenspirale

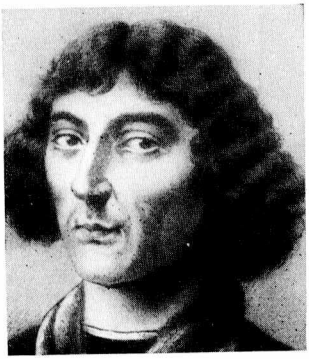


Ein Spiralnebel von der Kante gesehen. Die Dunkelwolken sind deutlich erkennbar

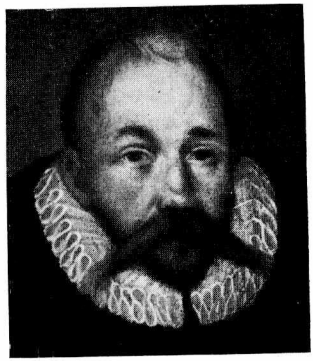
Tafel XV

Die große Magellansche Wolke

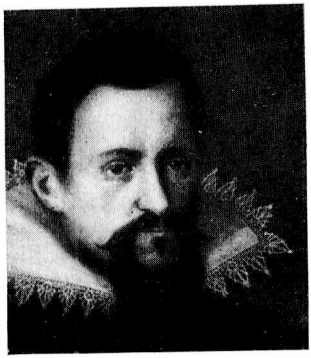
Tafel XVI



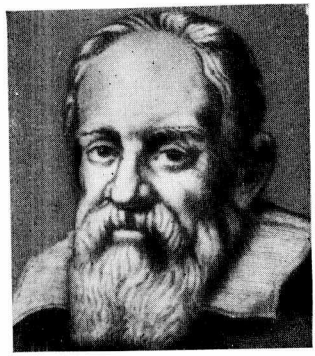
Nikolaus Kopernikus



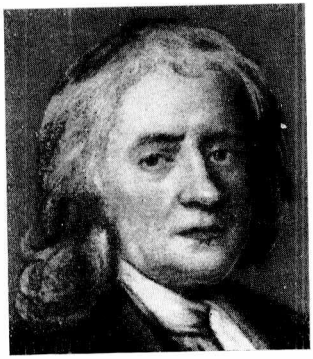
Tycho Brahe



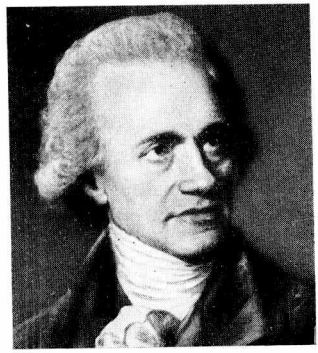
Johannes Kepler



Galileo Galilei



Isaac Newton



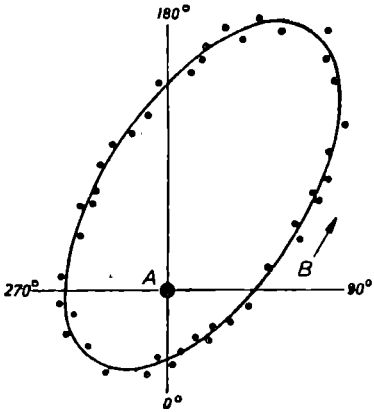
Friedrich Wilhelm Herschel

viele von diesen Lichtpunkten infolge der regellosen Verteilung zufällig einen vorgegebenen geringen Abstand haben. Die rechnerische Beantwortung dieser Frage, angewandt auf die frei sichtbaren Sterne und auf einen Abstand unterhalb 1′, zeigt, daß es etwa acht solcher zufälliger Doppelsterne geben könnte. Die tatsächliche Zahl der doppelten Sterne der bezeichneten Art beträgt aber rund 1500. Allein aus dieser Tatsache folgt, daß die engen Sternpaare nicht nur perspektivisch zusammenstehen, sondern wirklich zusammengehören. Natürlich werden unter ihnen auch die acht zu erwartenden *optischen Doppelsterne* sein. Sie herauszufinden ist verhältnismäßig einfach. Während die wirklichen, die *physischen Doppelsterne* infolge der Wirkung der Gravitationskraft sich umeinander bewegen, wandern bei einem optischen Paar die Sterne gradlinig aneinander vorbei.

Physische Doppelsterne. Zur Zeit sind fast 40000 Doppelsterne katalogisiert, ihre Zahl ist ständig im Wachsen begriffen. Die wirkliche Zahl der Doppelsterne liegt natürlich bedeutend höher und dürfte in die Milliarden gehen. Etwa 25% aller Sterne sind Doppelsterne oder Mehrfachsysteme, ihnen gehören etwa ein Drittel aller Sterne an. Dieses Ergebnis ist kosmogonisch sehr bedeutungsvoll; denn es läßt erkennen, daß Doppel- und mehrfache Sternsysteme eine sehr häufige Form des Vorkommens der stellaren Materie darstellen. Von den im Umkreis der Sonne von 15 pc Radius enthaltenen 285 Sternen sind 133 Einzelsterne und 76 Sternpaare. Die sieben Sterne der unmittelbaren Sonnenumgebung bis 2 pc Abstand bilden ein dreifaches und ein doppeltes System, das 6. Mitglied ist ein Einzelstern und das 7., unsere Sonne, hat ein Planetensystem.

Man unterscheidet bei den physischen Doppelsternen drei Gruppen:

1. *Die visuellen Paare*, von denen einige mit unbewaffnetem Auge sichtbar sind, die meisten aber nur im Fernrohr getrennt und vermessen werden können. Man nennt sie zum Unterschied von den frei sichtbaren oft auch *teleskopische Doppelsterne.*



Relative Bahn der lichtschwächeren Komponente B eines visuellen Doppelsterns um die hellere Komponente A

2. *Die spektroskopischen Doppelsterne*, deren Komponenten sich im allgemeinen nicht trennen lassen. Ihre Doppelsternnatur wird aus dem Spektrum erschlossen, entweder durch Feststellung periodischer Linienverschiebung oder direkt, indem man erkennt, daß der betreffende Stern ein zusammengesetztes Spektrum hat.

3. *Die Bedeckungsveränderlichen* oder *photometrischen Doppelsterne*, für die vielfach auch die unter 2. aufgezählten Erkennungsmerkmale zutreffen, äußern sich besonders eindrucksvoll als perspektivische Veränderliche. In allen drei Gruppen ermöglichen die Beobachtungen einen mehr oder weniger eindeutigen Einblick in die Bahn und die Bewegungsverhältnisse dieser Sternsysteme.

Am klarsten liegen die Verhältnisse bei den visuellen Doppelsternen (Abb.), deren Ortsänderung während einer Umlaufperiode mit Hilfe eines geeigneten Meßinstrumentes möglichst oft festgestellt wird. Hierzu verwendet man langbrennweitige Fernrohre oder *Astrographen*. Jeder Punkt der lichtschwächeren Komponente entspricht der Stellung dieses Sternes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Durch die im Laufe der Zeit gemessenen Punkte wird eine elliptische Bahn gelegt und aus ihr die wirkliche Bahn, also die große Halbachse und Exzentrizität, berechnet und ihre Lage im Raum bestimmt.

So erhielt man für den Doppelstern Sirius folgende Werte: Umlaufzeit beider Komponenten umeinander $P = 49{,}9$ Jahre; große Halbachse $a = 20{,}3$ AE; Exzentrizität $e = 0{,}59$; die Massen in Einheiten der Sonnenmasse sind $\mathfrak{M}_A = 2{,}35$, $\mathfrak{M}_B = 0{,}99$; die Helligkeiten $m_A = -1{,}43$, $m_B = 8{,}6$ ermög-

lichen die Bestimmung der Radien dieser beiden Sterne in Einheiten des Sonnenradius, $R_A = 1{,}8\ R_\odot$, $R_B = 0{,}022\ R_\odot$. Aus den Werten für Masse und Radius des Siriusbegleiters ergibt sich z. B. die unvorstellbare hohe mittlere Dichte dieses Sternes von $\varrho_B = 132\,000\ \mathrm{g/cm^3}$.

Bei dem visuellen Doppelstern ζ UMa (Mizar), dessen scheinbare Distanz 14″ beträgt, läßt sich aus der Parallaxe $p = 0{,}''041$ der wirkliche Abstand $r = 340$ AE ermitteln und nach dem auch hier gültigen 3. Keplerschen Gesetz eine Umlaufzeit von etwa 3500 Jahren errechnen.

Über die Bildung von doppelten und mehrfachen Sternsystemen weiß man noch nichts Sicheres, da ein derartiger Vorgang noch nicht beobachtet wurde. Sehr wahrscheinlich liegt der Ursprung der Doppelsterne in der Phase der Sternentstehung, in der schließlich auch die Bildung des Planetensystems zu suchen ist.

Sternhaufen. Größere Ansammlungen von Sternen bezeichnet man als *Sternhaufen*. Auf Grund der Größe, der Mitgliederzahl und der Einordnung in das Milchstraßensystem hat man zwei Haupttypen zu unterscheiden, die sogenannten *offenen* oder *lockeren Sternhaufen* und die *Kugelsternhaufen*. Die offenen Sternhaufen sind in unserem Sternsystem sehr stark zur Milchstraße konzentriert. Es sind je nach Größe Ansammlungen von 10 bis 500 Sternen, die einen Raum mit einem Durchmesser zwischen 1,5 und 15 pc erfüllen, offensichtlich gemeinsam entstanden sind und zufolge der allgemeinen Umlaufbewegung im Milchstraßensystem noch heute in geschlossener Gruppe einherziehen. Einige Vertreter dieser Haufen sind mit bloßem Auge sichtbar, so der *Doppelsternhaufen im Perseus*; die *Plejaden*, auch *Siebengestirn* genannt (vgl. Tafel XII), im Stier; die *Hyaden* ebenfalls im Stier; die *Krippe* im Krebs; die Sterne des *Haar der Berenike*. Die meisten jedoch sind nur im Fernrohr zu beobachten. Wir kennen heute einige Hundert der lockeren Haufen; im ganzen Milchstraßensystem mag es an die 3500 geben.

Der innere Zusammenhalt wird durch die Eigengravitation gegeben. Das Schwerefeld der Galaxis und der haufennahen

Sterne, die seinen Bereich durchqueren, arbeiten an der allmählichen Zerstreuung der Mitglieder der offenen Sternhaufen. Unsere Sonne selbst durchquert einen solchen bereits stark aufgelockerten galaktischen Sternhaufen, der früher als *Bärenfamilie* bezeichnet wurde, heute meist *Ursamajor-Strom* heißt. Derartige *Bewegungshaufen* kennen wir bis heute sechs, doch dürfte es sehr viel mehr geben.
Im Gegensatz zu den offenen Sternhaufen bevorzugen die *Kugelsternhaufen* den Außenraum unseres Milchstraßensystems bis zu einem Durchmesser von 50000 pc. Da wir uns in bzw. nahe bei der von absorbierender Materie stark erfüllten Hauptebene befinden, sind im Milchstraßengürtel fast keine Kugelsternhaufen zu sehen. Ihre Gesamtzahl ist wesentlich kleiner als die der galaktischen Sternhaufen, man schätzt sie auf 250. Dafür aber sind die Kugelsternhaufen wesentlich sternreicher und zeigen eine starke Konzentration zum Zentrum des Haufens. Bei den meisten sind wegen der großen Sterndichte und der durch die große Entfernung bedingten perspektivischen Zusammendrängung die zentralen Gebiete nicht mehr in Einzelsterne auflösbar (vgl. Tafel XII). Die Durchmesser liegen im Bereich von 20 bis 120 pc. Die Zahl der Mitglieder dieser Haufen schwankt zwischen 100000 und 10 Millionen.
Das Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm der Kugelsternhaufen weicht von dem des Sternfeldes der Sonnenumgebung deutlich ab. Man unterscheidet deshalb unter den Sternansammlungen im Weltall heute zwei *Hauptpopulationen.* Zur *Population* I gehören z. B. die Sterne der Spiralarme extragalaktischer Systeme, also auch die Sterne der Sonnenumgebung und die physisch zu ihnen gehörenden Mitglieder der offenen Sternhaufen, zur *Population* II die Sterne der Kugelsternhaufen und die der *elliptischen Nebel.* Hier fehlen die Riesensterne vom Spektraltyp O und B, und der von den Roten Riesen kommende Ast teilt sich in den oberen Arm der Veränderlichen (hauptsächlich RR Lyrae-Sterne) und den steil absteigenden unteren Arm, der mit einem Knick in die Hauptreihe umbiegt. In den Sterngruppen der Population II fehlt die interstellare Materie fast ganz, aus der

sich in der Population I junge Riesensterne bilden können, die im Laufe der Zeit das ganze Gebiet von den heißen bis zu den kühlen Überriesen bevölkern (vgl. Abb. Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm).

Gas und Staub zwischen den Sternen

Bei der Betrachtung der Absorptionsgebiete innerhalb der Milchstraße wurde bereits deutlich, daß der Raum zwischen den Sternen kein absolutes Vakuum sein kann. Es sollen jetzt die hauptsächlichsten Erscheinungen behandelt werden, die an die *interstellare Materie* geknüpft sind. Da die stoffliche Zusammensetzung dieser Massen etwa die gleiche ist wie in den Sternatmosphären, so treffen wir auch hier den Wasserstoff als vorherrschendes Element an.
Die interstellaren Massen sind zu 98 bis 99% gasförmig, der Rest besteht aus festen Partikeln, unter denen metallische, silikatische und auch Eiskörner vorkommen dürften. Obwohl die mittlere Dichte nur rund 10^{-24} g/cm³ beträgt, beläuft sich die Gesamtmasse der interstellaren Materie auf 25 Milliarden Sonnenmassen. Infolge der extremen Verdünnung — es befinden sich durchschnittlich 600 Wasserstoffatome im Volumen eines Liters — finden zwischen den Atomen äußerst selten Zusammenstöße statt. Je nach der Temperatur oder, was auf dasselbe herauskommt, der Geschwindigkeit der Atome liegen die Zeiten zwischen zwei Begegnungen im Bereich von 100 bis 1000 Jahren, und die dazwischen zurückgelegten Wegstrecken belaufen sich auf 200 bis 300 AE.
Die seltenen Zusammenstöße und die außerordentlich geringe Dichte des interstellaren Strahlungsfeldes haben zur Folge, daß sich die Atome praktisch alle im Grundzustand befinden, d. h. die Elektronen sich auf der untersten Bahn aufhalten und nach einer Anregung, die äußerst selten erfolgt, in einem oder mehreren Sprüngen sofort wieder dorthin zurücksinken. Infolge der großen Ruhe kommen auch Ausstrahlungen von den metastabilen Niveaus zustande. Es können also die sogenannten *verbotenen Linien* ausgesandt

werden, zu denen u. a. drei helle Linien des einfach ionisierten Stickstoffs und des ein- und zweifach ionisierten Sauerstoffs gehören, die man vor einem halben Jahrhundert einem noch unbekannten Element, dem *Nebulium*, zuschrieb.

Emissions- und Reflexionsnebel. Der interstellare Wasserstoff ist überwiegend neutral. Die von ihm erfüllten Gebiete bezeichnet man nach dem Symbol für neutralen Wasserstoff als H I-*Gebiete*. Durch die kurzwellige Ultraviolettstrahlung der Sterne wird er ionisiert und stellt dann ein sogenanntes Plasma aus Protonen und Elektronen dar. Diese H II-*Gebiete* befinden sich in der Nähe der heißen O- und B-Sterne, in schwächster Konzentration durchsetzen sie allerdings auch den gesamten Milchstraßenraum. Weite Regionen des gaserfüllten Milchstraßenraumes leuchten im Lichte der H_α-Linie, die bei der Rekombination besonders stark ausgestrahlt wird. In der unmittelbaren Nachbarschaft heißer Sterne, vor allem wenn diese in enger Gruppe auftreten, wird die Ausstrahlung so stark, daß man diese Gebiete hell leuchten sieht und als *Emissionsnebel* bezeichnet (vgl. Tafel XIII). Ein Beispiel ist der mit bloßem Auge sichtbare Gasnebel beim Stern θ im Orion (*Orionnebel*). Außer den Wasserstoff-Emissionslinien treten neben vielen schwächeren Emissionen besonders auch die Nebuliumlinien von Stickstoff N II und Sauerstoff O II und O III in Erscheinung. Daneben zeigen Emissionsnebel oft auch ein schwaches Kontinuum. Es rührt von dem im Bereich des leuchtenden Nebels befindlichen Staub her, an dessen festen Partikeln das Licht gestreut wird und einen entsprechenden Anteil am Leuchteffekt des Nebels hat.
Je geringer die Oberflächentemperatur des Sternes ist, desto mehr treten die Emissionen zurück. Sterne, die einem Spektraltyp später als B 2 angehören, vermögen den interstellaren Wasserstoff praktisch nicht mehr so stark zu ionisieren, daß Emissionslinien ausgesandt werden. In der Umgebung solcher Sterne finden sich die sogenannten *Reflexionsnebel*, deren Staubkörnchen das Licht dieser Sterne reflektieren.

Ein bekanntes Beispiel ist der Nebel, der durch die Plejadensterne sichtbar wird.
Sowohl bei den Emissionsnebeln als auch bei den Reflexionsnebeln erkennt man die faserige Struktur der turbulenten Anordnung der interstellaren Materie, ein Zeichen dafür, daß sie heftig bewegt ist.
Während die H II-Gebiete ein Emissionsspektrum zeigen, machen sich die H I-Gebiete durch Absorptionslinien im Spektrum der heißen Sterne bemerkbar, die von sich aus nur wenige Linien besitzen. Es handelt sich vor allem um Linien der Atome vom neutralen Eisen, Natrium, Kalium und Kalzium und des einfach ionisierten Kalziums sowie des Titans. Auch Moleküle sind im interstellaren Gas vertreten, so z. B. CH, CH^+ und CN.
Eine Emissionslinie des neutralen Wasserstoffs ist bekannt. Sie liegt allerdings nicht im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums, sondern im Bereich der sogenannten Radiostrahlung. Es ist die 21-cm-Linie, mit deren Hilfe der Nachweis ausgedehnter H I-Gebiete gelang, die sich längs der wahrscheinlich vorhandenen Spiralarme unseres Sternsystems lagern. So hat bei der Erforschung der interstellaren Materie und damit der Struktur des Milchstraßensystems die Radioastronomie ein weites Betätigungsfeld gefunden.

Dunkelwolken. Die wolkige Struktur der interstellaren Materie tritt in den leuchtenden Nebeln wie in den Dunkelwolken der Milchstraße deutlich hervor. Eine durchschnittliche Wolke hat einen Durchmesser von rund 15 pc und umschließt in diesem Volumen etwa 400 Sonnenmassen. Ihre Dichte liegt etwa zehnmal so hoch wie die mittlere Dichte des umliegenden wolkenfreien Gebietes. Die Gesamtabsorption einer solchen Wolke ist nicht hoch, nämlich etwa $0{,}2^{m}$. Der mittlere Abstand zweier Wolken beträgt etwa 50 pc. Durch die Bewegung der Wolken im Milchstraßensystem werden sich häufig Zusammenstöße ereignen, wobei neben einer starken Erhitzung auch Vorgänge sich abspielen, die zur Aussendung von Strahlen im Radiofrequenzbereich führen.

Besonders starke Konzentrationen der interstellaren Materie treten uns in den *Globulen* entgegen, die es in einem weiten Durchmesser- und Massenbereich gibt. Es sind dies jene kleinen, oft kreisrunden Dunkelwolken, die sich vor den leuchtenden Nebeln oder den dicht mit Sternen besäten Sternwolken der Milchstraße als fast schwarze Gebilde abheben (vgl. Tafel XIII). Bei Durchmessern von 10000 bis 100000 AE haben sie eine Absorptionswirkung von 1,5 bis 5^m; dazu müssen Massen vorhanden sein, die im allgemeinen ein Vielfaches der Sonnenmasse betragen. Ihrer rundlichen Form nach, der sie ihren Namen verdanken, könnte man sie für Massen halten, die bereits in Kontraktion begriffen sind und zur Entstehung eines oder mehrerer Sterne führen.
Die Absorptionswirkung der interstellaren Materie geht praktisch vollständig von festen Partikeln aus, deren Durchmesser zwischen 0,2 und 0,8 μm liegen. Dabei wirkt ein kompliziertes Streugesetz, so daß nicht nur eine Abschwächung, sondern auch eine Verfärbung des Sternenlichtes eintritt. Das Verhältnis von Verfärbung und Absorption ist dabei nahezu konstant.

Magnetfelder. Bei der Bewegung elektrisch geladener Teilchen entsteht ein Magnetfeld. Die turbulente und allgemeine Bewegung der interstellaren Materie muß somit zur Bildung lokaler sowie auch eines allgemeinen Magnetfeldes im Milchstraßensystem führen. Die Stärke des allgemeinen Feldes hat man zu 10^{-5} Gauß abgeschätzt. Das Magnetfeld der Erde ist vergleichsweise 100000mal so stark. Bei der Größe des Milchstraßensystems hat aber schon ein so schwaches Magnetfeld auf die interstellare Materie einen starken Einfluß. Außerdem wird die sogenannte *kosmische Strahlung*, deren primäre (extraterrestrische) Komponente aus rasch bewegten Teilchen (überwiegend Protonen und spurenweise auch andere Atomkerne) besteht, vom Magnetfeld der Milchstraße erfaßt und gespeichert. Die Partikel der kosmischen Strahlung, die man als die aktivste Komponente der interstellaren Materie ansieht, würden sonst nahezu gradlinig in den extragalaktischen Raum entweichen. Bei

dieser Speicherung im galaktischen Magnetfeld werden die Teilchen der kosmischen Strahlung derart durcheinandergewirbelt, daß sie auf die Erde praktisch aus allen Richtungen des Raumes mit etwa der gleichen Häufigkeit und Intensität einfallen.

DIE EXTRAGALAKTISCHEN NEBEL UND DAS UNIVERSUM

Bereits um die Mitte des 18. Jahrhunderts tauchte der Gedanke zum ersten Male auf (WRIGHT, LAMBERT, KANT), daß gewisse nebelartige Objekte an der Sternsphäre auch in den damals größten Teleskopen nicht auflösbare Sternsysteme seien, die sich im Raume außerhalb unserer Milchstraße befinden. Das war zu einer Zeit, als noch nicht einmal die ersten auf Messungen beruhenden Vorstellungen vom Aufbau unseres Sternsystems gewonnen waren. Es hat dann auch noch über anderthalb Jahrhunderte gedauert, bis ein Beweis für die extragalaktische Lage der zur Klasse der Spiralnebel zu rechnenden Objekte erbracht werden konnte.

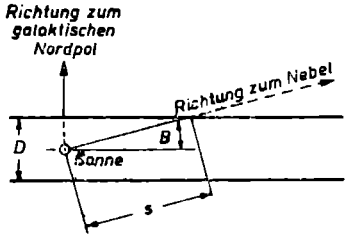
Die extragalaktischen Nebel als Sternsysteme

Besonders hinderlich für die endgültige Entscheidung wirkte sich die scheinbare Verteilung der Nebel an der Sternsphäre aus. Je mehr Nebel im Laufe der Zeit aufgefunden wurden, desto eindeutiger wurde erkennbar, daß diese meist symmetrischen Gebilde, deren Gestalten zwischen Kreisflächen und spindelförmig-langgestreckten Ellipsen liegen, auf den Kugelkappen um die beiden Pole der Milchstraße am häufigsten auftreten, mit Annäherung an den galaktischen Äquator seltener werden und in einer der Breite nach schwankenden, im Durchschnitt $\pm 15°$ breiten Zone fast überhaupt nicht vorkommen. Da man den tatsächlichen Grund für diese ungleichförmige Verteilung an der Sphäre damals noch nicht kannte, hielt man sie für eine Bestätigung

einer entsprechenden räumlichen Zuordnung zum Milchstraßensystem. Die Spiralnebel waren somit auf Grund genauerer und umfangreicher Messungen zunächst galaktische Objekte geworden und galten entweder als werdende Planetensysteme oder als in Rotation befindliche Sternhaufen. Dies insbesondere, nachdem es anscheinend gelungen war, geringfügige auswärtsgerichtete Eigenbewegungen in einigen der scheinbar größten, also nächsten Spiralnebel nachzuweisen.

Die Auffassung von der Zugehörigkeit der Spiralnebel zum Milchstraßensystem wurde durch zwei Entdeckungen erschüttert. Im Jahre 1885 wurde in dem bereits mit bloßem Auge sichtbaren Andromedanebel ein bisher nie beobachteter Stern der 7. bis 8. Größe gefunden, der nach einigen Wochen wieder unsichtbar wurde. Man deutete dieses Gestirn sofort als eine *Nova*, wie solche bereits öfters in unserem Sternsystem aufgeleuchtet waren. Verglichen etwa mit den *Neuen Sternen*, die zur Zeit Brahes und Keplers erschienen, mußte sich dieser Stern in einer Entfernung befinden, die weit über die Grenzen unseres Sternsystems hinausführte. Damit aber rückte auch der Andromedanebel aus dem Sternverband der Milchstraße hinaus und war somit als gleichgeordnetes Sternsystem erkannt. Spätere Entdeckungen weiterer Neuer Sterne in den benachbarten Spiralnebeln konnten die damals gewonnene grundsätzliche Erkenntnis nur bestätigen.

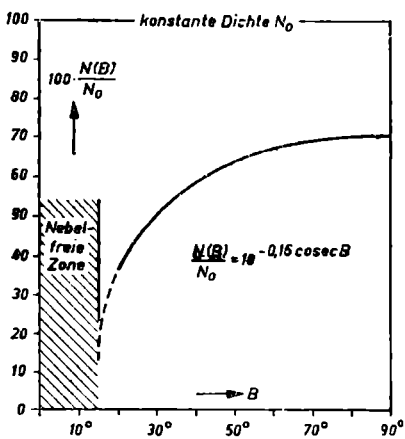
Die zweite Entdeckung, die eine einleuchtende Deutung für die merkwürdige Zuordnung der extragalaktischen Nebel zur Milchstraßenebene ermöglichte, war die Feststellung, daß der interstellare Raum nicht leer ist, wie man im 18. und 19. Jahrhundert noch annahm, sondern daß er von gas- und staubförmiger Materie äußerst dünner Verteilung erfüllt ist. Als erstes Anzeichen dafür drängten sich die dunklen Stellen innerhalb der strukturreichen leuchtenden Gebiete der Milchstraße auf. Ebenso deutlich sprachen die hellen Nebel für das Vorhandensein von Gas und Staub im Raume zwischen den Sternen. Auf Grund zahlreicher Untersuchungen setzte sich in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts die Erkennt-



Schematische Darstellung zur Erläuterung der Lichtabschwächung durch eine absorbierende Schicht der Dicke D

nis durch, daß in der Hauptebene unseres Sternsystems eine etwa 600 pc dicke Schicht von vielfach wolkiger Struktur lagert (Abb.), die das Licht der extragalaktischen Sternsysteme um so stärker abschwächt, je näher diese der Milchstraßenebene stehen. Der Grund liegt darin, daß der Weg des Lichtes durch die absorbierende Schicht mit abnehmender galaktischer Breite B zunimmt. Doch auch in Richtung nach den Polen der Galaxis findet noch eine Absorption statt, die sich dahin auswirkt, daß von den Nebeln, die uns bei freier Sicht bis zu einer bestimmten Größenklasse beobachtbar wären, nur ein Teil zugänglich bleibt. Die Anzahl N_0 der im außergalaktischen Raume im allgemeinen gleichförmig verteilten Nebel wird auf eine Anzahl $N(B)$ herabgedrückt; die Abbildung zeigt, wieviel von 100 vorhandenen Nebeln infolge der lichtabsorbierenden Schicht in den verschiedenen Breiten tatsächlich sichtbar sind. Innerhalb der Zone von $\pm 15°$ Breite treten danach überhaupt keine Nebel auf.

Eine Vorstellung der in unmittelbarer Nähe der galaktischen Pole bis zu einer bestimmten Sterngröße photographisch beobachtbaren Nebel $\mathfrak{M}$ (m) gibt die Tabelle auf nächster Seite. Vergleicht man diese Anzahlen mit den bis zu den gleichen Größenklassen sichtbaren Fixsternen am Pol der Milchstraße.



Die durchschnittliche Zunahme der Nebelanzahlen N (B) mit der galaktischen Breite B in Prozenten

Anzahlen der Nebel bis zur Helligkeit m

m	$\mathfrak{N}$ (m)
15	33100
16	105000
17	331000
18	1050000
19	3310000
20	10500000
21	33100000

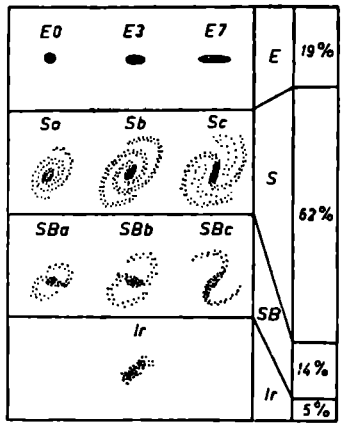
so findet man die überraschende Tatsache, daß bis zur 20. Größe die Sterne häufiger sind als die Nebel, von der 21. Größe ab jedoch die Nebelanzahlen überwiegen.

Haupttypen. So wie bei genauerer Beobachtung die große Zahl der Sterne sich als nicht einheitlich erweist, sondern in verschiedene deutlich voneinander unterscheidbare Typen gegliedert ist, so gibt es auch keine einheitliche Form des extragalaktischen Sternsystems, sondern es lassen sich aus der großen Fülle verschiedener Gestalten drei Haupttypen herausfinden: die sogenannten *elliptischen Nebel*, die man mit dem Buchstaben E bezeichnet, die *Spiralnebel*, allgemein mit S gekennzeichnet (vgl. Tafel XIV), und die *irregulären Sternsysteme* Ir.

Die erste Gruppe umfaßt die geschlossenen und symmetrischen Formen von Kugelgestalt bis zur Figur abgeplatteter Rotationsellipsoide mit einem maximalen Achsenverhältnis 1:3 (E7).

Die Objekte dieser Gruppe zeigen kaum eine erkennbare Struktur. Sie bestehen aus Sternen der Population II. Die E-Systeme nehmen etwa 19% aller extragalaktischen Nebel ein.

Zur zweiten Gruppe gehören die Objekte mit spiraligen oder kreisförmigen Armen, insgesamt etwa $^3/_4$ aller extragalaktischen Nebel. Somit erscheint die Bezeichnung *Spiralnebel* für die Gesamtheit aller dieser Sternsysteme auch gerechtfertigt. Dem äußeren Aussehen nach werden die spiraligen Sternsysteme in zwei Untergruppen eingeordnet, die *normalen Spiralnebel* S und die *Balkenspiralen* SB (vgl. Tafel XV), zwischen denen die Häufigkeitsverteilung 9:2 beträgt. Den Grad der Auflösung der Spiralen bezeichnet man mit den kleinen Buchstaben a, b, c, so daß Sa ein Nebel mit eng um den Kern gewundenen Spiralarmen und SBc eine



Die Haupttypen der extragalaktischen Nebel und ihre Häufigkeit in Prozenten

Balkenspirale mit weit geöffneten Armen ist. Das in der Mitte befindliche Kerngebiet besteht ebenfalls aus Sternen der Population II, der Bereich der Spiralarme aus solchen der Population I. In diesen Nebeln sind ausgedehnte Dunkelgebiete (vgl. Tafel XV) um so deutlicher sichtbar, je kleiner der Winkel zwischen Blickstrahl und Hauptebene des Systems ist.

Die dritte und kleinste Gruppe der irregulären Nebel umfaßt 5% aller Objekte. Man gewinnt den Eindruck, daß hier eine frühere symmetrische Struktur auf irgendeinem Wege aufgelöst worden ist (Abb.) oder sich erst ausbilden wird.

Gruppenbildung. Von den extragalaktischen Nebeln sind insgesamt drei Objekte mit bloßem Auge zu erkennen. Am nördlichen Himmel ist es der große Nebel im Sternbild Andromeda (vgl. Tafel XIV), am südlichen sind es die beiden *Magellanschen Wolken* (vgl. Tafel XV). Diese beiden irregulären Nebel bilden zusammen mit unserem Milchstraßensystem eine enge Gruppe, vergleichbar etwa einem dreifachen Stern. Ein ähnliches enges System von extragalaktischen Nebeln finden wir im Andromedanebel mit seinen beiden elliptischen Begleitern. Diese sechs Weltinseln bilden zusammen mit noch mindestens 10, wahrscheinlich aber 16 anderen Sternsystemen die sogenannte *Lokale Gruppe.* In ihr befinden sich die Nebel etwas dichter gedrängt als sonst im extragalaktischen Raume. Die durchschnittliche materielle Dichte ist $\varrho = 2{,}25 \cdot 10^{-26}$ g/cm³ oder anders ausgedrückt: 160 Nebel in einem Würfel mit einer Kantenlänge von 1 Mpc (1 Mpc = 1 Megaparsek = 1 000 000 pc). Der

mittlere Abstand zwischen den Sternsystemen beträgt hierbei $\bar{r} = 1{,}8 \cdot 10^5$ pc oder 600000 Lichtjahre.
Die Gruppenbildung sowie das Vorkommen mehrfacher Galaxien liegt zweifellos in dem Ablauf der Entstehung bzw. Entwicklung der extragalaktischen Systeme. Doch wäre es gegenwärtig sehr verfrüht, irgendwelche Vermutungen über derartige kosmische Vorgänge zu äußern. Der Grund, daß darüber noch keine konkreten Vorstellungen entwickelt werden konnten, liegt eindeutig in unseren äußerst dürftigen Kenntnissen von dem Aufbau und der materiellen Erfüllung des Raumes außerhalb unseres Milchstraßensystems.
Die Tendenz zur Gruppenbildung finden wir auch sonst noch unter den extragalaktischen Systemen. Es sind gegenwärtig über 16 Haufen von Galaxien bekannt mit zum Teil erheblich mehr Mitgliedern, als die Lokale Gruppe zählt. Wahrscheinlich sind die größten Nebelhaufen Zusammenballungen vieler lokaler Gruppen. Die Tabelle gibt eine kleine Übersicht über einige solcher Systeme von Galaxien.

Gruppen galaktischer Systeme

Haufen oder Gruppe	Zahl der Nebel	Abstand r in Mpc
Lokale Gruppe	16	—
Virgo-Haufen	2500	12
Pegasus I	100	38
Pegasus II	500	52
Coma	1000	74
Ursa Major I	300	150
Leo	300	200
Corona Borealis	400	210
Gemini	200	230
Bootes	150	390
Ursa Major II	200	420
Hydra	200	610

Bezeichnet werden diese Systeme nach dem Sternbild, durch dessen Sterne hindurch man sie beobachtet. Außer den Anzahlen der Nebel der einzelnen Gruppen sind auch die Abstände in Mpc angegeben. Von dem entferntesten Nebelhaufen im Sternbild Hydra, dessen Abstand über eine halbe Milliarde pc beträgt, sind nur die größten und absolut hellsten Nebel einer ausreichenden Untersuchung zugänglich.

Zwischen dem Abstand r eines Nebels, seiner scheinbaren m und absoluten Helligkeit M besteht hier wegen verschiedener besonderer Umstände eine Beziehung, die von der üblichen Form etwas abweicht, nämlich:

$$r_{pc} = 10^{1,127 + 0,167 \cdot m - 0,2 \cdot M}.$$

Je weiter von uns entfernt ein extragalaktischer Nebel ist, desto weniger Einzelheiten kann man aus den Beobachtungen gewinnen. In den benachbarten Systemen lassen sich einzelne Sterne erkennen. Es sind freilich die hellsten Typen. Allen voran stehen die Novae und vor allem die Supernovae, dann folgen die weißen und rotgelben Riesen bzw. Überriesen, darunter vor allem veränderliche Sterne. Aber auch andere Einzelobjekte konnten festgestellt werden: helle Gasnebel nach Art des großen Nebels im Orion, offene Sternhaufen wie die Plejaden und Präsepe sowie Kugelsternhaufen. Die Anordnung dieser Objekte in den extragalaktischen Nebeln entspricht ihrer Stellung im Milchstraßensystem, so daß durch die Untersuchungen gerade der benachbarten Nebel der Beweis erbracht wurde, daß die extragalaktischen Sternsysteme Geschwister unserer Milchstraße sind. Bis in welche Einzelheiten die Übereinstimmung geht, zeigt eindrucksvoll die Anordnung der lichtabsorbierenden Materie, die sich bei den entsprechenden Typen der Sternsysteme in der Hauptebene befindet, wie wir das in unserem Sternsystem festgestellt haben.

Je nach der absoluten Helligkeit der einzelnen Mitglieder oder Untersysteme in den extragalaktischen Nebeln erlischt die individuelle Nachweisbarkeit in verschiedenen Abständen. Setzt man als Grenzhelligkeit der sicheren Wahrnehmung in einem Nebel die scheinbare Sterngröße m = +19 fest, so erhält man für Objekte verschiedener absoluter Helligkeiten M die in der nebenstehenden Tabelle

Grenze r_{pc} der Auflösbarkeit eines extragalaktischen Nebels bei Objekten der absoluten Helligkeit M (m = +19)

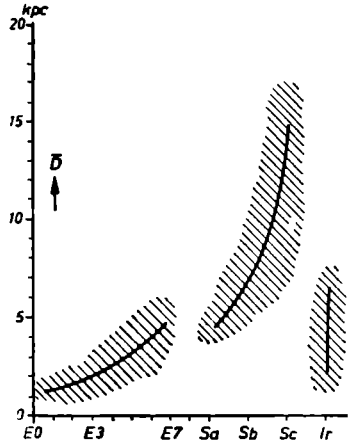
M	r_{pc}
−1	31800
−3	79800
−5	200000
−7	504000
−9	1260000
−15	22000000
−17	50400000

errechneten Distanzen. In den letzten beiden Zeilen findet man für die Supernovae mit M = —15 bzw. —17 die naturgemäß ebenfalls unscharfe Grenze der Feststellbarkeit so gewaltiger Einzelerscheinungen in den Nebeln. Zum Vergleich sind in einer Tabelle für einige extragalaktische Systeme in der Nachbarschaft des Milchstraßensystems die Entfernung r_{pc} und der mittlere Durchmesser D_{pc} angegeben.

Entfernung r_{pc} und Durchmesser D_{pc} einiger bekannter extragalaktischer Nebel

Bezeichnung	Typ	r_{pc}	D_{pc}	Sternbild
Große Magellansche Wolke	Ir	62000	8400	
Kleine Magellansche Wolke	Ir	65000	4400	
NGC 6822	Ir	405000	2500	
M 31	Sb		30000	Andromedanebel und Begleiter
M 32	E2	570000	570	
NGC 205	E5		1150	
M 33	Sc	580000	9000	Dreieck
IC 1613	Ir	590000	3200	
M 81	Sb	1800000	9400	Großer Bär
M 51	Sc	2100000	7300	Jagdhunde
M 101	Sc	2100000	16500	Großer Bär
Galaxis	Sb	—	25000	

Die besonders großen Durchmesser des Andromedanebels (M 31), der Milchstraße (Galaxis) und des Spiralnebels M 101 im Großen Bären, verglichen mit den Ausmaßen des schwachen Begleiters des Andromedanebels (M 32), zeigen, daß es auch unter den extragalaktischen Sternsystemen Riesen und Zwerge der Ausdehnung und Helligkeit nach gibt. Die Dimensionen der übrigen Nebel streuen im allgemeinen nur wenig um die statistischen Mittelwerte der verschiedenen Typen (s. Abb. nächste Seite). Bei allen diesen Beziehungen darf man allerdings nie vergessen, daß die Beobachtungsgrundlagen auch heute noch sehr dürftig sind und daß naturgemäß die innere Genauigkeit der Ergebnisse nicht sehr hoch angesetzt werden darf. Die Sternsysteme, deren Zustandsgrößen einigermaßen sicher bekannt sind, gehören der Lokalen Gruppe und deren nächster Umgebung an, also



Die Verteilung der mittleren Durchmesser $\bar{D}$ extragalaktischer Nebel

einem Volumen, das weniger als ein Milliontel des insgesamt erreichbaren Raumausschnittes beträgt. Wir stehen damit erst am Anfang der Erforschung der *Metagalaxis*, des Übersystems extragalaktischer Nebel.

Masse und Entfernung. Eine wichtige Beziehung scheint zwischen der absoluten Helligkeit und der Masse eines Nebels zu bestehen. Die absolute, meist photographische Helligkeit M_{pg} ist, da die spektralen Strahlungskurven der verschiedenen Nebel nur unwesentlich voneinander unterschieden sind, der Leuchtkraft proportional, gibt also ein Maß für die insgesamt ausgestrahlte Energie. Bei den Sternen besteht aus physikalischen Gründen eine Abhängigkeit der Leuchtkraft von der Masse. Dieser Umstand bedingt offenbar, daß auch bei den aus Sternen zusammengesetzten Nebeln eine ähnliche Beziehung, wenn auch mit einer größeren Streuung — nämlich $\mathfrak{M} = 10^{33,0-0,625 \cdot M_{pg}}$ — anzutreffen ist.

Die Berechnung der Masse extragalaktischer Nebel ist direkt nur bei den nahen Objekten möglich, bei denen die inneren Bewegungsverhältnisse beobachtet werden können bzw. deren Bewegung unter dem Einfluß benachbarter Systeme der Beobachtung erreichbar ist. Diesen Massenbestimmungen liegt die Erfahrungstatsache zugrunde, daß nach dem Gravitationsgesetz die Bewegungen innerhalb eines Sternsystems mit dessen Gesamtmasse zusammenhängen, bzw. die Voraussetzung, daß auch zwischen den Sternsystemen die Gravitation wirkt. Mit Hilfe der obigen Formel kann man nun auch für alle Sternsysteme einen Anhaltspunkt für die

Größe ihrer Masse gewinnen, deren absolute photographische Helligkeit bestimmbar ist. Der Weg von der unmittelbar zu gewinnenden scheinbaren Helligkeit der Nebel zur absoluten Helligkeit führt gemäß der bereits bekannten Beziehung $M = 0{,}833\,m + 5{,}633 - 5\,\lg r$ direkt zum Problem der Entfernungsbestimmung.

Welche Möglichkeiten gibt es zur Gewinnung von Entfernungen extragalaktischer Sternsysteme? Die Schwierigkeiten der Entfernungsmessung kamen bereits bei der Frage der kosmischen Stellung der Spiralnebel zum Vorschein. Den entscheidenden Fortschritt brachte das Aufleuchten einer Supernova im Andromeda-Nebel. Die Entfernung dieses zum Andromeda-Nebel gehörenden Sternes wurde auf dem Wege über die Methode der photometrischen Parallaxen bestimmt, die überhaupt als die wichtigste Möglichkeit in Frage kommt.

Die Genauigkeit der Entfernungsmessung wird hierbei wesentlich bedingt durch die Genauigkeit, mit der die absolute Helligkeit von Einzelobjekten in den Nebeln bekannt ist. Am größten ist die Sicherheit bei den Veränderlichen vom Typ der δ Cephei-Sterne. Man wird diese relativ hohe Genauigkeit nur bis zu Entfernungen von rund 0,5 Millionen pc erreichen, weil über diese Grenzentfernung hinaus auch die hellsten δ Cephei-Sterne nicht mehr beobachtbar sind. An Einzelsternen kommen dann nur noch die weißen und roten Überriesen sowie die Novae und Supernovae in Frage. Schließlich ist auch die absolute Gesamthelligkeit eines Nebels als Entfernungskriterium verwendbar. Es hat sich nämlich gezeigt, daß diese Helligkeiten für die einzelnen Nebeltypen innerhalb gewisser Grenzen liegen; für die elliptischen und unregelmäßigen Nebel bei etwa $-14^{m}_{,}8$ und für die eigentlichen Spiralen bei $-17^{m}_{,}6$. Wie genau, oder besser wie ungenau, solche Entfernungsbestimmungen werden können, ergibt sich aus dem Helligkeitsstreubereich, der für beide Typengruppen bis etwa $\pm 2^{m}_{,}1$ beträgt. Dementsprechend erhält man hiernach Entfernungswerte, die im Einzelfall um den Faktor 2,3 zu groß oder zu klein ausfallen können. Es ist außerordentlich wichtig, sich diesen Sach-

verhalt stets vor Augen zu halten, um die Zurückhaltung der Astronomen zu verstehen, wenn es sich um kosmologische Probleme handelt, deren Bedeutung in den hier überbrückten Räumen beginnt. Bei einer beobachtbaren Grenzgröße von $m = 21^m$ reicht diese Methode der Entfernungsbestimmung bei den schwächeren Typen bis 40 Millionen pc, bei den Spiralen bis 150 Millionen pc, überdeckt also den hauptsächlichsten Teil des heute erforschbaren Universums.

Eine zweite, noch weniger genaue Methode stützt sich auf die scheinbaren Durchmesser der Nebel. Es wird dabei angenommen, daß der wirkliche Durchmesser, etwa ausgedrückt in kpc, bekannt ist. Von den Nebeln der näheren Umgebung wissen wir, daß die Durchmesser in einem sehr weiten Bereich streuen (vgl. Tabelle S. 208). Von Extremen abgesehen betragen für die elliptischen und unregelmäßigen Nebel der Durchmesserbereich 0,8 bis 6,9 kpc und der Mittelwert $\overline{D} = 2{,}5$ kpc; für die Spiralen hat man Werte zwischen 4 und 16 kpc gefunden mit einem Mittelwert bei $\overline{D} = 7{,}8$ kpc. Wenn D' der in Bogenminuten gemessene Winkeldurchmesser des Nebels ist, dann hat man für die Entfernung die Beziehung

$$r = 3440 \cdot \frac{\overline{D}}{D'}.$$

Setzt man für $\overline{D}$ den zutreffenden Mittelwert ein, so kann in den ungünstigsten Fällen bei der ersten Gruppe die Entfernung um den Faktor 3 zu groß oder zu klein ausfallen, bei der zweiten Gruppe, den Spiralnebeln, nur um den Faktor 2. Die Reichweite dieser Methode liegt bei den Nebeln der ersten Gruppe in der Gegend von 30 Millionen pc, bei den Spiralen reicht sie bis etwa 100 Millionen pc.

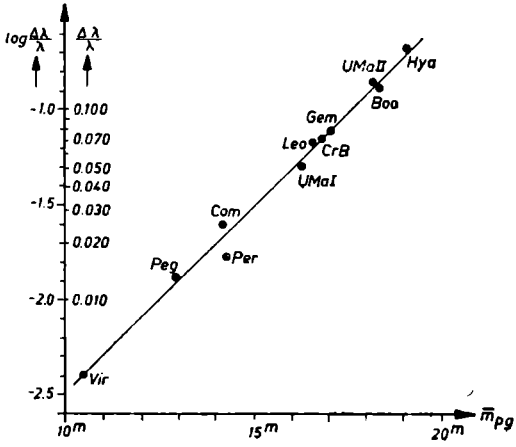
Rotverschiebung der Spektrallinien

Eine besondere Rolle für die Abstandsbestimmung der am weitesten entfernten extragalaktischen Sternsysteme spielt die Verschiebung der Linien in den Spektren in Richtung auf längere Wellen hin, kurz die *Rotverschiebung der*

Spektrallinien. Entdeckt wurde diese merkwürdige Erscheinung von WIRTZ im Jahre 1922 bei dem Versuch, die Bewegung der Sonne in bezug auf das System der extragalaktischen Nebel zu bestimmen. Es wurde bemerkt, daß anstelle der erwarteten Streuung der Linienverschiebung nach rot und violett bei den schwächeren Nebeln etwa von der 10. Größenklasse ab nurmehr die Rotverschiebung vorkam. Spätere mit Hilfe der großen amerikanischen Spiegelteleskope gewonnene genauere und weiter reichende Meßergebnisse förderten zwischen der scheinbaren Helligkeit der Nebel und dem Logarithmus des Ausdruckes $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ eine praktisch lineare Beziehung zutage.

Die Abbildung gibt eine Darstellung dieser Beziehung. Die Punkte sind Meßwerte, die man aus den bezeichneten Nebelhaufen gewann. Die photographische Nebelhelligkeit $\overline{m}_{pg}$ ist das Mittel aus den zehn hellsten Nebeln eines jeden Haufens. Das Verhältnis aus der Linienverschiebung $\Delta\lambda$ und der Wellenlänge λ der unverschobenen Linie ist im logarithmischen Maßstab aufgetragen, rechts der Ordinatenachse als Zahl, links direkt als Logarithmus.

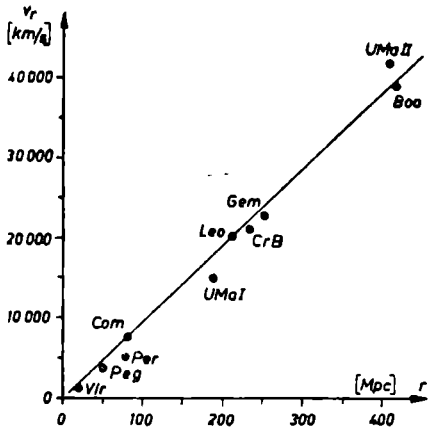
Die in der Abbildung dargestellte Beobachtungstatsache könnte man auch als Rotverschiebung über den scheinbaren Durchmesser der Nebel auftragen. An diese Beobachtungs-



Rotverschiebung $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ und scheinbare Helligkeit $\overline{m}_{pg}$ der Spiralnebel

tatsache, die es zu deuten gilt, knüpfen sich eine Reihe kühner Spekulationen. Ihre Zahl ist deshalb so groß, weil wir noch zu wenig und zu ungenaues über die Welt der extragalaktischen Nebel wissen, weniger als z. B. KOPERNIKUS zu seiner Zeit über das Planetensystem wußte.

Rotverschiebung als Doppler-Effekt. Mit abnehmender Nebelhelligkeit nimmt die Rotverschiebung zu. Es ist unzweifelhaft, daß der geringeren Helligkeit im Durchschnitt eine größere Entfernung entspricht. Wenn wir aber sagen, daß die Nebel mit um so größerer Geschwindigkeit davoneilen, je weiter sie entfernt sind, dann haben wir uns bereits *über* die Beobachtungstatsache hinaus festgelegt, indem wir die Rotverschiebung als *Doppler-Effekt* in eine Fluchtbewegung umdeuteten. Es ist wichtig, diesen Sachverhalt einmal ganz klar auszusprechen und zu erkennen, daß grundsätzlich auch noch andere Möglichkeiten der Deutung bestehen.
So geht ein Deutungsversuch dahin, die Rotverschiebung als Folge davon zu betrachten, daß die Energie der Lichtquanten auf der weiten Reise durch den Weltraum mit der Zeit abnimmt. Eine solche Deutung liegt aber vom Standpunkte der theoretischen Physik heute weit außerhalb des Bereichs des Möglichen, und man betrachtet die *Rotverschiebung* allgemein als Anzeichen dafür, *daß wir uns im extragalaktischen Raume innerhalb einer räumlich auseinanderfließenden (divergenten) Strömung befinden,* an der alle unseren Rieseninstrumenten zugänglichen Nebel teilnehmen. Wir wissen naturgemäß noch nicht, woher diese Strömung ihren Ursprung nimmt und wohin sie führen mag. Die geringfügigen Abweichungen von der streng radialen Auswärtsbewegung überlagern sich in der näheren Umgebung des Beobachters der dort noch sehr kleinen Divergenzbewegung. Dies führt dahin, daß z. B. in der Lokalen Gruppe alle möglichen Werte der Linienverschiebung, auch negative, auftreten, wie z. B. beim Andromeda-Nebel. Doch liegen die daraus folgenden Geschwindigkeiten nur in der Größenordnung einiger hundert Kilometer je Sekunde.
Hat man sich erst einmal entschlossen, die *Rotverschiebung*



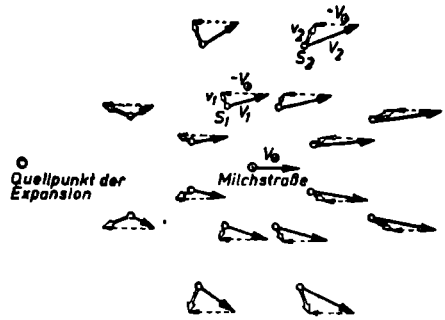
Die Beziehung zwischen der Fluchtgeschwindigkeit v_r und der Entfernung r der extragalaktischen Nebel

als *Doppler-Effekt* zu deuten, dann ist eine andere Darstellung der in der Abbildung der vorletzten Seite gezeigten Beobachtungsergebnisse von großem Nutzen. Aus der Rotverschiebung erhält man gemäß der Formel für den Doppler-Effekt die *Fluchtgeschwindigkeit*

$$v_r = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

und aus der scheinbaren Helligkeit mit Hilfe der Beziehung $\lg r = 0{,}167 \cdot m + 4{,}647$ den Abstand (Abb.). Die ungefähr längs einer Geraden liegenden Punkte sind die Grundlage für die Formel $v_r = H \cdot r$, in der v_r die in positiver, also nach außen weisender radialer Richtung liegende Fluchtgeschwindigkeit in km/s, r der Abstand in Mpc ist und H die sogenannte *Hubble-Konstante* bezeichnet ($H = 95\,\mathrm{km/s \cdot Mpc}$). Doch auch hier sollte man sich stets vor Augen halten, daß außer der Deutung der Linienverschiebung als Doppler-Effekt noch eine Annahme über die absolute Helligkeit der betrachteten Nebel eingeht.

Die Annahme einer allgemeinen divergenten Strömung der Materie in dem unseren Teleskopen zugänglichen Bereich des Weltalls, zu deren Begründung das Phänomen der Rotverschiebung herangezogen werden kann, scheint nun wieder für den Menschen eine Sonderstellung zu ergeben, insofern er sich im Quellpunkt dieser Strömung sieht. Doch diese *zentrale* Stellung des Menschen bzw. unseres Milchstraßensystems im Weltall ist ebenso *scheinbar* wie die Lage der Erde im Weltzentrum, die seinerzeit PTOLEMÄUS auch



Zur Entstehung der Expansionserscheinung in einer allgemeinen kosmischen Quellströmung

durch wissenschaftliche Beobachtungen glaubte belegen zu können.

Zum Verständnis dieses Sachverhaltes betrachten wir (Abb.) eine zweidimensionale Darstellung der vom angenommenen Quellpunkt ausgehenden kosmischen Expansionsströmung. Unser Milchstraßensystem ist schematisch von 16 symmetrisch angeordneten Nebeln umgeben, von denen zwei, nämlich S_1 und S_2, hervorgehoben sind. Zufolge der tatsächlichen divergenten Strömung bewegen sich diese 17 Weltinseln mit Geschwindigkeiten V, die nach Größe und Richtung durch die stark ausgezogenen Pfeile gemäß der Formel $V = H \cdot R$ gegeben sind (H = Hubble-Konstante, R = Abstand vom Quellpunkt).

Um die Relativbewegung der 16 Nebel zu erhalten, wie sie sich einem in unserem Sternsystem mitbewegten Beobachter darstellt, muß der Geschwindigkeitspfeil der Milchstraße $V_\odot$ von den Pfeilen der Quellströmung nach Größe und Richtung (vektoriell) abgezogen werden. Die dann übrigbleibenden Geschwindigkeiten v bilden insgesamt eine völlig gleichartige, jetzt aber *galaktozentrische* Quellströmung, die identisch ist mit jener Strömung, von der wir auf Grund der beobachteten Rotverschiebungen gemäß der Formel $v_r = H \cdot r$ ausgegangen waren. Was für die zweidimensionale divergierende Strömung zutrifft, gilt ebenfalls für eine gleichartige räumliche Strömung. Es folgt daraus, daß in einer Welt derartig expandierender Sternsysteme ein Beobachter auf jedem beliebigen an dieser Strömung teilnehmenden Weltkörper vom Bewegungszustand der Nebel den gleichen Eindruck gewinnen muß. Dieser Sachverhalt, zum Prinzip erhoben, wird uns später als *Weltpostulat* begegnen.

Hubble-Konstante. Kombiniert man die Formel der Expansion mit der des Doppler-Effektes, so ergibt sich $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{H}{c} \cdot r$, eine Beziehung zwischen der Linienverschiebung und der Nebelentfernung, die sogar gelten muß, wenn die Deutung als Doppler-Effekt nicht richtig sein sollte. Für sehr entfernte Nebel, in denen keine δ Cephei-Sterne oder anderen markanten Einzelobjekte feststellbar sind, liefert die Entfernungsbestimmung auf Grund der Rotverschiebung der Spektrallinien die zuverlässigsten Werte. Natürlich darf man nie vergessen, daß die Beobachtungsgrößen, die dieser Formel zugrunde liegen, noch mit relativ großen Fehlern behaftet sind und daß man folglich noch nicht endgültig weiß, ob die Formel selbst in den Grenzen der Genauigkeit streng gilt. Setzt man dies einmal mangels besserer Kenntnisse voraus, dann braucht man nur die Hubble-Konstante zu kennen. Ihr Wert wurde um das Jahr 1940 mit $H = 580$ km/s · Mpc angegeben, um 1952 mit $H = 260$, und wird heute mit rund $H = 100$ gegeben. In diesem Wandel drückt sich zweierlei aus: einmal der in den letzten beiden Jahrzehnten gemachte Fortschritt und zum anderen die Schwierigkeit, mit der man zu kämpfen hat, wenn man solche an der Grenze des Beobachtbaren liegende Messungen ausführen muß.

Im vorliegenden Fall ist die Bestimmung der Hubble-Konstante nur möglich auf Grund der Kenntnis von Entfernungen, die wesentlich größer als 10 Mpc sein müssen. Die nurmehr indirekten Methoden dieses Abstandsbereiches werden geeicht an Entfernungen, die mit Hilfe der δ Cephei-Veränderlichen gewonnen sind, also gemäß früherer Überlegungen unterhalb 500 kpc liegen. Die δ Cephei-Methode anderseits kann aber wieder nicht direkt an die trigonometrischen Entfernungsbestimmungen angeschlossen werden, sondern bedarf vermittelnder Beobachtungen. In dem der Winkelmessung zugänglichen Entfernungsbereich von etwa 100 pc Radius befindet sich leider kein einziger δ Cephei-Stern. Wie schwierig diese vermittelnden Beobachtungen auszuführen sind, zeigt die bekannte Tatsache, daß

beim ersten Anschluß des einen Meßbereichs an den anderen eine Unsicherheit verblieb, die um den Faktor 2,2 zu kleine Entfernungen lieferte. Neuere Untersuchungen erhöhten diesen Faktor auf rund 3 ($H = 190$). In jüngster Zeit sind Werte für die Hubble-Konstante veröffentlicht worden, die zwischen 57 und 134 liegen. Angesichts der gegenwärtig noch herrschenden Unsicherheit erscheint es ratsam, für die Hubble-Konstante den runden Wert von $H = 100$ anzunehmen. Vom Palomar-5-m-Spiegel, dessen bis heute vorliegende Beobachtungen nur zum geringsten Teil ausgewertet sind, erwartet man Ergebnisse, die der augenblicklichen unbefriedigenden Situation ein Ende bereiten dürften.

Verteilung der Nebel im Raum

Nach allem, was wir über die Verteilung der Nebel im Raume wissen, scheint eine nahezu gleichförmige Anordnung vorhanden zu sein. Um eine noch mehr ins einzelne gehende Vorstellung zu gewinnen von der Erfüllung des den größten Teleskopen zugänglichen Teils des Weltraumes mit Materie, ist die bereits früher für unser Sternsystem gestellte Frage nach der Anzahl der Objekte bis zu einer bestimmten Helligkeitsklasse hier für die Nebel zu wiederholen. An der Sphäre sind gemäß den Auszählungen photographischer Aufnahmen bis zur Sterngröße m an Nebeln vorhanden

$$\mathfrak{N}\,(\mathrm{m}) = 10^{0{,}50\,\cdot\,\mathrm{m}\,-\,2{,}98}.$$

In der Konstanten 2,98 sind zwei uns besonders interessierende Größen enthalten, nämlich die mittlere Raumdichte $\bar{\varrho}$ und die mittlere Masse eines Nebels $\mathfrak{M}$. Beide Werte sind jetzt erst ihrer Größenordnung nach bekannt. Bei der mittleren Masse eines extragalaktischen Nebels von $5 \cdot 10^{10}$ Sonnenmassen wird $\bar{\varrho} = 10^{-29}$. Dies bedeutet aber, anders ausgedrückt, daß sich in einem Kubikmegaparsek (1 Mpc^3) im Durchschnitt 3 Galaxien befinden. Hieraus wiederum folgt für den mittleren Abstand zwischen zwei extragalaktischen Sternsystemen $\bar{r} = 0{,}7$ Mpc oder 2,3 Millionen

Lichtjahre. Setzt man diesen Wert ins Verhältnis mit den Dimensionen der Systeme, wobei der mittlere Durchmesser der Spiralnebel mit $\overline{D} = 7{,}8$ kpc zugrunde gelegt werden soll, so erhält man die überraschende Tatsache, daß die Entfernungen zwischen den Sternsystemen rund das 90fache ihrer Durchmesser betragen.
Vergleicht man hiermit das nämliche Verhältnis bei den Sternen im galaktischen System — es beträgt 47 Millionen —, so folgt daraus, daß die Fixsterne relativ weiter voneinander entfernt sind. Das hat zur Folge, daß Begegnungen zweier Sterne im Milchstraßensystem viel seltener sind als Kollisionen zwischen den extragalaktischen Nebeln.

Durchdringung zweier Milchstraßen. Man hat abgeschätzt, daß in etwa 1 Milliarde Jahren sich ein Zusammenstoß zweier Sterne im Milchstraßensystem ereignet, wenn man die Größe und Relativgeschwindigkeit der Sonne als typisch für die Galaxis betrachtet. Bei der oben angegebenen Raumerfüllung unter Berücksichtigung der mittleren Geschwindigkeit der Galaxien relativ zueinander findet man eine Nebelkollision in dem überblickbaren Raume innerhalb 500 000 Jahren.
Von einer Begegnung zweier Sterne kann man wohl erst sprechen, wenn sich zwei Milchstraßensonnen auf etwa Neptunsentfernung genähert haben. Die so definierte Dauer eines solchen Zusammenstoßes ist von der Größenordnung 100 Jahre, also kurz im Verhältnis zur Zeit zwischen zwei Begegnungen.
Infolge der größeren relativen Besetzung mit Objekten im extragalaktischen Raume und der verhältnismäßig kleinen Relativgeschwindigkeit von 200 km/s dauert eine Begegnung zweier Nebel viel länger als die Zeitspanne zwischen zwei Kollisionen im gesamten Raume. Dabei soll hier als Begegnungsdauer nur die Zeit gelten, die bei Berücksichtigung der gegenseitigen Anziehung zwischen der ersten und letzten Berührung der beiden scheibenförmigen Körper verstreicht, wenn angenommen wird, daß sich die Scheiben in ihren zusammenfallenden Hauptebenen durchdringen.

Ein solches Ereignis würde unter den geschilderten Verhältnissen fast 70 Millionen Jahre dauern. Während dieser Zeit würden sich gemäß der Häufigkeit der Nebelkollisionen aber rund 150 weitere Zusammenstöße ereignen; da aber diese Bewegungsverhältnisse dauernd bestehen, sollten in dem ganzen überblickbaren Ausschnitt des Universums etwa ebenso viele kollidierende Nebel beobachtbar sein. Beachtet man, daß durch die Absorptionsschicht der interstellaren Materie ein großer Teil dieser Nebelwelt der Beobachtung entzogen ist, so scheint die festgestellte Anzahl der Kollisionen dem zu entsprechen, was man auf Grund der gegenwärtigen Raumerfüllung und des derzeitigen Bewegungszustandes der Nebel zu erwarten hat.
Zum Begriff der Begegnung bzw. Kollision im Weltall bleibt noch etwas zu sagen. Die Auswirkung eines zentralen oder streifenden Zusammenstoßes zweier Sterne dürfte eine Katastrophe allergrößten Ausmaßes zur Folge haben. Die früher geäußerte Ansicht, wonach eine solche Sternkollision zum Aufleuchten eines *Neuen Sternes* führt, ist heute überholt. Es lohnt kaum der Mühe, einen solchen Vorgang durchzurechnen, weil — wie wir eben gehört haben — keine Aussicht besteht, ein solches Ereignis zu beobachten.
Ganz anders verläuft der Zusammenstoß zweier extragalaktischer Nebel, die wir uns als zwei gleichartige Spiralnebel vorstellen wollen, im Aufbau ähnlich wie unser Milchstraßensystem. Der größte Teil der Masse eines extragalaktischen Nebels ist in den großen Körpern, den Sternen, konzentriert. Ein von System zu System schwankender Bruchteil in der Gegend von vielleicht 5% der Masse verteilt sich auf die interstellare Materie, also überwiegend auf den gasförmigen Wasserstoff. Man könnte nunmehr also etwas schematisch sagen: Ein Spiralnebel besteht hinsichtlich seiner Masse zu 95% aus Sternen, den Rest bildet die vor allem in den äußeren Bezirken der Hauptebene angereicherte interstellare Materie. Zwischen diesen beiden kosmischen Körpern besteht eine so enge Gemeinschaft wie beispielsweise zwischen dem Knochengerüst eines Menschen und seiner plastisch-flüssigen Materie.

Während nun bei den Sternen eines Spiralnebels, wie wir bereits wissen, eine Wechselwirkung durch Stöße praktisch kaum vorkommt, spielen sich zwischen den Atomen des interstellaren Gases ununterbrochen Zusammenstöße ab. Eine anschauliche Darstellung der Häufigkeit dieser Zusammenstöße ist kaum möglich. Ein gedachter kosmischer Beobachter, der mit Hilfe eines geeigneten Mikroskopes 1 cm^3 des interstellaren Raumes überwachen würde, könnte etwa alle 4000 Jahre eine Kollision konstatieren. Das möchte uns wenig erscheinen. Um so mehr müßte in Erstaunen versetzen, daß in einem Volumen von der Größe der Erdkugel unter den gleichen Verhältnissen 10 000 Billionen (10^{16}) Stöße in der Sekunde stattfinden.
Durchdringen sich nun zwei solche Sternsysteme mit einer Relativgeschwindigkeit von 200 km/s, so wird im Augenblick der vollständigen Vereinigung die Masse bzw. die Dichte verdoppelt. Für das Untersystem der Fixsterne bewirkt dies nur eine Vervierfachung der Kollisionszahlen, was so viel bedeutet, daß während der relativ kurzen Dauer der Begegnung kein einziger Zusammenstoß zwischen den Sternen der beiden Systeme stattfinden dürfte. Dies liegt einfach an den unvorstellbar großen Abständen der Sterne im Verhältnis zu ihren Ausmaßen.
Ganz anders sieht es bei dem Zusammenstoß der beiden *gasförmigen* Untersysteme der kollidierenden Spiralnebel aus. Hier stoßen ja bereits innerhalb eines jeden der beiden Untersysteme die Atome oft zusammen, wenn auch freilich vom Standpunkte des einzelnen Atoms wiederum sehr selten, nämlich nach Zurücklegen einer Wegstrecke vom 6fachen Abstand des Pluto von der Sonne. Doch bei dem Zusammentreffen der beiden Körper der interstellaren Materie kommt es zu einem vollständigen Abbremsen beider Gaskörper und dabei zu einer vollständigen Umsetzung der relativen kinetischen Energie, die zur Ionisation und Anregung der Atome, also zu intensiver Ausstrahlung, zur Erhöhung der thermischen Bewegung der Teilchen des Gases und zufolge dieser enormen Temperaturerhöhung (50 000 bis 100 000 °K) zur Verdampfung der festen Partikel

des in beiden Körpern vorhandenen kosmischen Staubes führt.
Nach dem Zusammenstoß der beiden Spiralnebel bleiben drei Körper zurück: die beiden vom kosmischen Staub befreiten und sich wieder voneinander entfernenden Sternsysteme und zwischen ihnen die gesamte, aus beiden Systemen stammende interstellare Materie, die zu einem expandierenden extragalaktischen Gasnebel vereint wurde, dessen physikalischer Zustand gegenüber den Verhältnissen vor dem Zusammenstoß stark verändert ist.

Intergalaktische Materie. Bemerkenswert ist jedenfalls die Tatsache, daß als Ergebnis solcher unvermeidbarer Kollisionen auch in den intergalaktischen Raum Atome verstreut werden, wie uns der auf diesem Wege entstandene *intergalaktische Gasnebel* deutlich gemacht hat. Im Laufe der Zeit muß die Dichte dieser *intergalaktischen Materie* zunehmen. Von den im oben angedeuteten Bereich der Spiralnebel bis zur scheinbaren Helligkeit $m = 21$ befindlichen Sternsystemen hat erst reichlich eins von tausend kollidiert. Die Dichte der intergalaktischen Materie kann also, verglichen mit der mittleren Dichte der in den Nebeln konzentrierten Massen, nur äußerst gering sein, was die Beobachtungen zu bestätigen scheinen. Eine Entstehung von Spiralnebeln aus intergalaktischer Materie zur gegenwärtigen Zeit, analog zur Entstehung von Sternen in der Milchstraße, dürfte daher so gut wie ausgeschlossen sein und wegen der ständigen Expansion kaum jemals möglich werden.

Verdünnungseffekt. Die Beobachtungstatsache der *Rotverschiebung* bringt noch eine Reihe weiterer Folgerungen mit sich, die jetzt auch betrachtet werden sollen. Die Verschiebung der an einer Stelle λ im Spektrum befindlichen Energie nach dem langwelligen Ende bedeutet einfach insofern eine Energieminderung, als die Quanten des roten Lichtes energieärmer sind als die des violetten Lichtes gemäß $E = h\nu = \frac{h\,c}{\lambda}$. Außerdem tritt vielfach noch insofern ein

Energieverlust ein, als aus dem spektralen Empfangsbereich der Aufnahmeapparatur bei den tatsächlichen Verhältnissen am roten Ende ein größerer Betrag durch Verschiebung austritt als am violetten Ende eintritt. Der Verlust ist selbstverständlich um so beträchtlicher, je größer der Betrag der Linienverschiebung wird.
Zu diesem Helligkeitsverlust, der in jedem Falle auftritt, gleichgültig welche Ursache die Rotverschiebung hat, kommt noch ein weiterer Energie- bzw. Helligkeitsverlust hinzu, wenn die Deutung der Rotverschiebung als Doppler-Effekt zu Recht besteht. Infolge der von dem Beobachter fortgerichteten Bewegung der Nebel verteilt sich die in einer Sekunde ausgestrahlte Energie nicht nur auf die Strecke von 300 000 km, sondern zusätzlich noch auf den in 1 Sekunde zurückgelegten Weg, so daß — anschaulich gesprochen — eine Art *Verdünnung* der Strahlungsenergie und eben dadurch noch zusätzlich eine Minderung der Nebelhelligkeit eintritt. Für diese zweite Art der Intensitätsschwächung hat sich die Bezeichnung *Verdünnungseffekt* eingebürgert, zum Unterschied gegen den erstgenannten *Energieeffekt*. Die Summe dieser beiden Effekte ergibt eine Helligkeitsminderung, die in Sterngrößen ausgedrückt im gegenwärtigen Beobachtungsbereich näherungsweise $m = 6{,}5 \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ beträgt. Darüber hinaus muß man mit einer weiteren Schwächung der Strahlungsintensität durch Absorption in der extragalaktischen Materie rechnen. Doch scheint dieser Effekt nach den gegenwärtigen Beobachtungen so gering zu sein, daß er heutzutage meist nicht in Betracht gezogen wird.

Grenzen der Wahrnehmbarkeit. Schließlich ermöglicht die Deutung der Rotverschiebung als Doppler-Effekt noch eine Folgerung, die unter gewissen Bedingungen eine endliche Welt vorzutäuschen vermag. Bis in die gegenwärtig erreichten Raumestiefen hat sich die in der Abbildung Seite 214 dargestellte Beziehung zwischen der Expansionsgeschwindigkeit v_r und der Entfernung r als linear im Bereich der

stets unvermeidbaren Beobachtungsfehler erwiesen. Die Expansionsgeschwindigkeit hat nun aber schon rund ein Fünftel der Lichtausbreitungsgeschwindigkeit erreicht und müßte folgerichtig in der 5fachen Entfernung dem Wert *c* sehr nahekommen. Dabei würde der Lichtverlust gemäß den beiden genannten Effekten über alle Grenzen anwachsen, so daß uns von den Nebeln in jenen Entfernungen keine Strahlung mehr erreichen könnte. Doch diese Konsequenz dürfte uns vielleicht erspart bleiben; denn in den allerletzten Ergebnissen scheint sich bei den entferntesten Nebeln eine Abweichung von der Linearität anzudeuten, die allerdings heute noch keineswegs als gesichert anzusehen ist. Nehmen wir einmal an, diese Abweichung würde tatsächlich vorhanden sein, dann müßte sie, wenn das eben angedeutete Dilemma vermieden werden sollte, so groß sein, daß in keinem endlichen Abstand die Expansionsgeschwindigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung nahekommt. Doch schon *vor* Erreichen der Lichtgeschwindigkeit würde praktisch die Wahrnehmbarkeit der Sternsysteme aufhören.

Struktur des beobachtbaren Universums

Die Frage nach der Struktur des Universums enthält noch eine Menge von Problemen, die gerade deshalb so zahlreich sind, weil noch zu wenig gesicherte Ergebnisse aus diesem Bereich des Weltalls vorliegen. Den auch hier geltenden Zusammenhang zwischen Beobachtungswerten und möglichen Deutungen kann man sich an einem Vergleich verständlich machen. Die Beziehung zwischen zwei Größen **x** und **y**, die wir uns in einem ebenen, rechtwinkligen Koordinatensystem (Millimeterpapier) aufgetragen denken, soll bestimmt werden. Es müssen zu diesem Zweck zusammengehörige Werte von **x** und **y** bestimmt werden. Jedes *Wertepaar* (**x**, **y**) liefert in dem Koordinatensystem einen Punkt. Liegt nur ein solcher gemessener Punkt vor, dann ist eine Aussage über die gesuchte Beziehung überhaupt nicht möglich. Sind zwei Punkte vermessen, dann wird die

Zahl der Möglichkeiten stark vermindert, jedoch nur größenordnungsmäßig der allgemeine Charakter der Beziehung angedeutet, wenn die Punkte relativ nicht zu nahe beieinanderliegen. Durch drei geeignet liegende Meßpunkte werden die Möglichkeiten weiter eingeschränkt, und so geht es fort. Erst eine große und hinreichend dicht liegende Zahl von Meßpunkten gibt eine gewisse Sicherheit des Ergebnisses, wenngleich auch dann immer noch, wegen der unvermeidbaren Meßfehler, mehrere Kurven durch die Punkte dargestellt werden können. Dieser Umstand macht es dem im Gebiet der exakten Naturwissenschaften arbeitenden Forscher zur Pflicht, *einen Naturvorgang nur insoweit als erkannt zu betrachten, als der Meßbereich sich erstreckt, und grundsätzlich niemals Aussagen, die über den Beobachtungsbereich hinausgehen, als gesicherte Ergebnisse hinzustellen.*

Die Erkenntnis, daß man physikalische Gesetzmäßigkeiten mit der Metrik des Raumes in Beziehung setzen kann, geht auf den Mathematiker Riemann zurück, der bereits in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts im Zusammenhang mit allgemeineren Problemen die Geometrie des endlichen sphärischen bzw. elliptischen Raumes entwickelt hat. Entsprechende Möglichkeiten bestehen auch bei anderen Raumarten, z. B. bei dem von Lobatschewski und Bolyai dargestellten hyperbolischen Raume.

Die ersten Anwendungen dieser damals zunächst nur theoretisch bedeutungsvollen Ergebnisse erfolgte auch im Hinblick auf die extragalaktischen Nebel im Anschluß an die Gravitationstheorie von Einstein. Bei diesen Untersuchungen, die wegen der bereits mehrfach erwähnten wenigen gesicherten Beobachtungstatsachen in großer Mannigfaltigkeit sich ausbreiten konnten, sind — wie bei allem Neuen — zahlreiche Möglichkeiten betrachtet worden, von denen allerdings eine Reihe längst wieder überholt sind. Da es sich anscheinend um sensationelle Theorien handelte, ist gleich auch ein großer Kreis Unberufener mit diesen Untersuchungen bekannt geworden, und es ist eine Ironie des Schicksals, daß vielfach ausgerechnet Menschen sich mit

diesen schwierigen und noch keineswegs in allen Einzelheiten geklärten Problemen befassen wollten, die an den umfangreichen und gesicherten Erkenntnissen der astronomischen Forschung nur ein sehr geringes Interesse zeigten. So waren die Voraussetzungen für das Aufkommen von Mißverständnissen denkbar günstig, und es darf uns nicht wundern, wenn heute noch solche meist sehr zählebige Irrtümer ihr Schattendasein fristen.

Kosmologie. Das in Anlehnung an spekulative Versuche im Altertum heute allgemein als *Kosmologie* bezeichnete Arbeitsgebiet, in das die eben gestreiften Fragen nach der Struktur des Weltraumes gehören, umfaßt darüber hinaus die Probleme der Entstehung und Entwicklung der physikalischen Zustände der Weltkörper im Universum. Nach dem oben aufgestellten strengen Forschungsprinzip der exakten Naturwissenschaften liegt das Gebiet der Kosmologie zwischen strenger Wissenschaft und einer mathematisch gezügelten Spekulation. Man kann über die zur Kosmologie gehörenden Fragen nur dann etwas aussagen, wenn man die Erkenntnisse des jeweils überblickbaren Bereichs unseres Wissens in das zum gleichen Zeitpunkt unerreichbare Gebiet extrapoliert. Derartige Extrapolationen sprengen jedoch den Rahmen der gesicherten Erkenntnisse.
Um einigermaßen berechtigte Aussagen machen zu können, geht man von dem aus, was an Beobachtungstatsachen vorliegt, legt sich gewisse *Weltmodelle*, die natürlich mathematisch formuliert sein müssen, zurecht und prüft nach, inwieweit Schlußfolgerungen, die man aus dem mathematischen Formelapparat ableiten kann, in dem überblickbaren Bereich des Universums realisiert sind. Als oberste Bedingung für die Formulierung solcher Weltmodelle hat man das *Weltpostulat* aufgestellt; seine Beachtung macht man jedem zur Pflicht, seine Berechtigung erscheint auch einleuchtend, es ist jedoch weder logisch noch empirisch beweisbar. *Man sollte oder möchte meinen* — so könnte dieses Weltpostulat formuliert werden —, *daß die Welt in allen ihren hinreichend groß gewählten Teilgebieten gleichartig gestaltet ist und*

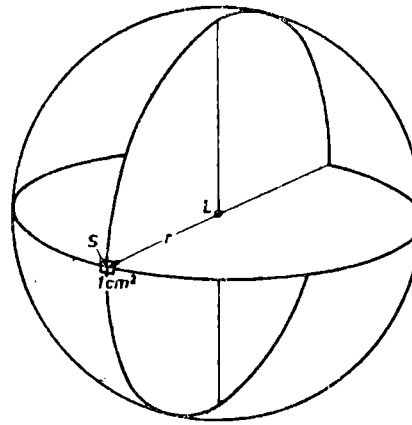
folglich einem Beobachter in jedem beliebigen Punkt dieser Welt einen grundsätzlich gleichartigen Anblick bietet. Man sollte sich klarmachen, daß eine Abweichung von diesem Postulat oder seine Negation beim heutigen Stand unsres Wissens die Kosmologie von vornherein in eine hoffnungslose Lage brächte, wenn nicht überhaupt unmöglich machte.

Eine besondere Rolle bei der Behandlung der kosmologischen Fragen werden naturgemäß jene Gesetze spielen, deren universelle Geltung sich in dem bekannten Teil der Welt erwiesen hat und deren Vorhandensein für den Bestand der Welt des Großen wie für die Beobachtbarkeit von einschneidender Bedeutung sind. Die in der astronomischen Forschung notwendigerweise stets gemachte Annahme, daß die Gesetze der Natur, insbesondere die der Physik, immer und überall gelten, gehört zu den unveräußerlichen Grundlagen der Astronomie und muß auch hier beibehalten werden. Wenn nicht, wird der Spekulation ein weites Feld geöffnet und der Boden der exakten Forschung solange verlassen, als nicht wohlbewiesene Tatsachen das Gegenteil zeigen. Dies ist aber bis heute noch in keinem einzigen Falle geschehen.

Zwei Gesetze, deren universelle Bedeutung auf der Hand liegt, sind das *Gesetz der Strahlenausbreitung*, meist als *Lichtausbreitungsgesetz* bezeichnet, und das *Gesetz der allgemeinen Schwere* oder kurz das *Gravitationsgesetz*. Man nennt so umfassende und in ihrer Reichweite so bedeutungsvolle Gesetze daher im Zusammenhang mit den kosmologischen Problemen *Weltgesetze*. Die beiden Weltgesetze führen, wenn man sie auf ein unendlich großes Weltall anwendet, zu Unzuträglichkeiten, auf die man bereits im 17. Jahrhundert gestoßen war. Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten kann man verschiedene Wege beschreiten.

Gesetz der Lichtausbreitung. Betrachten wir als erstes das Gesetz der Lichtausbreitung (Abb. S. 227). Der Stern kann, aus großer Entfernung betrachtet, als *isotrope*, d. h. in alle möglichen Richtungen des Raumes gleichstark strahlende

Erläuterung der Formel des Strahlungsstromes als Funktion der Leuchtkraft und des Abstandes



Punktlichtquelle gelten, so daß anschaulich die in einer Sekunde aus der Oberfläche des Sternes austretende gesamte Strahlungsenergie nach Zurücklegen der Strecke r durch die Oberfläche der konzentrisch zum Stern gedachten Raumkugel mit dem Radius r nach außen tritt. Durch einen Quadratzentimeter dieser Oberfläche, den man z. B. am Objektiv eines Fernrohres aufzeichnen könnte, tritt ein Strahlungsstrom S in das optische Instrument und wird meßbar: $S = \frac{L'}{4\pi r^2}\left[\mathrm{erg/cm^2\,s}\right]$. In dieser Formel ist das Gesetz der quadratischen Abnahme der Intensität der Strahlung enthalten. In einem unendlich großen Universum gibt es bei Gültigkeit des Weltpostulates auch unendlich viele Sterne, d. h., es sind hinreichend viele leuchtende Sonnen vorhanden, um die ganze Sternsphäre lückenlos zu besetzen. Folglich sollte die Sphäre mit der mittleren Leuchtdichte (Helligkeit geteilt durch Fläche) eines Fixsternes strahlen, so daß die Halbsphäre die Helligkeit eines Sternes m = — 39 hätte; sie kann nicht unendlich hell sein, weil die Sonne und alle anderen am Leuchten der Sphäre beteiligten Fixsterne die hinter ihnen stehenden Sterne verdecken.

Der Bedeckungsgrad q der Sphäre hängt ab von der Grenzentfernung, bis zu der unsere optischen Instrumente reichen. Ein Raum, in dem die uns von der Schule her bekannten Maßbeziehungen der euklidischen Geometrie gelten, ist unendlich. Er soll gleichförmig mit Sternen (mittlere Materiedichte $\varrho = 10^{-30}$ g/cm³) erfüllt sein und keine anderen ab-

sorbierenden Massen enthalten. Dann zeigt die Tabelle die Anzahl $\mathfrak{N}(r)$ der Sterne, die bis zur Grenzentfernung r den Bedeckungsgrad q hervorrufen. Erst in 340 Billionen Mpc Abstand würden die sichtbaren Sterne 1% der Himmelssphäre bedecken und bis in 0,15 Trillionen Mpc schließlich 99% der Sphäre erfüllen. Im Abstandsbereich zwischen 10^{18} und 10^{19} Mpc würde sich in dem angenommenen Weltall die Sphäre von fast völliger Klarheit der Aussicht in fernere Räume bis zur praktischen Undurchsichtigkeit schließen.

Durch die in einem kugelförmigen Raumausschnitt mit dem Radius r befindlichen Sterne $\mathfrak{N}(r)$ erzielter Bedeckungsgrad q in einem gleichförmig mit Sternen erfüllten Universum

Bedeckungsgrad q %	Grenzentfernung r in Mpc	Sternanzahl $\mathfrak{N}(r)$
0,1	$3{,}4 \cdot 10^{15}$	$1{,}93 \cdot 10^{52}$
1	$3{,}4 \cdot 10^{16}$	$1{,}93 \cdot 10^{55}$
10	$3{,}4 \cdot 10^{18}$	$1{,}93 \cdot 10^{58}$
50	$2{,}2 \cdot 10^{19}$	$5{,}19 \cdot 10^{60}$
90	$7{,}5 \cdot 10^{19}$	$2{,}06 \cdot 10^{62}$
99	$1{,}5 \cdot 10^{17}$	$1{,}65 \cdot 10^{63}$
99,9	$2{,}2 \cdot 10^{17}$	$5{,}19 \cdot 10^{63}$

Diese Überlegungen können nun in mehrfacher Hinsicht modifiziert bzw. verfeinert werden. Man kann die Voraussetzung eines unendlichen euklidischen Raumes fallenlassen und andersartige, endliche oder unendliche Räume betrachten oder eine im extragalaktischen Raume wirksame Absorption der Strahlung berücksichtigen, die uns noch schneller als die leuchtenden Sterne auf ein bescheideneres Stück des Universums zurückdrängt, oder auch noch eine andere Verteilung der Materie in Erwägung ziehen. Aus der Tatsache, daß unsere Instrumente stets nur einen endlichen Bereich des Weltraumes zu erfassen gestatten, sollte nicht geschlossen werden, daß der dahinter liegende Teil des Weltalls prinzipiell unerreichbar und daher unerkennbar bleiben müßte.

Gravitationsgesetz. Bei der Anwendung des Newtonschen Gravitationsgesetzes auf ein unendlich ausgedehntes Weltall mit endlicher materieller Dichte stößt man, wie bereits Newton selbst klar erkannt hatte, auf ein den Beobachtungs-

tatsachen widersprechendes Ergebnis, daß nämlich Kräfte bzw. Beschleunigungen auftreten sollten, die über jedes Maß hinauswachsen. Zur Vermeidung dieses Widerspruches wurde auf mannigfache Weise versucht, das Newtonsche Gravitationsgesetz entsprechend zu modifizieren, und zwar in der Art, daß innerhalb des Planetensystems keine merkbare Abweichung von der Beobachtung eintritt. Meist versuchte man ein Korrektionsglied so einzuführen, daß die bis dahin unerklärte Drehung des Merkurperihels gerade gedeutet werden konnte. NEWTON selbst setzte z. B. $K = -G\frac{Mm}{r^{2+\lambda}}$. Doch konnten alle diese Ansätze nicht voll befriedigen. Der Schwierigkeiten konnte man Herr werden, d. h., man konnte verhindern, daß die Gravitationskräfte ins Unendliche anwachsen, wenn man die Materie der Welt in einem *hierarchischen Aufbau* unterbrachte. Darunter versteht man die Gruppierung der Weltkörper in Systeme mit stufenweise abnehmender Dichte (Abb.). Die Abbildung zeigt in schematischer zweidimensionaler Darstellung einen solchen Aufbau. Bei geeigneter Wahl des Abstandsverhältnisses bzw. der Systemfolge können, wie CHARLIER gezeigt hat, auch die in einer unendlichen Welt auftretenden Kräfte der Gravitation endlich bleiben. Auch bei dieser Verteilung der Materie ist das Weltpostulat erfüllt, die mittlere Dichte nimmt aber mit wachsendem Volumen stetig ab und verschwindet für das unendliche Weltall. Übersetzen wir das schematische Bild in die Wirklichkeit, so könnte man etwa sagen: Systeme erster Ordnung sind die Planeten mit ihren Satelliten. Unser Planetensystem ist dann ein System zweiter Ordnung. Die Galaxis wäre somit ein System dritter Ordnung, die Nebelhaufen schließlich Systeme vierter Ordnung. Ob und wie es möglicherweise weitergeht, wissen wir heute noch nicht.

Zweidimensionale schematische Darstellung eines Punktfeldes in hierarchischem Aufbau

Rotverschiebung und Kosmologie. In die kosmologischen Betrachtungen wird stets mit besonderem Nachdruck das Phänomen der Rotverschiebung der Spektrallinien bzw. die Expansion der Nebelwelt hineingestellt, ja, es nimmt in den meisten kosmologischen Theorien eine zentrale Stellung ein. Vielleicht ist diese Auffassung richtig; beweisen kann man sie nicht bzw. noch nicht. In der Tat stellt die allgemeine Nebelflucht eine der hervorstechendsten Eigenschaften des heute bekannten Teiles des Weltalls zur Schau. Doch vielleicht kommt dieser Erscheinung in dem nächstgrößeren Bereich des Universums eine ebenso bescheidene Bedeutung zu wie etwa der wesentlich gleichsinnig gerichteten Umlaufbewegung der Körper des Planetensystems

Der Vorgang der Expansion wird wesentlich durch die Hubble-Konstante H beschrieben. Ihr zahlenmäßiger Wert ist heute noch wenig gesichert, dürfte aber in den Grenzen von 57 bis 134 liegen. Die Größe selbst hat die Dimension einer reziproken Zeit und gibt, ins Anschauliche übertragen, den in der Vergangenheit liegenden Zeitpunkt an, zu dem die jetzt weit in den Raum verstreuten Nebel nahezu an einem Ort vereinigt waren. Rechnet man nämlich für jeden Nebel, dessen Abstand und Fluchtgeschwindigkeit bekannt sind, rückwärts aus, wann er sich in unmittelbarer Nähe unseres Milchstraßensystems befunden haben würde, so erhält man eine für alle Nebel gleiche Zeit, die allerdings wegen der gegenwärtigen Unsicherheit der Hubble-Konstanten zwischen 6 und $16 \cdot 10^9$ Jahren liegt. Nehmen wir die runde Zahl 10^{10}, so könnte man sagen, daß — wenn die Deutung der Rotverschiebung als Doppler-Effekt richtig ist — damals die gesamte Materie der heute und in naher Zukunft beobachtbaren Spiralnebel an einem relativ kleinen Raum dichtgedrängt zusammen war und danach offensichtlich zu expandieren begann.

Da die Sternsysteme in diesem konzentrierten Ausgangsstadium zweifellos ihre heutige Gestalt noch nicht haben konnten, sich also erst in der Folgezeit entwickelt haben, bezeichnet man, nicht gerade sehr glücklich, diesen Zeitpunkt als *die Entstehung der um uns sichtbaren Nebelwelt,*

wobei man leider meist das Wort *Nebel* fortläßt, so wie man heute statt Atomkernenergie leider meist auch nur Atomenergie sagt. Die Zeit von 10^{10} Jahren heißt dann natürlich das *Alter der Welt*, wobei auch hier unter Welt selbstverständlich nur der durch Beobachtungen bekannte Teil des Weltalls gemeint sein kann.

Viel wichtiger ist eine ganz andere Tatsache, nämlich die, daß es keine irdische Gesteinsart, keinen Meteoriten, keinen Himmelskörper und kein Sternsystem gibt, bei dem eine nach jeweils verschiedenen Methoden durchgeführte Altersbestimmung einen Wert ergeben hätte, der größer als das *Alter der Welt* wäre. Dieser Befund scheint darauf hinzudeuten, daß der Augenblick des Expansionsbeginns in unserer Welt wirklich der Anfang der Entwicklung ist, die wir heute allenthalben sehen. Möglicherweise hat sich bei dieser Gelegenheit auch schon ein kleiner Teil des Wasserstoffs in Helium und schwerere Elemente verwandelt. Die Fragen, was vor dieser Entstehung der Welt war, in welchem Zustand sich die Materie befand u. a., sind heute noch nicht zu beantworten; sie können erst dann sinnvoll gestellt werden, wenn der Expansionsvorgang der Nebelwelt genauso weitgehend erforscht sein wird wie heute etwa der Lichtwechsel von δ Cephei-Veränderlichen.

Unter Beibehaltung des euklidischen Raumes ist, wie bereits gesagt, ein statisches Universum nur bei einer bestimmten Dichteverteilung im hierarchischen Aufbau der Weltkörpersysteme möglich. Statisch nennt man ein Weltmodell, in dem durch regellose Verteilung der Geschwindigkeiten keine wesentliche Änderung des momentanen Zustandes eintreten kann. Die expandierende Nebelwelt stellt aber ein nichtstatisches System dar, und es wurde theoretisch gezeigt, daß sogar ein solches Universum mit dem euklidischen Raume verträglich ist.

In der allgemeinen *Relativitätstheorie*, die wesentlich eine Gravitationstheorie ist, ergeben sich neue Möglichkeiten zur Lösung der Frage nach der Struktur des Raumes. Hier wird der Raum durch Hinzunahme der modifizierten Zeit *vierdimensional* und als außerdem noch gekrümmt betrachtet

und entzieht sich somit unserer unmittelbaren Anschauung. Wir überblicken gerade noch eine zweidimensionale gekrümmte Welt, z. B. die Oberfläche einer Kugel. So wie die Kugeloberfläche nirgends eine Grenze besitzt und doch endlich ist, muß der sphärisch gekrümmte Raum ein *endliches* Volumen besitzen, das jedoch *unbegrenzt* ist. Jedes dieser Weltmodelle bringt Aussagen, die weit über das hinausgehen, was wir von dem heute beobachtbaren Teil des Weltalls wissen. Jede neue Erkenntnis aber wird die Zahl der möglichen Modelle verringern und schließlich zu einem Verständnis der Vorgänge im überblickbaren Universum führen.

KOSMOGONIE

Wer sich einen Überblick über die geometrische Anordnung, den mechanischen Aufbau und die räumlichen Bewegungsverhältnisse der ungezählten und verschiedenartigen Weltkörper erarbeitet hat und einen großen Teil der physikalischen Zustände kennt, die den Ablauf der mannigfachen Vorgänge auslösen oder begleiten, der wird sich auch die Frage nach dem Woher und Wohin stellen: wie hat sich die Welt bis zum heutigen Zustand entwickelt, und wie mag die Entwicklung weitergehen? Ja, er wird vielleicht für den Teil der Welt, der optisch erreichbar ist, und für die darin befindlichen Objekte nach der Entstehung, dem Anfang, fragen. Nur in diesem Sinne darf man vom *Anfang der Welt*, der beobachtbaren Welt der Gestirne, sprechen.

Arbeitsmethoden

Die Kosmogonie, in deren Aufgabenbereich die Beantwortung der gestellten Fragen fällt, ist ähnlich wie die eben behandelte Kosmologie ein Grenzgebiet unseres Wissens und daher stark durchmischt mit spekulativen Elementen. Nur dort, wo ausreichende Beobachtungstatsachen die Grundlage

unseres Wissens sind, kann die Spekulation entbehrt werden. Aus diesem Grunde gibt es viele Forscher, die den kosmogonischen Theorien gegenüber sehr zurückhaltend sind, weil sie die Schwierigkeiten überblicken. Den Außenstehenden hingegen belastet solche Einsicht nicht, er wundert sich höchstens über den raschen Wechsel und die große Auswahl kosmogonischer Theorien.

Die Grundlagen jeder Kosmogonie sind eine möglichst umfassende Kenntnis des gegenwärtigen Zustandes der Weltkörper und das Wissen um die Naturgesetze, die bei der Entstehung und Entwicklung mitwirken. Sodann gibt es zwei verschiedene Wege, sich ein Bild von dem Werdegang der betrachteten Objekte zu machen. Je nach den Umständen werden der eine oder der andere oder alle beide gegangen.

Beim *theoretischen Weg* wird man von einem Urzustand ausgehen, der im Weltall zu beobachten ist und sich als Ausgangsstadium eignet, wie z. B. ein rotierender gasförmiger Nebel, und dann wird man versuchen, unter Anwendung aller in Betracht kommenden physikalischen Gesetze weitere Zustände daraus abzuleiten. Die so gewonnenen Modellkörper werden mit den beobachteten Weltkörpern verglichen. So kann man von der Entstehung bis zum gegenwärtigen Stadium gelangen oder auch, ausgehend vom augenblicklichen Zustand, die Weiterentwicklung verfolgen.

Beim *empirischen Weg* wird man eine größere Zahl von Einzelobjekten verschiedenen Entwicklungsstadiums miteinander vergleichen und darangehen, sie als zeitlich aufeinanderfolgende Durchgangsstadien eines einzelnen Weltkörpers zu deuten. Dabei wird man freilich auch versuchen, die Übergänge zwischen den einzelnen Entwicklungsstadien auf Grund der bekannten physikalischen Gesetze zu verstehen oder sie gar zu berechnen.

Gedanken zur Entstehung der Sternsysteme

Beginnen wir bei unserer kosmogonischen Betrachtung mit dem sichtbaren Teil der Welt, in dem wir eine allgemeine Expansion der Sternsysteme beobachten. Es dürfte kaum

zweifelhaft sein, daß diese divergente Strömung mit dem Ursprung und der Entwicklung dieses Teils des Universums eng zusammenhängt. Deshalb wollen wir den Beginn der Expansion als den Zeitpunkt $t = 0$ festsetzen und von hier aus das Alter der verschiedenartigen Weltkörper berechnen.

Urgaskugel. Im Augenblick des Beginns mag die ganze Masse der Sternsysteme auf relativ engem Raume bei unvorstellbar hoher Dichte und Temperatur vereinigt gewesen sein. Um sich größenordnungsmäßig eine Vorstellung davon machen zu können, seien ein paar Zahlen genannt. Bei einer Anfangsdichte $\varrho_0 = 10^{10}$ g/cm³ wäre der Anfangsradius dieser Urgaskugel $R_0 = 10^{15}$ cm, also von den Dimensionen eines Planetensystems. Bei einer Temperatur $T_0 = 10^{12}$ °K würde diese unvorstellbare Gaskugel von einem Druck von etwa $p_0 = 10^{24}$ Atmosphären auseinandergesprengt, womit die Expansion beginnen würde. Daß in diesem Zustand, der offenbar nur kurze Zeit verwirklicht war, keine Moleküle oder Atome Bestand haben konnten, ist verständlich. Die Urgaskugel wird also nur aus Elementarteilchen bestehen: Neutronen, Protonen, Elektronen und Quanten sehr hoher Energie, um die wesentlichsten zu nennen. Im Verlaufe der ersten Phasen dieser *Urexplosion*, wie man diesen Vorgang gelegentlich genannt hat, könnten sich dann vielleicht außer Wasserstoff auch schwerere Atomkerne bilden. Eine umfassende Untersuchung der dabei sich abspielenden, äußerst komplizierten Prozesse liegt noch nicht vor. Auf jeden Fall bietet es keine Schwierigkeit, sich vorzustellen, daß die gasförmige Materie hierbei in Massen aufgeteilt wird, aus denen sich später die Spiralnebel entwickeln können. In diesem Zeitpunkt, der im allgemeinen Millionen Jahre nach dem Augenblick $t = 0$ liegen dürfte, setzt nun die Eigenentwicklung der Sternsysteme ein. In einem solchen Moment begann also auch die Geschichte unserer Milchstraße.

Unser Sternsystem. Die Gasmassen, die heute unser Sternsystem bilden, waren als Folge des explosiven Abschleuderungsvorganges in heftiger turbulenter Bewegung mit gleich-

zeitiger Drehbewegung um eine im Raume zufällig orientierte Achse. Die spätere Galaxis besaß also in der Gasphase eine dreifache Bewegung: die translatorische *Expansionsbewegung* (kinetische Energie), die im Drehimpuls zum Ausdruck kommende *Umdrehungsbewegung* (Rotationsenergie) und die *Wirbelbewegung* der einzelnen Turbulenzelemente (Reibungsenergie). Die Turbulenzenergie wird teils in Wärme, teils in Rotationsenergie des Systems umgewandelt, oder es bleibt ein kleiner Rest als Rotationsenergie der Sterngaskugeln erhalten, die sich in der Zwischenzeit zu formen begonnen haben. Von der gleichzeitig einsetzenden *Abplattung des Systems* werden wesentlich die Massen erfaßt, in denen sich eine lebhafte Wechselwirkung durch Stöße abspielt, also das interstellare Gas. Es wandert in radialer Richtung auseinander und wickelt sich wegen der nach außen hin abnehmenden Umlaufgeschwindigkeit *spiralförmig* auf. Da der Sternbildungsprozeß dabei nicht unterbrochen wird und heute noch andauert, finden wir die Sterne in dem scheibenförmigen Außenraum vornehmlich in spiraliger Anordnung. Die noch vor Einsetzen der starken Abplattung entstandenen Sterne bilden das wenig abgeplattete Zentrum, in dem kaum noch Reste des ursprünglichen Gases vorhanden sind. Je nach den Anfangsbedingungen findet man Nebel mit zahlreichen engen Spiralen oder solche mit nur zwei diametral entgegengesetzt verlaufenden Armen. Bei den *elliptischen Nebeln* hat man fast keine interstellare Materie gefunden. Möglicherweise handelt es sich hier um jene Nebel, die bei ihrer Entstehung einen nur sehr geringen Drehimpuls mitbekamen, sich folglich kaum abplatten konnten und in dem engen ursprünglichen Volumen infolge größerer Dichte alles Gas in Sterne umwandelten. Nach einer anderen Auffassung handelt es sich um Sternsysteme, die kurz nach ihrer Entstehung einen Zusammenstoß hatten, wobei sie ihre interstellare Materie verloren, bevor sie den Prozeß der Abplattung beginnen konnten.

Wenn auch diese kurze Darstellung in groben Zügen und mehr qualitativ die verschiedenartigen Erscheinungsformen der extragalaktischen Nebel und ihre mutmaßliche Entste-

hung und Entwicklung beschreibt, so bleiben doch noch zahlreiche Fragen unbeantwortet. Soviel aber scheint heute gewiß, daß die frühere Deutung der Klassifikation der Spiralnebel als Entwicklungsweg überholt ist.

Entstehung und Entwicklung der Sterne

Auf die Entstehung der Sterne als *Gaskugeln* aus Teilen der sich bildenden, noch gasförmigen Spiralnebel wurde oben bereits hingewiesen. Daß diese Entstehung der Sterne nicht nur zu Beginn des Daseins der Sternsysteme erfolgen kann, geht aus Überlegungen hervor, die man bereits vor 20 Jahren anstellte. Damals war bekannt geworden, daß die von den Sternen ausgestrahlte Energie aus der Umwandlung des Wasserstoffs in Helium stammt, daß also, wenn man die Sterne als reine Wasserstoffkugeln ihren Lebensweg beginnen läßt, 0,7% ihrer Masse, in Energie umgesetzt, zur Ausstrahlung zur Verfügung steht. Setzt man voraus, daß die Sterne seit ihrer Entstehung ungefähr in der heutigen Intensität gestrahlt haben, so ergibt sich für unsere Sonne eine maximale Lebensdauer von 10^{11} Jahren; für den etwa 10mal massigeren, dafür aber über 20000mal stärker strahlenden Rigel (β Orionis) erhält man dagegen eine maximale *Lebensdauer* von nur $45 \cdot 10^6$ Jahren. Rigel, ein typischer weißer Riesenstern, kann demnach noch nicht so alt sein wie unsere Sonne bzw. das Milchstraßensystem. Man nimmt heute an, daß die Weißen Riesen der Spektralklassen O und B ein Alter zwischen 10^5 und 10^8 Jahren haben. Die Entstehung von Sternen ist demnach ein Prozeß, der sich auch in unseren Tagen noch abspielt; das bedeutet allerdings nicht, daß man den Vorgang selbst im Fernrohr beobachten kann. Wir kurzlebigen Menschen sind nun einmal gegenüber den Vorgängen im Kosmos Eintagsfliegen, für die kosmische Entwicklungsprozesse unmittelbar nicht beobachtbar sind. Vielleicht fördern die photographische Dokumentation des Sternhimmels und eine Verfeinerung der Beobachtungsmethoden in den nächsten Jahrzehnten einige Fälle tatsächlicher Sternentwicklung zutage.

Entstehung von Sternen. Auf die Tatsache, daß sich Fixsterne in jüngster kosmischer Vergangenheit gebildet haben, scheinen unabhängig von den eben durchgeführten energetischen Überlegungen gewisse Sterngruppen hinzudeuten, die sogenannten *Assoziationen.* Ihre Mitglieder sind sehr heiße und frühe Riesensterne, die sich anscheinend vom Ort ihrer Entstehung auseinanderbewegen. Auf solche Assoziationen hat im Zusammenhang mit der Sternentstehung vor etwa 10 Jahren AMBARZUMJAN hingewiesen. Doch ist es bis heute immer noch nicht gelungen, völlige Klarheit über den Mechanismus der Sternentstehung zu gewinnen. Die Schwierigkeit liegt darin, daß die interstellare Materie, die zum größten Teil aus Wasserstoff besteht, im Schwerefeld des Milchstraßensystems wegen ihrer geringen Dichte im allgemeinen keine Möglichkeit hat, sich zu Sternen zusammenzuziehen. Dies ist erst von einer bestimmten kritischen Dichte ab möglich. Ist diese in einem bestimmten Gebiet erreicht oder überschritten, dann beginnt die interstellare Materie dieses Bereiches infolge ihrer *Eigengravitation* zusammenzustürzen, und es wird in der sich bildenden Sternkugel von vielleicht 100 oder mehr Sonnenmassen so viel (potentielle) Energie frei, daß die *kontrahierende Gaskugel* zu leuchten beginnt oder unter Umständen sogar vom aufkommenden Strahlungsdruck gesprengt wird und sich in mehrere Sterne teilt, die auseinanderfliegen. Das Zusammendrängen der interstellaren Materie bis zur kritischen Dichte kann etwa durch die Anwesenheit eines heißen Riesensternes hervorgerufen werden, der in eine kosmische Wolke eindringt, in seiner Umgebung infolge der intensiven Ultraviolett-Strahlung ein H II-Gebiet schafft, das seinerseits durch Erwärmung expandiert und das anliegende H I-Gebiet bis zur kritischen Dichte komprimiert. Alle diese Stufen des Prozesses der Sternentstehung müßten nun in den verdichteten Gebieten der interstellaren Materie zu finden sein (vgl. Tafel XIII). In dem offensichtlich turbulent bewegten Nebeneinander von interstellarem Wasserstoff, der durch die heißen Sterne der näheren Umgebung zum Leuchten angeregt wird, und den bereits stark konzentrierten und

deshalb durch die Lichtabsorption dunkel erscheinenden Massen, die oft von bizarrer Form sind, zum Teil aber bereits zu rundlichen schwarzen *Globulen* zusammengedrängt erscheinen, erblickt man Gebiete lebhafter Sternneubildung. Hierbei scheint es aber ebenso möglich zu sein, daß sich auch Zwergsterne bilden, die durch eine relativ geringe Anfangsmasse charakterisiert sind.
Der Sternbildungsprozeß müßte im Laufe der Zeit die interstellare Materie restlos aufzehren und dann zum Erliegen kommen. Man hat allerdings den Eindruck, daß eine Quelle vorhanden ist, die ständig den Bestand an interstellarer Materie ergänzt. Es sind die Sterne selbst, die von ihrer Masse an den Weltraum abgeben, am intensivsten die Riesensterne, am wenigsten die Zwergsterne. Man hat abgeschätzt, daß auf diese Weise im Jahre rund 5 Sonnenmassen an den interstellaren Raum geliefert werden. Wenn Gleichgewicht herrscht, was anzunehmen ist, können innerhalb unseres Milchstraßensystems im Jahre ebensoviele Sterne neu gebildet werden.

Entwicklung der Sterne. Bei der Kontraktion des interstellaren Wasserstoffs zu einem Stern (*Protostern*) wird, wie schon HELMHOLTZ gezeigt hat, die potentielle Energie zur Erhöhung der Temperatur und zur Lieferung der Strahlungsenergie verwendet. Doch reicht diese Quelle je nach der Leuchtkraft des Sternes bzw. nach seinem Radius und seiner Oberflächentemperatur nur 10^5 bis 10^7 Jahre. Während dieser *Kompressionsphase* des Sternes erreicht die Materie im Zentrum eine so hohe Dichte und Temperatur, daß *Kernprozesse* beginnen, die eine Umwandlung von Wasserstoff in Helium zur Folge haben. Mit Beginn der Kernprozesse erreicht der Stern einen Gleichgewichtszustand, in dem er lange Zeit (10^9 bis 10^{10} Jahre) verweilen kann. Dieser Gleichgewichtszustand besteht darin, daß die Masse des Sternes die Zentraltemperatur und Dichte und damit die Ergiebigkeit der erzeugten Kernenergiemenge bestimmt. Um diese an den Raum abstrahlen zu können, muß der Stern seine *Oberflächentemperatur* entsprechend einstellen. Mit der Ober-

flächentemperatur hängt in bekannter Weise die *Leuchtkraft* zusammen, so daß wir hier den physikalischen Grund für die Masse-Leuchtkraft-Beziehung vor uns haben. Im Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm (vgl. Abb. S. 172) hat der Stern, von rechts kommend, die Hauptreihe erreicht. Auf Grund der Umwandlung von Wasserstoff in Helium — bei den Zwergsternen unterhalb der Sonne ist es die *Proton-Proton-Reaktion*, über die Sonne hinweg bis zu den heißen Riesen der *Kohlenstoffzyklus* — wird im Zentrum zuerst der Wasserstoff aufgebraucht, und es bildet sich ein zunächst isothermer *Heliumkern*, den man vielfach als ausgebrannten Kern bezeichnet. Die Kernreaktionen spielen sich dann nur noch in einer relativ dünnen Schicht an seiner Oberfläche ab, die sich allmählich immer weiter nach außen verlagert. Sobald der Heliumkern wesentlich über 10% der Gesamtmasse des Sternes ausmacht, beginnt er, sich zusammenzuziehen, wobei die Kontraktion weitere Energie liefert, den Stern also gewissermaßen von innen her aufheizt. Dies hat zur Folge, daß der Stern sich ausdehnt. Dies ist wiederum nichts anderes als eine Maßnahme, das durch die zusätzliche Energiequelle gestörte Gleichgewicht wieder herzustellen. Die vergrößerte Oberfläche vermag einen größeren Energiebetrag abzustrahlen. Der Stern ist heller geworden. Diese Zustandsänderung bedingt eine Verlagerung seines Bildpunktes im Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm, er wandert nach oben und später sogar nach rechts fort in den Bereich der *roten Riesensterne*. Infolge des weiteren Ansteigens der zentralen Temperatur auf über 10^8 °K beginnt im Heliumkern der Aufbau schwererer Kerne aus Helium, z. B. Beryllium, Kohlenstoff, Sauerstoff, Neon u. a. Dieser sukzessive Aufbauprozeß wird nach seinem Entdecker als *Salpeterprozeß* bezeichnet. Durch die dabei frei werdende Energie steigt die Temperatur noch weiter, der Stern wird größer; gleichzeitig wird sein Heliumvorrat verbraucht. Es setzen danach weitere *Auf-* und *Abbauprozesse* ein, die nicht im einzelnen aufgeführt werden sollen. Es ist so gut wie sicher, daß auf diesem Wege im Zentralgebiet der Sterne praktisch alle Arten der Atomkerne entstehen können.

Alle diese Prozesse hängen wesentlich ab von den bei den einzelnen Sternen verschiedenen inneren Verhältnissen, die wiederum bedingt sind von der ursprünglichen Masse, die der Stern auf seinen Lebensweg mitbekam. Im Kerngebiet werden infolge der andauernden Kontraktion Dichtewerte zwischen 10^4 und 10^7 g/cm³ erreicht, die wir bei den Weißen Zwergen kennengelernt haben.
Der weitere Entwicklungsweg ist noch wenig bekannt. Er führt wahrscheinlich durch das Gebiet *instabiler Sterne*, die wir als *Veränderliche* kennen, und von dort möglicherweise zu einer Katastrophe. Infolge energieverzehrender Abbauprozesse verliert der Stern in seinem Kerngebiet die Fähigkeit, seine Massen gegen die Gravitationskräfte aufrechtzuerhalten. Der Kern stürzt praktisch im freien Fall zusammen, die frei werdende potentielle Energie führt zu einer *Explosion*, die wahrscheinlich dem Aufleuchten im *Nova-Stadium* entspricht. Ein erheblicher Teil der Masse wird in den interstellaren Raum geschleudert, der Rest rückt in das Gebiet der Weißen Zwerge.
Während der erste Teil der Sternentwicklung für bestimmte Massen streng durchgerechnet ist, was naturgemäß nur mit Hilfe elektronischer Rechenmaschinen möglich ist, ist das letzte Stück der Entwicklung nach Verlassen des Gebietes der Roten Riesen nur qualitativ bekannt. Die Arbeiten hierüber sind gegenwärtig in vollem Gange, so daß uns die nächste Zeit weitere Aufklärung dieser sehr interessanten Fragen bringen wird.
In dieses Bild der allgemeinen Entwicklung im Universum hat sich als letztes Kapitel noch die Entstehung und Entwicklung des Planetensystems einzuordnen, also jener Teil, der in früherer Zeit ungerechtfertigterweise das Schwergewicht der kosmogonischen Theorien ausmachte.

Kosmogonie des Planetensystems

Auf dem Gebiet der Kosmogonie des Planetensystems ist unser gesichertes Wissen deshalb besonders dürftig, weil uns die bei den Nebeln und Sternen zur Verfügung stehen-

den Vergleichsmöglichkeiten zwischen Objekten verschiedener Entwicklungsstufen hier fehlen. Wir kennen nur ein Planetensystem, nämlich das unsere.

Folgende drei älteren Hypothesen über die Entstehung des Planetensystems sollen erwähnt werden, obwohl sie in wesentlichen Punkten als unzutreffend erkannt und heute überholt sind. 1. Die *Meteoritenhypothese von* KANT, der das Sonnensystem aus einer Wolke regellos durcheinanderwirbelnder Teilchen durch die allmählich Ordnung schaffende Wirkung der Gravitation entstehen läßt. 2. Die *Nebularhypothese von* LAPLACE, dessen Urnebel von Anfang an eine gleichsinnig rotierende Gasmasse war, von der sich durch Kontraktion und nachfolgende Zunahme der Zentrifugalbeschleunigung am Äquator Ringe gasförmiger Materie ablösen, die sich später zu Planeten zusammenballen. Abarten dieser beiden Hypothesen aus der neueren Zeit sind die von SCHMIDT und FESSENKOW. 3. Die *Stellar- oder Katastrophenhypothese von* JEANS (Abarten von JEFFREYS, CHAMBERLIN, MOULTON u. a.) vermag im Gegensatz zu den beiden ersten Theorien zu erklären, weshalb das Umlaufmoment der nur Promille betragenden Planetenmassen ein Vielfaches des Drehmomentes der Sonne ist, da die Entstehung der Planetenkörper auf die Begegnung der Sonne mit einem Stern zurückgeführt wird.

Neuere Untersuchungen über die Entstehung des Planetensystems führte v. WEIZSÄCKER (*Turbulenztheorie*) aus. Seine Theorie ist kürzlich von KUIPER weiterentwickelt und ausgebaut worden. Anknüpfend an die bei der Entstehung der Sterne vorhandene turbulente Masse wird ähnlich wie beim Sternsystem die Herausbildung eines zentralen Kerns (Sonne) und einer scheibenförmigen Masse (Planetenfeld) erwartet, zwischen denen infolge der turbulenten Reibung eine Übertragung des Hauptmomentes des ganzen Systems auf die Planeten mit einer gleichzeitigen Expansion dieses Bereiches stattfindet. Die Entstehung der *Satellitensysteme* um die Planeten denkt man sich in ähnlicher Weise in verkleinertem Maßstabe.

KURZER GESCHICHTLICHER ÜBERBLICK

Der Ursprung der Astronomie liegt im Dunkel der Vorgeschichte der Menschheit. Die Gestirne wurden in der vorwissenschaftlichen Epoche vielfach als Künder des Willens göttlicher Wesen oder als Gottheiten selbst betrachtet. So standen die Notwendigkeit der Beobachtung auffälliger Konstellationen oder eindrucksvoller Ereignisse am Sternhimmel (wie Konjunktionen, Finsternisse) und das Bedürfnis nach einer geordneten Zeitrechnung zur Festlegung staatlicher Feste und anderer periodisch wiederkehrender Ereignisse am Anfang einer systematischen Beschäftigung mit den Gestirnen.

Die ältesten astronomischen Urkunden reichen bei den *Mayas*, *Chinesen*, *Babyloniern* und *Ägyptern* etwa bis ins 3. Jahrtausend v. u. Z. zurück. Aber erst in den letzten sechs Jahrhunderten vor Beginn unserer Zeitrechnung werden Ansichten vom Weltall entwickelt, die sich auf naturwissenschaftliche Verarbeitung eingehender Beobachtungen gründen. Die heutige Vorstellung vom Aufbau des Universums ist das Ergebnis der damals einsetzenden Entwicklung der Astronomie, die von Babylon über die kleinasiatischen Siedlungen der Griechen nach Hellas vordrang.

Die erste wissenschaftliche Auffassung knüpft an die augenscheinliche Realität einer näherungsweise scheibenförmigen Erde an, die von der Sternsphäre umgeben ist. Dieses Bild findet sich heute noch in dem horizontalen Koordinatensystem der sphärischen Astronomie. PYTHAGORAS lehrt um 540 v. u. Z. die Kugelgestalt der im Raum frei schwebenden Erde, um die sich die Fixsternsphäre mit Sonne, Mond und Planeten täglich von Ost nach West bewegt. Die genannten Gestirne besitzen nach ihm eine von West nach Ost gerichtete Eigenbewegung, die bei allen ungleichförmig, bei den Planeten aber außerdem verschiedentlich in ostwestlicher Richtung verläuft. Die Kenntnis dieser zweifachen Ungleichförmigkeit der Planetenbewegung führt bei PHILOLAUS um 420 v. u. Z. zu einem Weltsystem, in dem sich alle Gestirne, auch die als Planet betrachtete Erde, um das im Mittelpunkt

der Welt befindliche Zentralfeuer bewegen. HERAKLID verbessert um 350 v. u. Z. dieses Weltsystem durch Annahme der Erdrotation, beseitigt das Zentralfeuer und kommt damit dem heliozentrischen Weltsystem sehr nahe.
Eine grundsätzlich andere Darstellungsart der Gestirnbewegungen entwickelt EUDOXUS um 380 v. u. Z. Seine Theorie der homozentrischen Sphären ist eine mathematische Beschreibung der scheinbaren Bewegung der Wandelgestirne, die aus verschieden schnellen, in gegeneinander geneigten Ebenen verlaufenden Einzelbewegungen zusammengesetzt werden. Die Sonne hat z. B. in erster Näherung eine in der Ebene des Himmelsäquators rückläufige Tages- und eine in der Ekliptik liegende rechtläufige Jahresperiode. Die verwickelten Bewegungen der Planeten, zu denen damals auch Sonne und Mond gerechnet wurden, lassen sich so näherungsweise in gleichförmige Umdrehungen von Sphären auflösen. Die 27 Sphären des EUDOXUS sind also nur ein mathematisches Hilfsmittel. Die spätere Vermehrung der Sphären auf 56 brachte keinen wesentlichen Gewinn in der Darstellung der Planetenbewegungen.
Im dritten Jahrhundert gelingen die ersten Größenbestimmungen im Weltall. ERATOSTHENES mißt den Radius der Erde, ARISTARCH das Entfernungs- und Größenverhältnis von Sonne, Erde und Mond. Auf die Erkenntnis der überragenden Größe der Sonne gründet er das erste heliozentrische Planetensystem, das von den meisten abgelehnt oder aus religiöser Unduldsamkeit bekämpft wird. Es hat sich auch fachlich nicht durchgesetzt, weil es für die Praxis keinen Vorteil brachte.
HIPPARCH vertritt um 150 v. u. Z. wieder ein geozentrisches Weltsystem, wobei er zur Darstellung der Bewegung von Sonne, Mond und der ersten Ungleichheit des Planetenlaufs den exzentrischen Kreis verwendet und zur Beschreibung der zweiten Ungleichheit den Epizykel vorschlägt. PTOLEMÄUS begründet um 130 v. u. Z. im *Almagest* die Epizykeltheorie und wendet sie auf die Planeten an. Das Verfahren, die Planetenbewegungen in Bewegungen auf Kreisen mit verschiedenen Radien und Umlauffrequenzen aufzulösen, ist

der harmonischen Analyse verwandt. Mangels einer besseren Darstellung dienen die von PTOLEMÄUS gegebenen Unterlagen bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts als Grundlage für die Berechnung der Gestirnstellung.
Das Erbe der antiken Astronomie wird durch die *Araber* vom 8. Jahrhundert ab erhalten und durch eigene Arbeiten fortgesetzt. Zahlreiche Namen und Bezeichnungen, die heute noch gebräuchlich sind, erinnern an den Beitrag der Araber zur Astronomie. Die Erkenntnis der Notwendigkeit einer Kalenderreform führt zur Forderung der Erhöhung der Beobachtungsgenauigkeit. Der erste Versuch einer Entscheidung zwischen der heliozentrischen und geozentrischen Planetentheorie von PEURBACH und REGIOMONTAN ist wegen des frühen Todes beider Forscher nicht über die ersten Ansätze hinausgekommen. KOPERNIKUS entwickelt die zweite heliozentrische Planetentheorie (1543), fußt dabei auf den antiken Vorstellungen der gleichförmigen Kreisbewegung, des Exzenters und Epizykels, und kann folglich die Bewegungen der Planeten nicht genauer darstellen als PTOLEMÄUS. Seine Theorie wurde daher vielfach auch von Astronomen abgelehnt. BRAHE erreicht die genauesten Beobachtungen der vorteleskopischen Astronomie und stellt das letzte wissenschaftlich begründete geozentrische Planetensystem auf: Sonne und Mond bewegen sich danach um die Erde, die Planeten um die Sonne. Auf Grund der Beobachtungen BRAHES beseitigt KEPLER 1609 die Unrichtigkeiten des kopernikanischen Planetensystems durch die Formulierung der Gesetze der Planetenbewegung. GALILEI führt 1610 das Fernrohr in die Astronomie ein und erweitert damit wesentlich die Kenntnisse über die Weltkörper. NEWTON begründet 1687 die Prinzipien der Mechanik und ermöglicht durch das Gravitationsgesetz ein tiefgreifendes Verständnis der Planetenbewegung. Die Kometen werden als Himmelskörper erkannt.
Im 18. Jahrhundert wird die Himmelsmechanik ausgebaut. HALLEY erkennt die Eigenbewegungen der Fixsterne. Die ersten Vorstellungen über den Aufbau des Sternsystems werden entwickelt. BRADLEY findet 1728 die Aberration des Sternlichtes als eindrucksvollen Beweis für die Umlaufbewe-

gung der Erde um die Sonne. HERSCHEL führt Spiegelteleskope größerer Dimensionen in die Astronomie ein, entdeckt 1781 den Uranus und unternimmt die erste Ausmessung des Milchstraßensystems.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts werden die kosmische Natur der Meteore erkannt und das System der Planetoiden entdeckt. Die ersten Fixsternparallaxen werden fast gleichzeitig und unabhängig von BESSEL, STRUVE und HENDERSON 1838 gemessen. 1846 gelingt die Berechnung der Bahn des Neptun. FRAUNHOFER, KIRCHHOFF und BUNSEN liefern die Grundlagen für das Aufkommen der Astrophysik. Die Himmelsphotographie greift auf zahlreichen Gebieten der Astronomie ein.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wird unser Sternsystem als Spiralnebel erkannt, seine Dimensionen und seine Masse werden bestimmt. Die interstellare Materie und die Welt der Spiralnebel werden entdeckt. Die großen Fortschritte der Atom- und Quantenphysik ermöglichen ein rasches Aufblühen der Astrophysik: Erforschung der Sternatmosphären und des Inneren der Fixsterne. Die Energiequellen der Sternstrahlung werden als hauptsächlich subatomar erkannt. Durch die Relativitätstheorie und die Erforschung des Systems der Spiralnebel wird die Kosmologie neu belebt. Seit etwa 1945 erschließt die Radioastronomie neue Informationsmöglichkeiten.

REGISTER

Aberration, tägliche, jährliche 46
Abplattung 64, 102
absolute Helligkeit 141
Absorption 148
Absorptionslinien 162
Albedo 65
Alter der Welt 231
Anzahl der Sterne 135
Apex 157
Aphel 34
Äquatorsysteme 24, 25, 26
aschgraues Licht des Mondes 49
Assoziationen 154, 237
Astrologie 70
astronomisches Jahr 43
astronomische Zeitzählung 42
Atmosphäre 78
Augenprüfer 14
Ausstrahlungspunkt 121
Azimut 24

Bahnelemente 52
Bahnstörungen 112
Balkenspirale 204
Bär (Bärin) 15
Bedeckungsveränderliche 173, 177, 187
Besselsches Jahr 43
Bewegung der Sonne 157
Bewegung der Sterne 155
Bewegung, rechtläufige 26
Bewegung, rückläufige 70, 72
Bewegungssternhaufen 154, 196
bolometrisch 162
Brahe 73
Breite, galaktische 140
Breite, geographische 25

Chemische Zusammensetzung 162
Chromosphäre 182
Chronologische Zeitzählung 42
Coma 109

Dämmerung 8, 9
Datumsgrenze 39
Datumssprung 38, 39
Datumswechsel 39
Deklination 25
Deklinationskreis 37
Dichte 162, 177
Doppelsterne 153, 176, 193, 194
Dopplereffekt 213, 214
Dreieck, nautisches 25
Dunkelwolken 144, 199

Ebbe 62
effektive Temperatur 162, 169, 170
Eigenbewegung 155
Einfang 112
Einflußsphäre 112
Ekliptik 33
ekliptikale Breite 33
Ekliptikalsystem 33
Elementenhäufigkeit 165
elliptische Nebel 204
Emissionslinien 162
Emissionsnebel 198
Energieeffekt 222
Energieerzeugung 162
Energiequellen 184
Ephemeridenzeit 43
Erdlicht 49
Erdschatten 8
erster Vertikal 45
Eruptionen 180, 182
Exnova 191
Extinktion 168
extragalaktische Gasnebel 221
extragalakt. Sternsystem 192
Exzentrizität 73

Fackeln 180
Fahrstrahl 73
Farbenhelligkeitsdiagramm 171
Farbindex 168, 169
Feldsterne 153
Filament 183
Finsternis 56
Finsterniskreis 33

Fixsterne 12, 133, 155
Flächengeschwindigkeit 74
Flächensatz 73
Fleckengruppe 181
Fluchtgeschwindigkeit 214
Flut 62
Frühlingspunkt 26
Fundamental-Koordinaten-System 26

galaktische Haufen 154
galaktische Konzentration 138
Gegenschattenkegel 55
Gegenschein 128
Gegenschweif 115
geographische Breite 25
gerade Aufsteigung 26
Gezeiten 62
Giganten 163
Glashauswirkung 84
Globule 200, 238
Gräben 66
Granulation 180
Gravitationsgesetz 226, 228
Gregorianischer Kalender 42
Größenklassen 133

Halbachse 73
Halbschattenkegel 55
Häufigkeit der Elemente 165
Haupthimmelsrichtungen 23
Hauptlicht 128
Helligkeit 122, 133
Helligkeit, absolute 141, 144
Helligkeit, scheinbare 141
Hertzsprung-Russel-Diagramm 162, 171
Himmelsäquator 17
Himmelsmeridian 17
Himmelswagen 13
Hipparch 11
Höhenkreis 24
Höhenwinkel 24
Horizont 23
Horizontalebene 23
Horizontalsystem 23
Hubblekonstante 214, 216

Intergalaktische Materie 221
interplanetare Materie 75
Interstellare Absorption 144
Interstellare Materie 131, 197

Jahreszeiten 32
jährliche Aberration 46
Jährliche Parallaxe 46
Jahr, tropisches 33
Jakobstab 21
Julianischer Kalender 41
Jupiter 95
Jupiterfamilie 115
Jupitermonde 98

Kalender 40
Kalender, Gregorianischer 42
Kalender, Julianischer 41
Kanäle (Mars) 90
Kepler 34, 72, 74, 91, 103, 110
Keplersche Gesetze 72, 73, 74
Kern 109
Kernenergie 185
Kernschattenkegel 55
Kleine Planeten 91
Knoten, aufsteigender 52
Knotenlänge 52
Kohlenstoffzyklus 185, 239
Koma 109, 115
Kometen 109, 115
Kometensysteme 109
Kontinuum 162
Kontraktionsenergie 184
Koordinatensysteme, astronomische 23
Kopernikus 27, 41, 72, 213
Korona 180, 183
kosmische Strahlung 200
Kosmogonie 232
Kosmologie 225, 230
Kratergruben 68
Kugelsternhaufen 154, 195, 196
Kulmination 17
Kulmination, obere 17, 30
Kulminationszeit 26
Kulmination, untere 17, 34

Länge, ekliptikale 33

Leuchtkraft 144, 161
Leuchtkraftklassen 162, 163
Leuchtstreifen 128
Libration 51
Lichtbrücke 128
Lichtjahr 130
Lichtzeit 130
Lokale Gruppe 205

Magellansche Wolken 205
Magnetfeld 162, 181, 200
Mare 66
Mars 86
Marskanäle 89
Marsmonde 90
Masse 162, 175, 209
Mehrfachsterne 153
Meridian 31
Meridiandurchgang 26, 31
metallische Phase 77
Meteore 122
Meteorite 123
Meteorströme 120
MEZ, mitteleuropäische Zeit 37
Milchstraßensystem 133, 153
Milchstraßenwolken 154
Minute 29
Mittagskreis 17
mitteleuropäische Zeit: MEZ 37
mittlerer Tag 35
mittlere Sonne 35
mittlere Zeit 37
Mögel-Dellinger-Effekt 182
Monat, anomalistischer, drakonitischer, siderischer, synodischer, tropischer 51
Mond 49
Mondfinsternis 56
Mondkrater 67
Mondrillen 69
Mondringgebirge 67

Nadir 23
nautisches Dreieck 25
Nebulium 198
Neptun 107
Neptunmonde 107
Neue Sterne 163, 202, 219
Neumond 53
Newtons Gravitationsgesetz 71
Nordstern 14
Novae 163, 188
Nova-Stadium 240
Nutation 47

offene Sternhaufen 154
Ortszeit 37
O-Sterne 163

parallaktischer Winkel 25
Parallaxe 46, 142
Parallaxe, tägliche, jährliche 46
Parsek 142
Penumbra 180
Perigäum 50, 51
Perihel 34
Phasengesetz 65
photographische Helligkeit 133
photometrische Methode 173
photometrische Parallaxe 151
Photosphäre 180
photovisuelle Helligkeit 134
Planet 13
planetarische Nebel 163, 192
Planetensystem 70
Planetoiden 132
Plasma 117, 122
Platonisches Jahr 47
Plejaden 22, 27, 195
Pluto 108
Polarkappe 87
Polarstern 14, 27
Polhöhe 25
Polverschiebung 48
Pore 180
Postnova 191
Pränova 191
Präzession 46, 47
Proton-Proton-Prozeß 185, 239
Protosterne 190 238
Protuberanzen 180, 182, 183
psychophysisches Gesetz 11, 134
Ptolemäus 12

Radialgeschwindigkeit 156
Radiant 121
Radioastronomie 182
Radius 162
Radiusvektor 73
Randverdunklung 179
Raumbewegung 155
rechtläufige Bewegung 26
Reflexionsnebel 198
Refraktion 46
Reiterlein 14
Rektaszension 26, 27
Riesenmeteoriten 123
Riesensterne 190, 239
Rillen 66
Ringgebirge 66, 68
Rochesche Grenze 90
Rotation der Milchstraße 158
Rotationsachse 48
Rotationsdauer 162
Rote Überriesen 173
Rote Zwerge 173
Rotverschiebung 211, 221, 230

Salpeter-Prozeß 239
Sarosperiode, Saroszyklus 47, 60
Saturn 99
Saturnmonde 100
Saturnringe 101
scheinbare Helligkeit 141
scheinbare Zenitdistanz 46
Schiefe der Ekliptik 33
Schweif 109
Schwerebeschleunigung 63, 162
Seitenwinkel 24
Sekunde 29
Selected Areas 136
siderischer Monat 51
Siebengestirn 22, 154
Sirius 27
Solarkonstante 170
Sonne 179
Sonne, mittlere 35
Sonnenfinsternisse 58
Sonnenflecken 179
Sonnentag 34
Sonnenzeit 32
Sonne, wahre 34
Spektraltypen 163
Spektrum 79, 162
sphärische Astronomie 22
sphärische Trigonometrie 12
Spiralnebel 204
Stand 31
Staub 76
Sternanzahlen 135
Sternbilder 13, 27, 28
Sternhaufen 22, 192, 195
Sternhelligkeit 135
Sternleere 146
Sternschnuppe 120
Sternsystem 234
Sterntag 30
Sternzeit 26, 27, 29
Sternzeituhr 31
Störungen 72
Strahlensysteme 66, 69
Strahlungsdruck 117
Stunde 29
Stundenkreis 25
Stundenwinkel 25, 27
Supernova 163, 188, 191
synodischer Monat 50
Syzygien 55
Szintillation 13

Tag 29
Tagesstrom 122
tägliche Aberration 46
tägliche Parallaxe 46
Tag, mittlerer 35
teleskopisches Meteor 123
Temperatur 169
Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm 171
Terminator 64
Tierkreis 33
Tierkreisbilder, Tierkreiszeichen 47
trigonometrische Parallaxe 149
Trojaner 94
tropischer Monat 51
tropisches Jahr 33, 43
Troposphäre 9

Übergiganten 163
Überriesen 173
Uhrstand 31
Umbra 180
Ungleichheit, erste und zweite 72
Uranus 105
Uranusmonde 106
Urexplosion 234
Urgaskugel 234

Variable 187
Venus 80
Veränderliche, veränderliche Sterne 187, 188, 190, 240
verbotene Linien 197
Verdünnungseffekt 221, 222
Verdünnungsfaktor 167
Vertikal 23, 25
Vertikal, erster 45
Verwerfungen 66
Vollmond 53

wahre Anomalie 52
wahre Sonne 34
wahre Zenitdistanz 46
Wallebene 67
Weiße Riesen 173
Weiße Zwerge 173
Weltachse 16
Weltgesetze 226
Weltmodelle 225
Weltpostulat 225
Weltzeit, westeuropäische Zeit 38
Widderpunkt 26
Wolf-Rayet-Sterne 163

Zeitbestimmung 31
Zeiteinheit 29
Zeitgleichung 35
Zeit, mittlere 37
Zeitrechnung 26
Zeitsterne 17
Zeitzählung, astronomische, chronologische 42
Zeitzonen 38
Zenit 23, 24
Zenitdistanz, scheinbare, wahre 46
Zenitpunkt 9
Zirkumpolarsterne 15
Zodiakallicht 127
Zonenzeit 37, 38
Zustandsgrößen 162
Zweikörperproblem 71
Zwerge 163

QUELLENNACHWEIS FÜR DIE FOTOTAFELN

(Die eingeklammerten römischen Zahlen geben die Tafelnummern an)

Akademie-Verlag, Berlin: Aus „Hoffmeister, Photographische Aufnahmen von Kometen, 1956": Komet 1939 (V) — Komet 1943 (V)

Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin, Leipzig: Aus „Waldmeier, Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung, 1955": Granulation der Sonnenoberfläche (IX)

Verlag Joh. Ambrosius Barth, Leipzig: Aus „Newcomb-Engelmann, Populäre Astronomie, 1948": Sternspektren (VIII) — Kugelsternhaufen (XII) — Andromedanebel (XIV)

Bibliographisches Institut, Leipzig, Archiv: Tycho Brahe (XVI) — Kepler (XVI) — Newton (XVI) — Herschel (XVI)

Karl-Sudhoff-Institut, Leipzig: Kopernikus (XVI) — Galilei (XVI)

North Holland Publishing Company, Amsterdam: Aus „Gas Dynamics of Cosmic Clouds, 1955": Balkenspirale (XV)

Sky Publishing Corporation, Cambridge (Mass. USA): Aus „Sky and Telescope": Saturn (IV) — Marsübersichtskarte (V) — Sonnenfleck mit Penumbra (IX) — Magellansche Wolke (XV)

Sternwarte Sonneberg: Mond (II)

The Physical Society Reports on Progress in Physics Vol. 1950: Venus (IV) — Mars (IV)

Zentralbild, Berlin: Mond (I) — Meteorkrater (VI) — Meteorit (VI) — Nordamerikanebel (VII) — Eulennebel (XI) — Trifidnebel (XIII) — Spiralnebel von der Kante gesehen (XV)

Zeichnerin der Strichzeichnungen ist Doris Eltner, Weimar

UNSERE NEUE TASCHENBUCHREIHE

Band 1 *Gropp*
Der dialektische Materialismus

Band 2 *Neumann*
Schatzsucher unserer Zeit

Band 3 *Möller*
Deutsch von heute
(Eine kleine Stilkunde)

Band 4 *Mielke*
Unternehmen Luna
(Kleiner Reiseführer zum Mond)

Band 5
Unsere Ostseeküste
Herausgeber: *Kleinfeldt*

Band 6/7 *Hoppe*
Planeten, Sterne, Nebel
(Kleine Astronomie für jedermann)
Doppelband

Diese Reihe wird fortgesetzt!

Preis jedes Bandes 2,– DM

VEB VERLAG ENZYKLOPÄDIE LEIPZIG