

LEHRBUCH DER
PHYSIK

OBERSCHULE TEIL IA

Lehrbuch der Physik

für die Oberschule

TEIL I A

9. Schuljahr

Mit 167 Abbildungen



VOLK UND WISSEN VERLAG

BERLIN / LEIPZIG

Herausgegeben von
Rudolf Girke, Dr. Paul Henckel, Dr. Ellen Lax
und Dr. Paul Schauff, Berlin

Der Abschnitt „Fixsternsystem“
ist von Prof. Dr. Hans Kienle verfaßt

Berichtigter Nachdruck der vierten Auflage (1949)

Best.-Nr. 6012 3.30 DM gbd. (2.65 DM bei Lieferung über die Schule) · 161.—210.Tausend
Lizenz-Nr. 334 · 1000/51—I—71/51
Satz: (M 109) B. G. Teubner, Leipzig
Druck: (M 108) Dr. Karl Meyer G.m.b.H., Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Akustik

§ 1. Schallerzeugung	5	§ 6. Schwingende Luftsäulen	19
§ 2. Schallausbreitung und Schallempfang	9	§ 7. Resonanz	21
§ 3. Die Tonleiter	13	§ 8. Das menschliche Stimmorgan und die Stimme	23
§ 4. Schwingungen gespannter Saiten ..	16	§ 9. Das Hörorgan und das Hören	24
§ 5. Schwingende Stäbe und Platten ..	18	§ 10. Geschichtliche Entwicklung	26

Optik

§ 11. Ausbreitung des Lichtes im Raume	27	§ 18. Geräte zur Bilderzeugung	59
§ 12. Reflexion des Lichtes	30	§ 19. Das Auge und die optischen Instrumente	61
§ 13. Reflexion des Lichtes an gekrümmten Spiegeln	35	§ 20. Die Emission des Lichtes	71
§ 14. Die Brechung des Lichtes	40	§ 21. Die Absorption des Lichtes	73
§ 15. Linsen und Linsensbilder	47	§ 22. Körperfarben	74
§ 16. Die Zerlegung des Lichtes	52	§ 23. Lichterzeugung	75
§ 17. Die Linsenfehler und ihre Berichtigung	55	§ 24. Photometrie	77
		§ 25. Lichttechnische Daten	80
		§ 26. Geschichtliche Entwicklung	81

Astronomie

A. Scheinbare Bewegungen der Sonne und der anderen Fixsterne ..	83	§ 39. Die Planetenbahnen in heliozentrischer Darstellung	117
§ 27. Orientierung in der Horizontebene ..	83	§ 40. Die Keplerschen Gesetze	120
§ 28. Orientierung am Sternhimmel ..	85	§ 41. Die physische Beschaffenheit der Sonne	122
§ 29. Die tägliche Bewegung der Sonne am ruhenden Himmel	88	§ 42. Die physische Beschaffenheit der Planeten, Kometen, Meteoriten und des Mondes	124
§ 30. Der rotierende Fixsternhimmel ..	92		
§ 31. Der jährliche Umlauf der Sonne am rotierenden Himmel	98		
B. Unser Sonnensystem	102	C. Das Fixsternsystem	129
§ 32. Geozentrisches und heliozentrisches Weltssystem	102	§ 43. Helligkeit und Zahl der Sterne ..	129
§ 33. Gestalt und Größe der Erde	103	§ 44. Farbe, Spektrum, Temperatur ..	131
§ 34. Die Achsendrehung der Erde	105	§ 45. Parallaxe und Entfernung	134
§ 35. Die jährliche Bewegung der Erde ..	107	§ 46. Helligkeit und Entfernung	135
§ 36. Die scheinbare Mondbewegung ..	109	§ 47. Bewegungen der Sterne	138
§ 37. Der Mond im Kopernikanischen System	112	§ 48. Die Bewegung des Sonnensystems ..	139
§ 38. Die Planetenbahnen in geozentrischer Darstellung	115	§ 49. Die Milchstraße und das System der Fixsterne	141
		§ 50. Das Universum	144
Sachverzeichnis	148		

AKUSTIK

Alles, was wir mit dem Ohr wahrnehmen können, nennen wir Schall. Für die verschiedenen Arten der Schallwahrnehmungen gibt es mannigfache Bezeichnungen. Man unterscheidet z.B. Töne, Klänge, Geräusche. Wir können gefühlsmäßig unmittelbar beurteilen, ob ein Ton höher oder tiefer oder ob er lauter oder leiser ist als ein anderer. Ist eine Geige nach einem Klavier gestimmt, dann empfinden wir entsprechende Töne als gleich hoch. Sie klingen aber, auch wenn sie gleich laut sind, ganz verschieden. Man sagt: die Töne einer Geige haben eine andere Klangfarbe als die des Klaviers. Unsere Erfahrungen lehren uns also, daß wir Töne nach ihrer Höhe, ihrer Stärke und ihrer Klangfarbe unterscheiden können.

§ 1. Schallerzeugung

1. Schallquellen. Wenn wir irgendeinen Schall wahrnehmen, dann können wir stets einen Körper nachweisen, von dem der Schall ausgeht. Man nennt ihn die Schallquelle. Solche Schallquellen sind z.B. ein in einen Schraubstock gespannter Stahlstreifen (Abb. 1), der zur Seite gebogen und dann losgelassen wird, eine Stimmgabel, eine Saite, irgendein Musikinstrument usw. Eine nähere Untersuchung zeigt, daß in jeder Schallquelle lebhaftere Bewegung herrscht. Sie ist unserem Auge häufig verborgen, wir können sie aber durch besondere Hilfsmittel nachweisen, z. B. bei einer angeschlagenen Stimmgabel (Abb. 2) oder einer Glocke durch ein kleines Pendel (Glaskügelchen an einem Faden), bei einer angestrichenen Saite durch aufgesetzte Papierreiter, bei einer tönenden Platte durch aufgestreuten Sand usw. Bei dem Versuch mit dem Stahlstreifen können wir



Abb. 1
Schwingender
Stahlstreifen

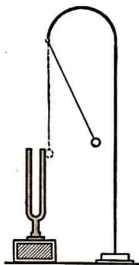


Abb. 2. Nachweis
der Stimmgabel-
schwingungen

eine regelmäßige Hin- und Herbewegung feststellen. Eine solche Bewegung nennt man auch eine Schwingung. Wenn das freie Ende des Streifens lang ist, können wir die Schwingungen sehen, wir hören aber noch nichts. Verkürzen wir den Streifen, so folgen die Schwingungen schneller aufeinander. Von einer gewissen Verkürzung an hören wir einen Ton. Dieser wird um so höher, je kürzer das freie Ende des Stahlstreifens ist, je schneller es also hin- und herschwingt.

2. Tonhöhe. Wir können derartige Schwingungen oder periodische Bewegungen noch auf andere Weise hervorrufen. So hört man beim Sägen ein



Abb. 3
Zahnradsirene

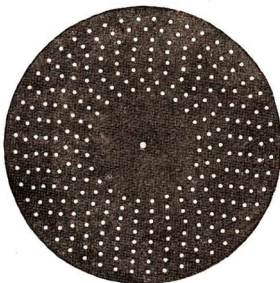


Abb. 4. Lochsirene

kreischendes Geräusch, das offenbar von dem regelmäßig wiederholten Eindringen der Sägezähne in das Holz herrührt. Ähnlich, aber anschaulicher, ist der Vorgang bei folgendem Versuch: Dreht man ein Zahnrad und hält gegen die Zähne ein federndes Stück Pappe, so vernimmt man einen Ton, der höher wird, wenn man schneller dreht. Bei gleicher

Drehgeschwindigkeit wächst die Tonhöhe mit der Anzahl der Zähne des Rades. Eine Vorrichtung zur Erzeugung von Tönen nach diesem Verfahren nennt man eine **Zahnradsirene** (Abb. 3).

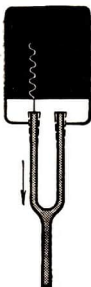


Abb. 5
Aufzeichnung der
Schwingungen
einer Stimmgabel
(Schema)

Bei Sirenen, wie sie in Fabriken verwendet werden, wird der Ton durch regelmäßige Luftstöße hervorgerufen. Eine Lochsirene (Abb. 4) ist eine kreisförmige Scheibe mit mehreren konzentrischen Lochreihen. Die Löcher jeder Reihe haben gleiche Abstände voneinander. Bläst man einen Luftstrom gegen eine Lochreihe der sich drehenden Scheibe, so werden durch Freigabe des Luftstromes in gleichen Zeitabständen regelmäßig aufeinanderfolgende Luftstöße erzeugt, und wir hören einen Ton.

Dreht sich die Scheibe schneller, dann wird der Ton höher. Der heulende Ton beim Anlaufen einer solchen Sirene wird also durch Änderung der Drehgeschwindigkeit erzeugt. Verstärkt man den Luftstrom, ohne die Geschwindigkeit der Drehung zu ändern, so bleibt die Tonhöhe erhalten, aber der Ton wird lauter.

Je zahlreicher die Schwingungen in einer bestimmten Zeit sind, desto höher ist der Ton.

Zur Kennzeichnung der Tonhöhe gibt man an, wieviel Schwingungen die Schallquelle in 1 Sekunde ausführt, und nennt diese Zahl die **Schwingungszahl** oder **Frequenz**¹⁾ des betreffenden Tones. Man gibt sie in „Hertz“²⁾ (Hz) an. 1 Hz = 1 Schwingung je Sekunde. Wir können

1) frequentia (lat.) = Häufigkeit 2) Heinrich Hertz, 1857—1894

im günstigsten Falle zwei Töne noch unterscheiden, wenn ihre Schwingungszahlen um 0,1% verschieden sind. Töne genau bestimmter Höhe erzeugt man am bequemsten mit Stimmgabeln. Eine Gabel, die den Ton a' gibt (§ 5), hat eine Frequenz von 440 Hz.

3. Aufzeichnung von Schwingungen, Tonstärke und Klangfarbe.

An der einen Zinke einer Stimmgabel ist eine Schreibspitze befestigt. Wir schlagen die Gabel an und ziehen die Spitze möglichst gleichmäßig über eine beaufte oder mit Sporen von Bärlapp (*Lykodium*) bestäubte Glasplatte. Auf dieser zeichnen sich Wellenlinien auf (Abb. 5 u. 6). Aus wiederholten Versuchen erkennen wir: Der tonerzeugende Vorgang ist auch hier eine sich zeitlich wiederholende, d. h. periodische Bewegung. Der Ton behält unverändert seine Höhe, aber je leiser die Gabel klingt, desto geringer sind die Höhen der Wellenberge, die sog. Schwingungsweiten oder Amplituden.

Je größer die Schwingungsweite (Amplitude) ist, desto lauter ist der Ton.

Da die Frequenz der Gabel konstant geblieben ist, so braucht die Schreibspitze zum Aufzeichnen einer vollen Schwingung (von einem Wellenberg bis zum nächsten) stets dieselbe Zeit. Aus den mehr oder weniger zusammengedrängten Wellenlinien der Abb. 6 ersieht man, daß die Spitze nicht mit gleichbleibender Geschwindigkeit über die Platte gezogen wurde.

Wir können in ähnlicher Weise auch die Schwingungen einer Saite aufzeichnen. Zu diesem Zwecke löten wir an eine Messingsaite eine Schreibspitze, spannen die Saite auf einem Monochord¹⁾ (Abb. 7, vgl. S. 16) aus, bringen

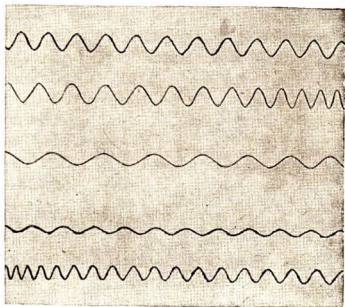


Abb. 6. Stimmgabelschwingungen mit verschiedenen Amplituden

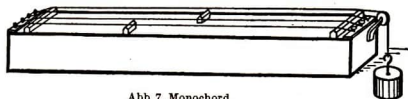


Abb. 7. Monochord

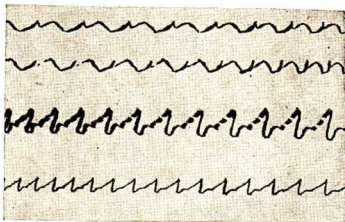


Abb. 8. Saitenschwingungen

1) *mónos* (griech.) = allein; *chordé* (griech.) = Darm, Saite.

sie durch Anstreichen oder Zupfen zum Tönen und ziehen gleichzeitig die vorbereitete Glasscheibe an der Spitze vorbei. Auf der Glasplatte ergeben sich wieder Wellenlinien. Diese sind aber nicht so einfach wie bei der Stimmgabel, sondern zeigen viele große und kleine Zacken (Abb. 8). Je nach der Art der Erregung der Saite ergeben sich verschiedene Formen. Gleichzeitig können wir hören, daß sich auch der Klang der Saite ändert, wenn man sie an verschiedenen

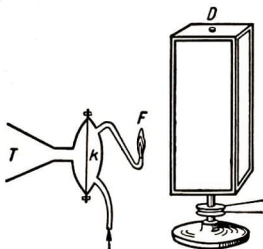


Abb. 9. Untersuchung von Luftschwingungen mit der Membrankapsel

Stellen anstreicht. Wir stellen also fest, daß die Klangfarbe mit der Form der Schwingungen zusammenhängt. Zwischen unseren Wahrnehmungen und den sie hervorruftenden meßbaren Größen besteht demnach folgender Zusammenhang:

Es entsprechen sich

Tonhöhe und Schwingungszahl (Frequenz),
Tonstärke und Schwingungsweite (Amplitude)
Klangfarbe und Schwingungsform.¹⁾

Will man Luftschwingungen sichtbar machen, so kann man dazu eine Vorrichtung nach Art der Abb. 9 benutzen. Sie besteht aus einer linsenförmigen Kapsel, die durch eine dünne Membran geteilt ist.

In den Raum *K* wird Leuchtgas eingeleitet. Es brennt zunächst mit ruhiger Flamme *F*. Hält man vor den Trichter *T* eine schwingende Stimmgabel, so beginnt die Flamme zu zucken. Betrachtet man sie in einem Drehspiegel *D*,



Abb. 10.
Flammenbild des Vokals *e*

so wird ihr Bild zu einem Zackenband auseinandergezogen. Bei gleichbleibender Drehgeschwindigkeit sind die Zacken um so zahlreicher, je höher der Ton ist. Singen wir verschiedene Vokale mit gleichbleibender Tonhöhe in den Trichter hinein, so ergeben sich, je nach der Klangfarbe des betreffenden

Vokals, wechselnde Flammenbilder regelmäßiger Form mit großen und kleinen Zacken (Abb. 10). Man sieht also auch hier den Zusammenhang von Klangfarbe und Schwingungsform. Klatschen wir in die Hände, so gerät die Flamme auch in Zuckungen, aber das Bild im Drehspiegel zeigt keinerlei zeitliche Wiederholungen (keine Periodizität). Daher kann man diesem Vor-

1) Man muß möglichst genau unterscheiden, ob man von den Wahrnehmungen spricht oder von den physikalisch meßbaren Größen, da für alle Menschen einwandfrei feststellbar nur die Ergebnisse der Messungen sind, während über die Wahrnehmungen unter Umständen Meinungsverschiedenheit bestehen kann.

gang keine bestimmte Frequenz zuschreiben. In der Wahrnehmung äußert sich dies in einer unbestimmten Tonhöhe. In derartigen Fällen spricht man von einem Geräusch.

Auf einer Grammophonplatte erkennt man mit einer Lupe feine Wellenzüge (Abb. 11); diese bilden eine zusammenhängende Spirale. Beim Abspielen wird eine Stahlnadel in diesen Kurven entlanggeführt und hin- und herbewegt. Durch die Nadel wird eine Membran in entsprechende Schwingungen versetzt; diese übertragen sich durch die Luft auf unser Ohr und werden von uns als Töne wahrgenommen. Bei der Aufnahme von Musik werden umgekehrt die Luftschwingungen auf eine Membran und eine Nadel übertragen. Diese gräbt die Schwingungen in eine sich drehende Platte ein.

Der Gedanke der Konstruktion einer solchen „Sprechmaschine“ stammt von Edison. Er verwendete bei seinem „Phonographen“ 1880 zur Aufnahme Walzen aus gehärtetem Wachs, in die durch eine Nadel Furchen verschiedener Tiefe eingegraben wurden. Die heute beim Grammophon gewählte Ausführung, bei der die Nadelspur seitliche Ausbuchtungen zeigt, stammt von Berliner (1887). Sie hat sich als vorteilhafter erwiesen.



Abb. 11. Bild einer Grammophon-nadelspur

Die Erfindung Edisons erregte seinerzeit großes Aufsehen. Als der Phonograph zum ersten Male in der Pariser Akademie vorgeführt wurde, erhob ein Mitglied Einspruch und glaubte an eine Irreführung durch den Trick eines Taschenspielers. So unglaublich erschien die Wiedergabe der menschlichen Sprache auf rein mechanischem Wege.

§ 2. Schallausbreitung und Schallempfang

1. Schallausbreitung. Der Schall macht sich von der Schallquelle aus nach allen Seiten hin bemerkbar. Mit wachsender Entfernung empfinden wir besonders im Freien den Schall immer schwächer. Wir beobachten auch, daß er durch Vorhänge, Doppeltüren, gepolsterte Wände u. dgl. merklich gedämpft wird. Zurufe über Wasser verstehen wir besser als über Land, und wenn wir das Ohr auf den Erdboden legen, können wir mitunter Geräusche, z. B. den Hufschlag eines Pferdes, aus großer Entfernung wahrnehmen.

2. Das Ohr. Zunächst denken wir daran, daß zum Hören ein gesundes Ohr gehört, und sehen uns den Bau des Ohres etwas näher an (Abb. 12). Von außen ist nur die Ohrmuschel zu erkennen. Von ihr aus führt der äußere Gehörgang *a* bis zum Trommelfell *b*. Dieses ist ein kreisförmiges Häutchen, das am Rande festgewachsen ist und den Gehörgang vollkommen abschließt. Hinter dem Trommelfell liegen das mittlere Ohr oder die Paukenhöhle

und das innere Ohr. Von der Paukenhöhle führt ein Gang, die Eustachische Röhre *h*, in die Rachenhöhle. Sonst bestehen nach außen hin keine Ver-

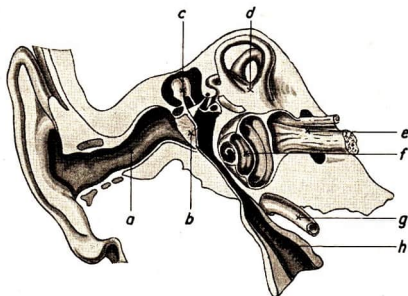


Abb.12. Das menschliche Ohr

a äußerer Gehörgang, *b* Trommelfell, *c* Gehörknöchelchen, *d* Vorhof mit Bogengängen, *e* Hörnerv, *f* Schnecke, *g* Halsschlagader, *h* Eustachische Röhre

bindungen. Mittelohr und inneres Ohr liegen geschützt im festesten Teil der Schädelkapsel, dem sog. Felsenbein. Das mittlere Ohr ist mit Luft gefüllt, das innere Ohrenthält in allen seinen Teilen eine Flüssigkeit, das sog. Gehörwasser. Erfahrungen zeigen: Ein Verlust der Ohrmuschel bedingt nur eine geringfügige Minderung der Hörfähigkeit. Eine Verletzung des Trommelfells bei Unfällen oder Entzündungen des Mittelohrs schädigt das Gehör

erheblich, schaltet es aber keineswegs ganz aus. Erst eine Zerstörung des inneren Ohres hat vollständige Taubheit zur Folge. Das innere Ohr ist also als das eigentliche Hörorgan anzusehen (vgl. § 9).

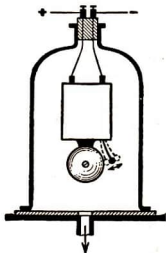


Abb.13
Glocke im luftleeren Raum

3. Das Medium. Wir untersuchen, welche Vorgänge sich in der Außenwelt abspielen, wenn wir einen Schall wahrnehmen. Normalerweise befindet sich zwischen der Schallquelle und dem Trommelfell Luft. Erregen wir eine elektrische Klingel unter dem Rezipienten¹⁾ einer Luftpumpe und verdünnen die Luft, so tönt die Glocke immer schwächer und schließlich kann man den Klang kaum hören, während die Glocke genau so lebhaft wie am Anfang angeschlagen wird (Abb. 13). Das Geräusch einer Schiffsschraube kann durch einen Taucher unter Wasser auf weite Entfernungen gehört werden, sogar deutlicher als über Wasser. Halten wir eine Taschenuhr über einem Tisch so weit entfernt, bis wir das Ticken nicht mehr vernehmen, und

legen sie dann auf den Tisch, so können wir sie wieder hören, ohne näher heranzugehen, wenn wir das Ohr auf die Tischplatte drücken. Wir können auch einen Holzstab hinter die Ohrmuschel auf die Schädelkapsel drücken und an das andere Ende des Stabes die Taschenuhr halten lassen. Dann vernehmen wir das Ticken deutlicher als ohne Stab.

1) recipere (lat.) = aufnehmen

Aus diesen Versuchen folgt:

Der Schall breitet sich nicht durch den leeren Raum aus. Zu seiner Übertragung müssen zwischen der Schallquelle und dem Ohr feste, flüssige oder gasförmige Körper vorhanden sein.

Den Stoff, der sich zwischen der Schallquelle und dem Ohr befindet, nennt man auch das Mittel oder das Medium¹⁾.

Die Schallquelle ist gewissermaßen der Sender, das Ohr der Empfänger und das Medium der Vermittler oder Träger des Schalles.

Was sich zwischen der Schallquelle und dem Ohr abspielt, können wir nicht unmittelbar sehen. Wir können aber hierzu einen aufklärenden Versuch machen.

Ein beiderseits offenes Glasrohr (Abb. 14) ist an dem Ende *B* verjüngt. Auf der anderen Seite *A* führt man etwas Rauch ein. Vor *B* stellen wir eine brennende Kerze auf. Erzeugt man vor *A* ein Geräusch etwa durch Aneinanderschlagen zweier Bücher, so zuckt die Flamme und wird vielleicht sogar ausgelöscht. Der Rauch bleibt aber an seiner Stelle liegen. Es wird also keine Luft von *A* nach *B* geschleudert, sondern nur ein Stoß durch die Luft fortgepflanzt. Die Übertragung einer Bewegung ohne Mitführung von Stoffteilchen können wir bei der Ausbreitung der Wellenringe auf einer Wasserfläche beobachten, wenn wir einen Stein hineinwerfen. An einem schwimmenden Stück Holz, das von der Bewegung getroffen wird, sieht man, daß nur der Bewegungszustand sich kreisförmig ausbreitet, während die Wasserteile an ihren Stellen nur auf und ab schwingen. Durch die Zinken einer schwingenden Stimmgabel wird die angrenzende Luft abwechselnd verdichtet und verdünnt. Die Druckunterschiede gleichen sich in der Luft aus, und die Erregung pflanzt sich nach allen Richtungen hin mit gleicher Geschwindigkeit fort. Denkt man sich die Schallquelle als Mittelpunkt konzentrischer Kugeln (Abb. 15), so werden alle Luftteilchen an der Oberfläche einer solchen Kugelfläche in einem bestimmten Augenblick in gleicher Weise beeinflusst. Wir sprechen in Analogie zu den kreisförmigen Wellenringen auf der Wasseroberfläche von kugelförmigen Schallwellen in der Luft, müssen aber beachten, daß diese beiden Erscheinungen durch ganz verschiedene Ursachen (Schwerkraft bzw. Zusammendrückbarkeit der Luft) zustande kommen. (Vgl. Teil IIB, § 1).



Abb. 14. Versuch nach Tyndall zur Ausbreitung des Schalles

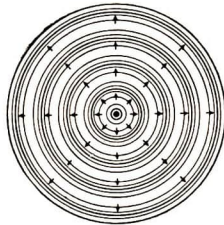


Abb. 15. Ausbreitung des Schalles durch Wellen

1) médium (lat.) = Mitte

Schallwellen können sich auch im Innern von Flüssigkeiten und festen Körpern ausbilden, da auch diese Körper druckelastisch sind. Unelastische Körper (lose Gewebe, Watte, lockere Asche) leiten den Schall schlecht und sind daher zur Schalldämpfung geeignet.

4. Schallgeschwindigkeit. Beobachtet man die Arbeit eines Holzfällers aus größerer Entfernung, so bemerkt man, daß man das Geräusch des Schlages erst hört, nachdem man das Aufschlagen der Axt gesehen hat. Ähnliche Erfahrungen macht man bei der Betrachtung eines Feuerwerks und beim Wahrnehmen von Blitz und Donner. Der Schall braucht eine merkliche Zeit zur Ausbreitung. Mit Hilfe einer Signalfefe und einer Stoppuhr können wir einen messenden Versuch im Freien ausführen und feststellen, daß der Schall in 1 s etwa $\frac{1}{3}$ km zurücklegt. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, daß die Schallgeschwindigkeit in Luft mit der Temperatur wächst. Genaue Messungen ergeben:

Die Schallgeschwindigkeit in Luft von 0° C beträgt 331 m/s, bei 15° C beträgt sie 340 m/s.

Vergehen zwischen der Wahrnehmung von Blitz und Donner 9 Sekunden, dann war der Blitz etwa 3 km von uns entfernt.

In Flüssigkeiten und festen Körpern ist die Schallgeschwindigkeit bedeutend größer als in der Luft.

Die Geschwindigkeit des Schalles beträgt in Wasser 1450 m/s, in Stahl und Glas etwa 5000 m/s.

5. Reflexion¹⁾ des Schalles. Man beobachtet im Freien, daß der Schall von Mauern und Waldrändern zurückgeworfen werden kann. Wir sprechen dann vom Echo. Ein Versuch zeigt uns, daß die Zurückwerfung der Schallstrahlen ebenso wie bei den Lichtstrahlen erfolgt. Wir legen auf den Boden eines Standzylinders etwas Watte und darauf eine Taschenuhr und bringen einen Spiegel in die in Abb. 16 angedeutete Lage. Wenn wir die Uhr in dem Spiegel erblicken, können wir auch das Ticken aus einer Entfernung vernehmen, in der wir es ohne den Spiegel nicht mehr hören würden. Bei einem Sprachrohr werden die seitlich verlaufenden Schallstrahlen umgelenkt und möglichst in eine bestimmte Richtung gezwungen.

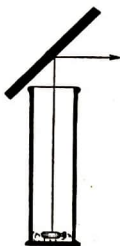


Abb. 16
Schallreflexion

In großen Zimmern und in Sälen beobachtet man gelegentlich den Nachhall. Er tritt auf, wenn zwischen dem gesprochenen Wort und dem von den Wänden zurückgeworfenen Schall so kurze Zeit vergeht, daß beide Eindrücke sich stören.

1) refléctere (lat.) = zurückwenden

§ 3. Die Tonleiter

Auf der Scheibe der schon einmal benutzten Lochsirene befinden sich 8 Lochreihen mit den Lochzahlen 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48 (Abb. 4). Wir versetzen die Scheibe mit Hilfe eines Motors in möglichst regelmäßige Umdrehungen und blasen die Reihen in der Folge von innen nach außen an. Dabei hören wir eine Dur-Tonleiter. Ändern wir die Geschwindigkeit und wiederholen den Versuch, so ergibt sich wieder eine Dur-Tonleiter in tieferer oder höherer Lage.

Die Beziehungen zweier Töne zueinander bezeichnet man in der Musik als ein Intervall¹⁾. Die Benennung des Intervalls richtet sich nach der Ordnungszahl der 8 Töne der Tonleiter. So heißt das Intervall zwischen dem 1. und 8. Ton der Tonleiter eine Oktave, das zwischen dem 1. und 5. eine Quinte, dem 1. und 4. eine Quarte, dem 1. und 3. eine große Terz. (Das Intervall zwischen dem 3. und 5. Ton der Dur-Tonleiter ist eine kleine Terz.)

Man gebraucht die für die Intervalle üblichen Bezeichnungen in etwas veränderter Bedeutung auch für die Töne der Tonleiter in ihrer Beziehung zum Grundton und nennt z. B. in einer C-Dur-Tonleiter g die Quinte von c, e die große Terz von c usw. Es ergibt sich also die folgende Zuordnung zwischen den Tönen einer Dur-Tonleiter und den Lochzahlen der Sirene:

Grundton	Sekunde	Gr. Terz	Quarte	Quinte	Gr. Sexte	Septime	Oktave
24	27	30	32	36	40	45	48

Den tiefsten Ton, den Grundton, erhalten wir beim Anblasen der Reihe mit 24 Löchern. Der höchste entspricht der Lochreihe mit 48 Löchern. Wir empfinden den höchsten Ton einer solchen Sirene bei jeder Drehgeschwindigkeit als die höhere Oktave des tiefsten. Das Verhältnis der Schwingungszahlen des tiefsten und höchsten Tones ist bei jeder Drehgeschwindigkeit 1:2. Dieses Verhältnis ist also kennzeichnend für zwei Töne, die sich um das Intervall einer Oktave unterscheiden.

Für das Verhältnis der Schwingungszahlen von Grundton und Quinte ergibt sich 24:36 oder 2:3. Für die anderen Intervalle gelten ähnliche einfache Zahlenverhältnisse.

Intervall	Verhältnis der Schwingungszahlen
Oktave	1:2
Quinte	2:3
Quarte	3:4
Große Terz	4:5
Kleine Terz	5:6

1) intervállum (lat.) = Zwischenraum

In der Musik beurteilen wir die Größe der Intervalle rein gefühlsmäßig, in der physikalischen Akustik können wir sie durch Messungen zahlenmäßig festlegen und verstehen unter dem Intervall zweier Töne das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen.

Nur wenn das Verhältnis der Schwingungszahlen durch kleine ganze Zahlen ausgedrückt werden kann, empfinden wir die entsprechende Tonfolge oder den Zusammenklang der Töne als angenehm. Wir sprechen dann von einer Konsonanz¹⁾. Wird das Intervall durch größere ganze Zahlen gekennzeichnet, so ist der Eindruck unbehaglich, und wir sprechen von einer Dissonanz²⁾.

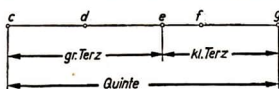


Abb. 17. Schema eines Dur-Dreiklangs

Am geläufigsten ist uns die C-Dur-Tonleiter. Für ihre Töne hat man die Bezeichnungen c d e f g a h c' gewählt. Die Töne c e g bilden den Dreiklang. Ihre Schwingungszahlen verhalten sich wie 4 : 5 : 6. Die entsprechenden Intervalle

sind: zwischen c und e eine große Terz, zwischen e und g eine kleine Terz und zwischen c und g eine Quinte (Abb. 17).

Wenn also die Schwingungszahl eines Tones des Dreiklanges festgelegt wird, so sind relativ hierzu die anderen und schließlich die Schwingungszahlen aller Töne der Tonleiter bestimmt. Macht z. B. der Grundton 128 Schwingungen in der Sekunde, dann sind die Schwingungszahlen der Töne des Dur-Dreiklangs 128 Hz, 160 Hz, 192 Hz:

$$128 : 160 : 192 = 4 : 5 : 6.$$

Man hat nun die Vereinbarung getroffen, daß in der Musik das eingestrichene a, der „Kammerton“, 440 Schwingungen in der Sekunde machen soll.

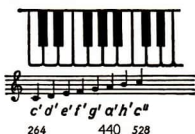


Abb. 18

Die Oktave mit dem Kammerton

Demnach ergeben sich für die absoluten Schwingungszahlen der Töne einer C-Dur-Tonleiter in der entsprechenden Höhenlage (in Hz)

c'	d'	e'	f'	g'	a'	h'	c''
264	297	330	352	396	440	495	528

Abb. 18 zeigt die C-Dur-Tonleiter in Notenschrift.

Prüft man die Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Tönen der Tonleiter (am einfachsten mit den Zahlenangaben der Lochsirene), so findet man:

Töne	c	d	e	f	g	a	h	c'
Intervalle	9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15	

Daraus erkennt man, daß die Tonleiter ungleichmäßig fortschreitet. Große Schritte liegen zwischen c, d, e sowie zwischen f, g, a, h (entsprechend den Werten 9/8 und 10/9), kleine liegen zwischen e und f sowie zwischen h und c'

1) consonäre (lat.) = zusammentönen

2) dissonäre (lat.) = verworren klingen

(entsprechend dem Wert $16/15$). Die großen bezeichnet man als Ganztonintervalle (Ganztöne), die kleinen als Halbtonintervalle (Halbtöne). Man muß auch einen großen Ganzton ($9/8$) und einen kleinen Ganzton ($10/9$) unterscheiden. Jede Dur-Tonleiter beginnt mit zwei Ganztonschritten verschiedener Größe. Baut man auf dem Ton d einer C-Dur-Tonleiter als Grundton eine Dur-Tonleiter auf, so muß man je einen Halbton zwischen f und g (fis) und zwischen c und d (dis) einschalten. Fügt man auf einem rein in C-Dur gestimmten Klavier die entsprechenden Saiten ein, so ist es doch nicht möglich, auf dem Instrument eine reine D-Dur-Tonleiter zu spielen, denn der zweite Ton einer etwa mit d' (297 Hz) beginnenden Tonleiter müßte entsprechend dem Intervall $9/8$ die Frequenz 334,125 Hz und der fünfte die Frequenz 445,5 Hz haben. Beide Töne weichen von den Tönen e' (330 Hz) und a' (440 Hz) der C-Dur-Tonleiter ab. Entsprechende Unstimmigkeiten ergeben sich bei Tonleitern, die mit anderen Tönen der C-Dur-Tonleiter beginnen.

Um nun auf einem Klavier unbeschränkt von einer Tonart in eine andere übergehen zu können, verzichtet man überhaupt auf eine reine Stimmung und teilt das Intervall der Oktave in 12 gleiche Halbtonstufen ein. Ist x der Zahlenwert eines solchen Halbtonintervalles, so erhält man nach 12 aufeinanderfolgenden gleichen Schritten das Intervall x^{12} , und dieses muß dann der höheren Oktave entsprechen, also gleich 2 sein. Es ergibt sich also $x^{12} = 2$ und $x = \sqrt[12]{2} = 1,059$. Eine derartige Stimmung bezeichnet man als gleichschwebende Temperatur. Bei diesem Verfahren ist keine Tonart vor der anderen bevorzugt, aber die Intervalle innerhalb der Oktave sind sämtlich unrein, doch ist die Abweichung von der reinen Stimmung so gering, daß sie den Genuß der Musik nicht stört. Für eine Tonleiter in Halbtonstufen ergibt sich folgendes Bild:

Ursprüngliche Tonfolge	c	d	e	f	g	a	h	c'
Eingeschaltete Töne		cis	dis		fis	gis	ais	

Eine Tonleiter, die in Halbtonstufen fortschreitet, nennt man chromatisch¹⁾. Die gewöhnliche Tonleiter mit fünf Ganzton- und zwei Halbtonstufen

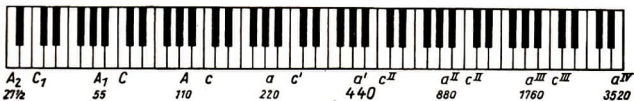


Abb. 19. Tasten eines Klaviers

heißt diatonisch²⁾. Die in die diatonische C-Dur-Tonleiter eingeschalteten Töne erkennt man auf dem Klavier an den schwarzen Tasten (Abb. 19). Der ganze Tonbereich eines Klaviers umfaßt etwa 7 Oktaven mit Tönen von 27,5 Hz bis 3520 Hz.

1) chróna (griech.) = Farbe

2) diátonos (griech.) = durchgespannt, durchgehend

§ 4. Schwingungen gespannter Saiten

Zur Untersuchung der Gesetze schwingender Saiten dient das Monochord (Abb. 7). Es ist dies ein hölzerner Kasten, auf dem Saiten aufgespannt werden können. Wir ziehen zwei Saiten auf und stimmen sie auf denselben Ton. Dann verkürzen wir die eine durch einen Klemmklotz, der die Saite wie eine Zange packt und einen Teil am Schwingen hindert, ohne die Spannung zu ver-

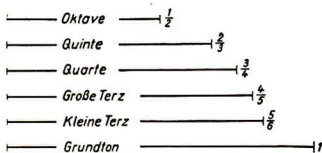


Abb. 20. Seitenlänge und Tonhöhe

ändern. Dabei stellen wir fest: Die verkürzte Saite gibt stets einen höheren Ton. Vergleichen wir diesen mit dem Ton der unveränderten Saite, so zeigt sich ein einfaches Gesetz (Abb. 20). In der Abb. 20 geben die Strecken die Längen der Saiten an. Die Länge der unverkürzten Saite ist mit 1 bezeichnet. Der ihr entsprechende Ton heißt Grundton.

Verkürzt man z. B. die Saite auf die Hälfte, so gibt diese die höhere Oktave des Grundtones. Bei Verkürzung auf $\frac{2}{3}$ der Länge erhält man die Quinte usw. Es kehren hier dieselben einfachen Zahlenverhältnisse wieder, wie wir sie schon einmal in anderer Bedeutung kennengelernt haben. Damals waren es die Verhältnisse von Schwingungszahlen. Jetzt sind es die Verhältnisse von Saitenlängen.

Man kann das Ergebnis dahin zusammenfassen:

Die Schwingungszahlen gleichgespannter Saiten aus gleichem Material und von sonst gleicher Beschaffenheit verhalten sich umgekehrt wie die Längen.

Untersucht man auch den Einfluß der Spannung, der Dicke und des Stoffes auf die Frequenz der Schwingungen von Saiten, so findet man:

Die Schwingungszahl einer Saite ist um so größer, je geringer die Masse der Längeneinheit der Saite ist und je stärker die Saite gespannt ist.

Man kann die Frequenz f von Saitenschwingungen auch berechnen nach der Formel

$$f = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{981 \cdot P}{m_1}}$$

Hierin bedeuten: l die Länge der Saite in cm, P die spannende Kraft in p und m_1 die Masse eines Saitenstückes von 1 cm Länge.

Bei den Musikinstrumenten werden für die tiefen Töne umspinnene Saiten verwendet. Dadurch wird die Masse der Saite vergrößert. Bei manchen Instrumenten haben die Saiten während des Spiels eine unveränderliche Länge, z. B. beim Klavier. Beim Baß und Cello, bei der Violine, der Gitarre und der

Mandoline werden die Saiten zunächst gestimmt und während des Spiels auf ein Griffbrett niedergedrückt, so daß sie nur zum Teil schwingen können. Dabei werden Länge und Spannung geändert. Drückt man also eine Violinsaiten genau in der Mitte nieder, so erhält man nicht die höhere Oktave, sondern einen etwas höheren Ton, da die Spannung verstärkt ist. Die Zither und manche Arten der Gitarre enthalten Saiten, die je nach Wunsch während des Spiels verkürzt werden, und außerdem andere von unveränderlicher Länge.

Eine Saite kann wie ein Seil oder eine Schraubenfeder als Ganzes

oder in einzelnen Abteilungen schwingen (Abb. 21). Es können z. B. nur die beiden Endpunkte in Ruhe bleiben, während der mittlere Teil deutlich schwingt; dann schwingt die Saite in ihrer Grundschwingung. Auf der schwingenden Saite kann eine beliebige Anzahl von Ruhestellen in gleichen Abständen voneinander auftreten. (Vgl. Teil II B, § 4.) Die ruhenden Stellen nennt man Schwingungsknoten, die am stärksten bewegten Schwingungsbäuche. Auf der schwingenden Saite kann man die Knoten und Bäuche durch Papierreiter nachweisen. Berührt man während des Anstreichens die Saite leicht mit dem Finger an einer Stelle, an der sich ein Knoten bilden kann, so bleiben hier und an entsprechenden Stellen die Reiter sitzen und werden an den anderen abgeworfen. Bilden sich auf der schwingenden Saite mehrere Schwingungsbäuche oder

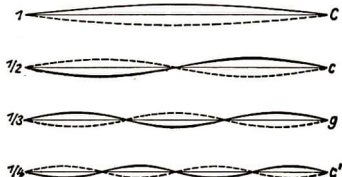


Abb. 21. Schwingende Saite.
Grundschwingung und Oberschwingungen einer Saite

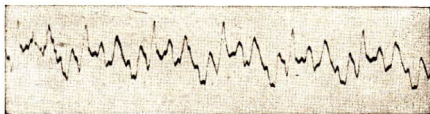


Abb. 22. Geigenklang. Ton g' auf der d'-Saite

Oberton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Relative Schwingungswerten .	60	68	72	76	81	86	90	96	100	106	112	118	125	132	140

gleich der Schwingungszahl einer gleichgespannten Saite von $\frac{1}{2}$ der ursprünglichen Länge. Streicht man die Saite irgendwie an, so klingen auch einzelne Obertöne mehr oder weniger stark mit. Ein solches Gemisch von einfachen Tönen bezeichnet man als Klang. Wir sahen früher schon einmal (S. 7), daß die Form, die man beim Aufzeichnen der Schwingungen einer Saite findet, und mit ihr die Klangfarbe, von der Art des Anstreichens abhängt. Ohm hat (1843) nachgewiesen, daß die Klangfarbe eines Tones durch das mehr oder weniger starke Mitschwingen der Obertöne hervorgerufen wird. Abb. 22 zeigt die Schwingungsform eines Geigenklanges mit Angabe der relativen Schwingungsweiten der Obertöne.

§ 5. Schwingende Stäbe und Platten

Die Gesetze schwingender Saiten lassen sich auch ohne Zuhilfenahme des Ohres mit geeigneten Meßinstrumenten objektiv nachweisen.

Bei einer tönenden Saite schwingen die Teile quer zur Längsrichtung der Saite. Solche Schwingungen nennt man Querschwingungen oder Transversalschwingungen. Stäbe können in derselben Weise zu Schwingungen angeregt werden, wenn man sie etwa am Ende oder in der Mitte festklemmt



Abb. 23. Querschwingender Stab



Abb. 24
Schwingende
Stimmgabel
mit zwei
Knotenpunkten

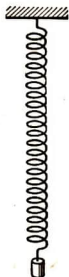


Abb. 26
Längs-
schwingungen
einer
Schraubenfeder



Abb. 25. Längsschwingender Stab

und seitlich anschlägt, wie wir es bei einem Versuch mit den Stahlstreifen gemacht haben (S. 5). Dabei können auf den Stäben auch mehrere Knoten und Bäuche auftreten, ähnlich wie bei Saiten (Abb. 23). So ist es z. B. bei der Stimmgabel. Diese kann als gebogener Stab aufgefaßt werden. Schlägt man sie an, so bilden sich am unteren Ende in der Nähe des Stieles zwei Knoten, und der Stiel selbst wird nach oben und unten bewegt (Abb. 24). Stäbe können aber auch Schwingungen in der Längsrichtung ausführen, wenn man sie aufhängt oder festklemmt und mit einem Tuch, das durch Kolophonium rau gemacht ist, in der Längsrichtung streicht (Abb. 25). Sie geben dabei recht starke, hohe Töne. Daß die Schwingungen in der Längsrichtung erfolgen, kann man mit dem kleinen Pendel nachweisen (§ 1). Längsschwingende Stäbe schwingen dann so wie etwa eine Schraubenfeder, die mit einem Gewicht belastet ist und etwas in die Länge gezogen wurde (Abb. 26). Derartige Schwingungen nennt man Längsschwingungen oder Longitudinalschwingungen. Ebenso wie auf

einem longitudinal schwingenden Stab können sich auch bei einer in Längsschwingungen versetzten Schraubenfeder an mehreren Stellen Knoten und Bäuche bilden. Eine Platte, ein Gong, eine Glocke geben beim Anschlagen ein ganzes Gemisch von Tönen. An schwingenden Platten kann man die den einzelnen Tönen entsprechenden Schwingungszustände mit den Chladnischen¹⁾ Klangfiguren nachweisen (Abb. 27).

Eine Messingplatte ist in der Mitte festgeklemmt. Sie wird durch einen Geigenbogen zu Schwingungen angeregt, und diese werden durch aufgestreuten Sand dadurch sichtbar gemacht, daß der Sand von bewegten Stellen fortgeschleudert wird und sich an den Ruhestellen sammelt. Bei diesem Versuch bilden sich nicht einzelne Knotenpunkte aus, sondern zusammenhängende Knotenlinien, längs deren die Platte nicht schwingt. Durch Berühren der Platte während des Anstreichens an ausgewählten Stellen kann man einzelne bestimmte Obertöne und die ihnen entsprechenden Knotenlinien hervorrufen.

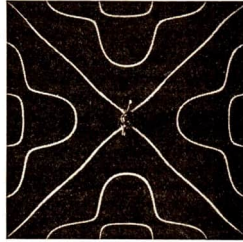


Abb. 27. Chladnische Klangfigur

Schraubt man die Glocke einer Klingel auf einen Stiel und streicht den Rand mit einem Bogen, so kann man ähnlich wie bei der schwingenden Platte verschiedene Töne erzeugen. Gießt man etwas Öl in die Glocke, beleuchtet seitlich mit einer Bogenlampe und entwirft ein Bild der Oberfläche der Flüssigkeit an der Decke des Zimmers, so sieht man, daß das Bild sich je nach der erregten Schwingung verändert.

Die Töne von Stäben und Platten bilden im allgemeinen keine harmonische Tonreihe.

§ 6. Schwingende Luftsäulen

Füllt man einen Standzylinder unter der Wasserleitung, so vernimmt man einen Ton, der immer höher wird, je mehr sich der Wasserspiegel dem Rande nähert. Bläst man über die Öffnung eines leeren oder zum Teil mit Wasser gefüllten Zylinders oder eines hohlen Schlüssels, so hört man wieder einen Ton, der um so höher ist, je kürzer der Luftraum in der Höhlung ist. Schlägt man mit der Hand auf die Öffnung eines Papprohres, so kann man auch einen Ton wahrnehmen. In allen diesen Fällen wird die Luft im Inneren zum Schwingen angeregt. Daß das Gefäß selbst nicht am Schwingen beteiligt ist, erkennt man schon daraus, daß man es fest anfassen kann, ohne den Ton zu ersticken. Die Luftteilchen schwingen bei den geschilderten Vorgängen in

1) Chladni, 1756—1827, Wittenberg

der Längsrichtung des Zylinders hin und her. Es handelt sich also um Längsschwingungen oder Longitudinalschwingungen. In einem einseitig geschlossenen und an der Öffnung angeblasenen Zylinder

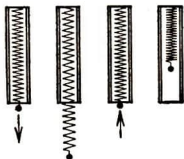


Abb. 28. Veranschaulichung einer schwingenden Luftsäule

schwingt die Luft in derselben Art wie eine belastete Schraubenfeder, die an einem Ende aufgehängt ist (Abb. 28). Bei einer in einem Glasrohr schwingenden Luftsäule können auch mehrere Knoten auftreten. Den Nachweis können wir folgendermaßen führen: Wir bringen in ein Glasrohr ein wenig trockenes Korkpulver, halten das Rohr waagrecht und blasen vor der Öffnung eine Signalpfeife an. Dann wird die Luft im Inneren zu Schwingungen angeregt, und das Pulver zeigt die Lage der Knoten und Bäuche.

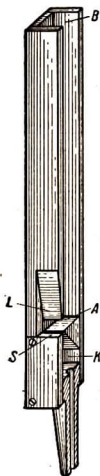


Abb. 29
Lippenpfeife



Abb. 30
Zungenpfeife

In einer Orgel werden die Töne mit Lippen- und Zungenpfeifen erzeugt. Bei einer Lippenpfeife (Abb. 29) strömt die in den Blasebälgen zusammengepreßte Luft durch ein Ansatzrohr in eine Windkammer *K* am unteren Ende, dem Fuß der Pfeife. Die Windkammer *K* ist bis auf einen schmalen Schlitz *S* geschlossen. Durch diesen drängt die Luft in der Form eines schmalen Luftblattes gegen die zugeschärfte Kante der Lippe *L*. Dabei kommt das Luftblatt in pendelnde Schwingungen. Diese regen den Luftraum *AB* in der Pfeife zu Schwingungen an und erzeugen einen Ton, dessen Höhe durch die Länge der Pfeife bestimmt ist. Es werden oben offene und auch geschlossene (gedeckte oder gedackte) Pfeifen verwendet.

Die Zungenpfeife (Abb. 30) hat ihren Namen von der „Zunge“, einem kleinen elastischen Metallstreifen, der vor einer Öffnung hin- und herschwingen kann und in der Ruhelage die Öffnung nahezu verdeckt. In einfachster Form kennen wir solche Zungen von der Mundharmonika und Ziehharmonika her. Bei den Zungenpfeifen der Orgel strömt die Luft zunächst in eine Windkammer. Aus dieser kann sie nur entweichen, indem sie die Zunge beiseite drückt. Dadurch gerät die

Zunge in Schwingungen und gibt der Luft den Weg nur in regelmäßigen Zeitabständen frei. Es entsteht ein Ton, dessen Höhe durch die Zahl der Schwingungen der Zunge bestimmt ist. Mit Hilfe eines Drahtes läßt sich ein Teil der Zunge festklebmen, dadurch kann man die Tonhöhe ändern und die

Pfeife abstimmen. Solche Zungenpfeifen werden besonders beim Harmonium und der Drehorgel verwendet.

Tönende Luftsäulen spielen auch noch in anderen Musikinstrumenten eine Rolle. In den Flöten werden die Töne durch schwingende Luftsäulen erzeugt, deren Länge durch Freigeben oder Zudecken von Löchern geändert werden kann. Durch die Art des Anblasens kann man die Grundschiwingung oder eine Oberschiwingung der Luftsäule erregen. Die Querflöte hat kein besonderes Mundstück. Bei der Blockflöte strömt die Luft wie bei einer Lippenpfeife gegen eine Schneide und wird dadurch zu Schwingungen angeregt. Bei der Trompete, der Posaune und dem Horn drückt der Bläser die Lippen gegen das Mundstück und regt den Ton durch Schwingungen der eigenen Lippen an. Bei der Klarinette, der Oboe und dem Fagott sind Zungen aus Rohrblättern am Mundstück befestigt. Diese nimmt der Musiker beim Anblasen in den Mund.

§ 7. Resonanz

1. Freie Schwingungen. Eine angestoßene und dann sich selbst überlassene Schaukel führt freie Schwingungen aus. Die Frequenz dieser Schwingungen hängt nicht von der Art des Anstoßens ab. Man spricht daher (auch in ähnlichen Fällen) von einer Eigenschwingung und einer Eigenfrequenz. Die Ausschläge der Schaukel werden immer kleiner, und schließlich kommt sie zur Ruhe: Die Schwingungen sind gedämpft. Man kann aber das Abnehmen der Amplituden verhindern und diese sogar wachsen lassen, wenn man die Schaukel zu Beginn einer Schwingung jedesmal von neuem anstößt. Auch ein Fadenpendel und eine Stimmgabel können Eigenschwingungen der beschriebenen Art ausführen.

2. Resonanz zwischen Stimmgabeln. Stellt man zwei gleichgestimmte Stimmgabeln A und B (Abb. 31) in einiger Entfernung voneinander auf und schlägt die eine an, so tönt auch bald die zweite.

Der Vorgang ist ähnlich wie bei einer mehrfach angestoßenen Schaukel zu erklären. Die Luftteilchen geben die Stöße, die sie von der ersten Gabel erhalten haben, in der Frequenz der Erregung an die zweite Gabel weiter und bringen sie zum Schwingen, zuerst mit geringen, dann mit größer werdenden Amplituden. Man nennt



Abb. 31. Resonanz von Stimmgabeln

den Vorgang Resonanz¹⁾ (Mittönen). Anstatt mit dem Ohr können wir das Schwingen der zweiten Gabel auch mit einem kleinen Pendel (§ 1) nachweisen. Verstimmt man die eine Gabel durch Anschrauben eines kleinen

¹⁾ *resonance* (lat.) = widerhallen

Gewichtes an eine Zinke, so kann man die andere auf die geschilderte Art nicht zum Mittönen bringen, es besteht keine Resonanz mehr.

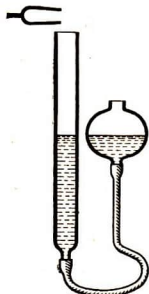


Abb. 32
Resonanz einer Luftsäule

3. Resonanz zwischen Stimmgabel und Luftsäule. Wir sahen schon früher, daß die Luftsäule in einem Glaszylinder beim Anblasen tönt. Halten wir eine schwingende Stimmgabel über einen solchen Zylinder (Abb. 32), so gerät die Luft im Zylinder nur dann in kräftige Schwingungen, wenn die Luftsäule beim Anblasen den Ton der Stimmgabel gibt. Die Gleichheit der Eigenfrequenzen ist also auch hier Bedingung für die Resonanz. Durch Heben oder Senken des Niveaugefäßes (Abb. 32) kann man der Luftsäule die richtige Länge geben. Diese beträgt für eine a' -Gabel 19 cm, wenn die Grundschwingung der Luftsäule erregt wird. Befestigt man eine solche Stimmgabel auf einem einerseits offenen Holzkasten von 19 cm Länge, einem Resonanzkasten, so tönt beim Anschlagen der Gabel die im Kasten enthaltene Luft mit, und der Ton wird verstärkt.

4. Resonanz zwischen zwei Pendeln. Zwei Pendel gleicher Länge (A und B in Abb. 33a) haben dieselbe Eigenfrequenz. Verbindet man sie durch einen Faden, der durch ein kleines Gewicht g gespannt ist, und stößt das eine an, so gerät das zweite in zunehmendem Maße in Schwingungen, während die des ersten immer schwächer werden. Schließlich kommt das erste Pendel zur Ruhe, während das zweite kräftig schwingt. Dann kehrt sich der Vorgang um. Der erste Teil des Versuchs zeigt, daß die Energie des ersten Pendels vollständig auf das zweite übertragen wurde. Das zweite Pendel erhält durch den Faden vom ersten Pendel her immer einen Anstoß, wenn es zu einer neuen Schwingung ansetzen will; auch dieser Vorgang beruht auf Resonanz. Nimmt man zwei Pendel ungleicher Länge (Abb. 33b), so gelingt es durch dieselbe Versuchsanordnung nicht, das eine durch das andere zu kräftigen Schwingungen anzuregen. Jetzt erfolgen die Anstöße nicht im Takt der Eigenschwingungen des zweiten Pendels.

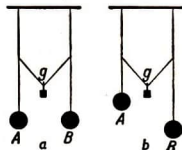


Abb. 33. Resonanzpendel

Die Versuche zeigen:

Haben zwei schwingungsfähige Körper gleiche Eigenschwingungen, so kann einer durch den anderen erregt werden, wenn zwischen ihnen eine Verbindung zur Übertragung der Schwingungen besteht. Die vermittelnde Verbindung bezeichnet man als Koppelung.

Die beiden Pendel waren durch den Faden gekoppelt, die Stimmgabeln durch die Luft.

Beim Versuch mit den Stimmgabeln werden die massigen Stahlzinken durch die leichten Luftteilchen in Schwingungen versetzt. Ähnlich ist es beim Läuten einer schweren Glocke durch Menschenkraft. Wenn nur die an sich geringen Anstöße durch das Seil im richtigen Takt erfolgen, kann auch eine Glocke von bedeutender Masse zum Schwingen gebracht werden.

5. Erzwungene Schwingungen. Alle schwingungsfähigen Körper, besonders dünne Platten aus Holz oder Metall und gespannte Häute (Membranen, Abb. 34), können durch jeden beliebigen Ton zum Mitschwingen veranlaßt werden, z. B. der Resonanzboden einer Violine, das Trommelfell des Ohres. Werden solche Körper durch Vorrichtungen irgendwelcher Art zum Schwingen gebracht, so sind sie imstande, die entsprechenden Schwingungen an die Luft zu übertragen. Davon macht man Gebrauch beim Telefon, beim Lautsprecher, beim Grammophon. Man spricht hier von erzwungenen Schwingungen im Gegensatz zu den Eigenschwingungen. Es ist erstaunlich, daß die dünne Eisenmembran eines Telefons die kompliziertesten Schwingungen getreu wiedergibt und daher nicht nur einfache Töne, sondern auch die menschliche Stimme übertragen kann.



Abb. 34
Ein-
gespannte
Membran

§ 8. Das menschliche Stimmorgan und die Stimme

1. Der Kehlkopf. Die menschliche Stimme wird im Kehlkopf erzeugt (Abb. 35). Dieser sitzt am oberen Ende der Luftröhre und enthält zwei Stimmbänder, die einen Spalt, die Stimmritze, zwischen sich freilassen. Durch besondere Muskeln kann diese verengt oder erweitert werden. Außerdem lassen sich die Stimmbänder mehr oder weniger stark spannen. Beim ruhigen Atmen sind die Stimmbänder schlaff, und die Luft kann ungehindert durch die Stimmritze strömen.

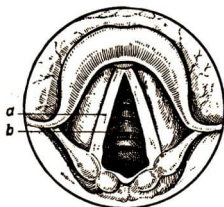
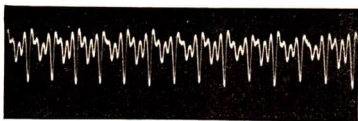


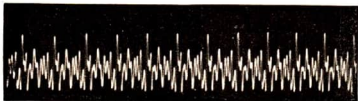
Abb. 35. Kehlkopf
a Stimmband, b Stimmritze

2. Die Bildung der Stimme. Beim Sprechen und Singen wird die Stimmritze verengt, und die Stimmbänder werden gespannt. Sie geraten durch die vorbeigeprägte Luft in Schwingungen und regen die Luft in der Mundhöhle zum Mitschwingen an. Die Höhenlage der menschlichen Stimme ist von der Länge und Breite der Stimmbänder abhängig. In der Zeit des Stimmwechsels vergrößert sich das ganze Stimmorgan. Aus einer Sopran- oder Altstimme entwickelt sich dabei eine Tenor- oder Baßstimme.

Singt man verschiedene Vokale in derselben Tonhöhe, so macht der durch die Stimmbänder erzeugte Grundton stets dieselbe Anzahl von



i



u

Abb. 36. Menschliche Singstimme (i und u)

Schwingungen in der Sekunde. Die Töne klingen aber ganz verschieden. Die gewünschte Klangfarbe erreichen wir durch Veränderung der Einstellung der Mundhöhle. Dabei werden durch Resonanzwirkungen bestimmte Obertöne mehr oder minder verstärkt. Das entstehende Tongemisch ergibt dann die Klangfarbe des betreffenden Vokals. Abb. 36 zeigt eine Aufnahme der menschlichen Singstimme mit Hilfe eines Oszillographen¹⁾ (vgl. Teil IIA, § 23).

§ 9. Das Hörorgan und das Hören

1. Bau des inneren Ohres. Wir ergänzen die auf S. 9 zu Abb. 12 bereits gegebene Beschreibung über den Bau des menschlichen Ohres. Die Paukenhöhle enthält drei winzige, gelenkig miteinander verbundene Knochen (*c*): Hammer, Amboß und Steigbügel. Der Hammer ist mit seinem Stiel am Trommelfell angewachsen, der Steigbügel sitzt mit seiner Sohlenfläche auf einer dünnen Haut, dem ovalen Fenster, durch das die Paukenhöhle gegen das innere Ohr abgeschlossen ist. Am inneren Ohr unterscheidet man den Vorhof (*d*), die drei Bogengänge und die Schnecke (*f*). Alle Hohlräume des inneren Ohres sind mit einer Flüssigkeit gefüllt. Im Inneren der Schnecke befindet sich das sog. Cortische Organ. Dieses enthält eine in den Windungen der Schnecke aufsteigende Membran, in der Tausende von Fasern verschiedener Länge angeordnet sind. Die Fasern stehen in Verbindung mit Zellen, in denen die Nervenfasern des Hörnerven (*e*) endigen. Trifft ein Schall auf das Ohr, so wird zunächst das Trommelfell in erzwungene Schwingungen versetzt. Diese werden durch Vermittlung der Gehörknöchelchen auf das ovale Fenster und durch die Flüssigkeit auch auf das Innere der Schnecke übertragen. Dort erregen sie die Fasern des Hörnerven. So wird der Reiz bis zum Gehirn geleitet, wo die Wahrnehmung des Schalles erfolgt. Man nimmt an, daß entsprechend der Art des ankommenden Schalles bestimmte Fasern der Membran des Cortischen Organs durch Resonanz zum Mitschwingen veranlaßt werden

1) oscilläre (lat.) = schwingen, graphein (griech.) = schreiben

und damit die entsprechenden Fasern des Hörnerven erregen. Bei einer Zerstörung des Trommelfelles und der Paukenhöhle können doch noch Töne wahrgenommen werden, wenn nur das innere Ohr gesund ist. Der Schall kann auch durch den umgebenden Knochen unmittelbar auf die Flüssigkeit des inneren Ohres und das Cortische Organ übertragen werden. Die Leistungen des Hörorgans sind erstaunlich. Wir können z. B. einen Ton von der Frequenz 1000 Hz schon wahrnehmen, wenn die entsprechende Schallintensität nur 10^{-16} Watt/cm² beträgt. Die das Trommelfell erregenden Luftschwingungen haben dann eine Amplitude von der Größenordnung eines Atomdurchmessers (10^{-8} cm). Das Ohr besitzt auch die Fähigkeit, die Bestandteile eines zusammengesetzten Klanges zu erkennen. So können wir z. B. beim Spiel eines Orchesters die einzelnen Instrumente heraushören.

2. Frequenzempfindlichkeit des Ohres. Ein normales menschliches Ohr kann Schwingungen von etwa 16 Hz bis 20000 Hz als Töne wahrnehmen. Im Alter nimmt die Hörfähigkeit besonders für hohe Töne ab, so daß z. B. dann das Zirpen der Grillen nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Besonders hohe Töne empfinden wir als unangenehm. Sie erzeugen mitunter sogar Schmerzempfindungen.

Schallschwingungen von mehr als 20000 Hz bezeichnet man als Ultraschall. Man kann Ultraschallschwingungen von mehr als 1 Million Hz erzeugen und mit geeigneten Vorrichtungen nachweisen (vgl. Teil II B, § 4).

3. Schallstärke und Lautstärke. Die Stärke des Reizes, mit dem ein Schall auf unser Ohr einwirkt, bezeichnet man als Schallstärke. Davon zu unterscheiden ist die Lautstärke, d. i. die Stärke unserer Empfindung bei der Wahrnehmung des Schalles. Die geringste Schallstärke, die eine Gehörempfindung hervorzurufen vermag, bezeichnet man als Hörschwelle. Ihr entspricht die Lautstärke 0. Vergrößert man die Schallstärke, so wächst auch die Lautstärke, bis schließlich statt einer Schallwahrnehmung eine Schmerzempfindung auftritt.

Um eine bestimmte Lautstärke zu kennzeichnen, hat man den ganzen wahrnehmbaren Bereich so in Stufen eingeteilt, daß der Unterschied zwischen zwei benachbarten Stufen für das Ohr gerade noch bemerkbar ist. Es ergeben sich dann 130 Stufen. Die Stufeneinheit der Lautstärke wird Phon¹⁾ genannt. Einen Begriff von der Lautstärke bekannter Geräusche soll die folgende Tabelle vermitteln.

1) phoné (griech.) = Ton

Geräuschquelle	Lautstärke in Phon
Blättersäuseln	10
Flüstern	20
Gedämpfte Unterhaltungssprache	40
Lautes Sprechen	60
Lauter Straßenlärm	70
Schreien	80
Sehr laute Hupe	90
Motorrad	100
Niethammer	110
Blechschmiede	120

Bei 130 Phon liegt die Schmerzgrenze.

§ 10. Geschichtliche Entwicklung

Der Überlieferung nach haben Pythagoras und seine Schüler im 6. Jahrhundert v. u. Ztr. bereits erkannt, daß die Längen gleichgespannter Saiten in einfachen Zahlenverhältnissen zueinander stehen, wenn die entsprechenden Töne die Intervalle der diatonischen Tonleiter ergeben. Es ist verständlich, daß dieser erste geglückte Versuch, die Zahlen in den Dienst der Naturerkenntnis zu stellen, Anregungen für weitere Untersuchungen auch auf anderen Gebieten gegeben hat und bei den Pythagoreern zunächst zu der übersteigerten Vorstellung führte, daß alle Gesetzmäßigkeiten in der Natur sich durch die Beziehungen ganzer Zahlen in einfacher Form ausdrücken lassen. Die chromatische Tonleiter ist im 16. Jahrhundert in Gebrauch gekommen. Die Wellennatur des Schalles ist zuerst von Galilei (1564—1642) festgestellt worden. Er erkannte auch die Abhängigkeit der Schwingungszahl einer Saite von ihrer Länge. Die Schallgeschwindigkeit wurde von Gassendi (um 1600) gemessen. Berechnungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Stöße wurden von Newton ausgeführt (1643—1727). Den Zusammenhang zwischen der Klangfarbe und den Obertönen entdeckte Ohm (1843). Helmholtz hat das ganze Gebiet der Akustik in der „Lehre von den Tonempfindungen“ ausführlich behandelt (1862). Wir verdanken ihm grundlegende experimentelle Untersuchungen über die Zusammensetzung der Klänge aus einfachen Tönen. Der Phonograph wurde von Edison (1847—1931) erfunden.

OPTIK

§ 11. Ausbreitung des Lichtes im Raume

1. Lichtquellen und beleuchtete Körper. Das Auge nimmt die uns umgebende Körperwelt nur wahr, wenn von ihr Licht ausgeht und ins Auge fällt. Im vollkommen verdunkelten Zimmer sehen wir nichts. Entzünden wir ein Streichholz oder schalten wir eine Glühlampe ein, so werden nicht nur die Flamme des Streichholzes und der Draht der Glühlampe sichtbar, sondern auch die Gegenstände, die sich im Zimmer befinden. Flamme und Glühdraht sind Selbstleuchter und damit Lichtquellen; sie senden Licht aus und beleuchten das Zimmer. Dieses Licht wird beim Auftreffen auf die Oberflächen der Körper zurückgeworfen (reflektiert¹⁾), geht also scheinbar jetzt von den Gegenständen aus und macht sie sichtbar. Wir scheiden so durch unseren Gesichtssinn die Körper in selbstleuchtende und beleuchtete. Die Zahl der Lichtquellen ist gering. Eine natürliche Lichtquelle ist die Sonne, der Mond reflektiert nur Sonnenstrahlung. Die Sterne, mit Ausnahme der Planeten, sind Selbstleuchter. Unsere künstlichen Lichtquellen sind glühende Körper und die bei elektrischen Entladungen in Gasen auftretenden Leuchterscheinungen.

2. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes. Wir wollen kurz einiges Bekannte über die Ausbreitung des Lichtes wiederholen. Wenn die Sonne durch enge Öffnungen in einen dunklen, staubgefüllten Raum scheint, dann sehen wir auf dem Wege des Lichtes die sog. Sonnenstäubchen aufleuchten und haben den Eindruck, daß das Licht sich geradlinig ausbreitet. Eine entsprechende Beobachtung machen wir, wenn Sonnenlicht in feuchter Luft durch Wolkenlücken hindurchdringt.

Bei den folgenden Versuchen verwenden wir eine kleine Glühlampe mit möglichst eng gewickeltem Glühdraht. Eine solche wenig ausgedehnte Lichtquelle nennen wir punktförmig und wollen damit sagen, daß die Ausdehnung der Lichtquelle gegenüber der Entfernung, in der wir das Licht untersuchen, vernachlässigt werden kann.

Stellen wir eine undurchsichtige Scheibe mit einer kleinen Öffnung, eine sog. Blende, in den Weg des Lichtes, so dringt durch das Loch nur ein enges Lichtbündel hindurch. Blasen wir Rauch in den Weg des Lichtes, so sehen wir hinter der Blende einen erhellten Raum in der Form eines schwach kegelförmigen Stabes, dessen verjüngtes Ende mit der Öffnung zusammen-

1) refléctere = zurückwerfen

fällt. Ist die Öffnung klein im Vergleich mit den Abmessungen der Versuchsanordnung, so nennen wir das hindurchgehende Lichtbündel einen Lichtstrahl. Derartige Lichtstrahlen deuten wir in Zeichnungen durch gerade Linien an, wir müssen aber beachten, daß es streng lineare Lichtstrahlen ohne endlichen Durchmesser nicht gibt.

Die Lichterfüllung des ausgeblendeten Kegels beschreiben wir auch mit den Worten: Der Kegel ist von einem Lichtstrom erfüllt.

3. Divergente¹⁾ und parallele²⁾ Lichtstrahlenbündel. Der Querschnitt des Lichtstrahlenbündels, das wir aus dem Lichtstrom einer „punktförmigen“ Lichtquelle ausblenden, wird größer, wenn die Entfernung von der Lichtquelle

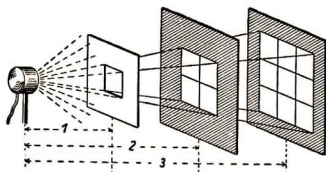


Abb. 37. Abhängigkeit des Querschnitts eines Lichtbündels von der Entfernung

wächst; ein solches Lichtstrahlenbündel nennen wir *divergent*.

Wir wollen gleich untersuchen, wie sich der Querschnitt des Lichtstrahlenbündels mit der Entfernung von der Lichtquelle ändert. Wir benutzen dazu eine quadratische Blende von 5 cm Seitenlänge und richten diese in 50 cm Entfernung von der punktförmigen Lichtquelle so aus, daß die Verbindungs-

linie zwischen der Lichtquelle und dem Mittelpunkt des Quadrates auf dessen Ebene senkrecht steht. Das ausgeblendete Lichtstrahlenbündel hat an dieser Stelle also einen Querschnitt von 25 cm^2 . Wir bringen nun einen Schirm, auf dem Quadrate zu je 5 cm Seitenlänge gezeichnet sind (Abb. 37), parallel zur Blende in den vom Lichtstrom durchsetzten pyramidenförmigen Raum und verändern seine Entfernung von der Lichtquelle so lange, bis der auf ihm zu sehende quadratische Lichtfleck eine Seitenlänge von 10 cm hat; der Querschnitt ist also 100 cm^2 . Wir messen von diesem Ort aus die Entfernung zur Lichtquelle und finden 1 m. Nun verändern wir die Lage des Schirmes, bis die Seitenlänge der Lichtfigur 15 cm, der Querschnitt also 225 cm^2 beträgt. Die Messung des Abstandes von der Lichtquelle ergibt 150 cm. Wir finden also: Der Querschnitt des Lichtbündels wächst auf den vierfachen Wert, wenn sich die Entfernung von der Lichtquelle verdoppelt, auf den neunfachen Wert, wenn sich die Entfernung verdreifacht.

Der Querschnitt eines abgegrenzten, von einer punktförmigen Lichtquelle ausgehenden Lichtstrahlenbündels ist proportional dem Quadrat des Abstandes von der Lichtquelle.

Zwischen Blende und Schirm erkennen wir eine vom Licht durchsetzte abgestumpfte Pyramide mit scharfen Seitenkanten. Es liegen hier dieselben geometrischen Verhältnisse vor wie bei einer quadratischen Pyramide, die

1) divergēre (lat.) = auseinanderneigen

2) parallēlos (griech.) = nebeneinanderlaufend

durch eine zur Grundfläche parallele Ebene geschnitten wird. Der Versuch zeigt besonders deutlich die geradlinige Ausbreitung des Lichtes.

Lassen wir nun Sonnenlicht durch eine Blende ins Zimmer fallen und untersuchen den Querschnitt des herausgeblendeten Strahlenbündels in verschiedenen Entfernungen von der Blende, so finden wir, daß er überall gleich groß ist. Dies ist das Kennzeichen für Bündel parallelen Lichtes, Weshalb beobachten wir jetzt parallele Strahlen? Die Sonne ist ungefähr $1,5 \cdot 10^8$ km von uns entfernt; wir ändern bei unseren Versuchen die Entfernung von der Lichtquelle, der Sonne, nur um etwa zehn Billionstel ihres Wertes. Die Entfernung von der Sonne ist also praktisch immer die gleiches deshalb bleibt der Querschnitt des Lichtstrahlenbündels erhalten.

4. Lochkamera. Auf der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes beruht die Anwendung der Lochkamera. Sie ist ein vollständig geschlossener Kasten; die eine Wand besteht aus durchscheinenden Papier oder einer Mattscheibe, in der gegenüberliegenden ist in der Mitte eine kleine Öffnung angebracht. Man richtet die Kamera aus einer beliebigen Entfernung auf eine Kerze oder eine Glühlampe und blickt von hinten her auf die durchscheinende Wand; störendes Seitenlicht schirmt man z. B. mit einem schwarzen Tuch ab. Man sieht dann auf der durchscheinenden Wand ein Bild der Lichtquelle; es steht auf dem Kopf. Nähert man den Kasten der Lichtquelle, so wird das Bild größer, geht man mit der Kamera weiter von der Lichtquelle fort, so wird das Bild kleiner. Macht man die Öffnung größer, so wird das Bild heller, aber unschärfer; je kleiner die Öffnung ist, desto schärfer, aber auch desto lichtschwächer erscheint das Bild. Man darf die Öffnung aber nicht beliebig klein machen.

Um die Entstehung des Bildes zu veranschaulichen, nehmen wir als Lichtquelle drei kleine Glühlampen in der durch Abb. 38 angedeuteten Lage an. Von jedem Lämpchen geht ein enges divergentes Lichtstrahlenbündel durch die Öffnung und erzeugt auf der gegenüberliegenden Wand einen Lichtfleck; dabei entspricht einem oberen Lämpchen ein Lichtfleck unten, einer Lampe auf der rechten Seite ein links gelegener Lichtfleck. Im Bilde sind also Oben und Unten und Rechts und Links vertauscht. Das Bild ist vollständig umgekehrt. Denkt man sich die Konstruktion für alle Punkte eines ausgedehnten Gegenstandes durchgeführt, so erhält man ein Bild, das aus Lichtflecken zusammengesetzt ist. Da sich die Lichtflecken zum Teil überdecken, ist das Bild unscharf. Wird die Öffnung verkleinert, so ist der eindringende Lichtkegel enger, die Lichtflecken werden kleiner, das Bild schärfer, aber lichtschwächer.

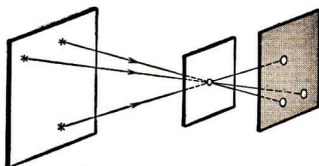


Abb. 38. Entstehung des Bildes bei der Lochkamera. (Jedes Strahlenbündel ist nur durch einen Strahl angedeutet.)

Man kann in der Lochkamera das Vorbild eines photographischen Apparates sehen.

5. Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes. Das Licht braucht zu seiner Ausbreitung Zeit, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist jedoch so groß, daß das Aufleuchten irgendeiner Lichtquelle auf der Erde aus allen Entfernungen zur gleichen Zeit wahrgenommen wird. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes zu messen, gelang zuerst (1675) dem dänischen Astronomen Olaf Römer.

Er beobachtete, daß die Umlaufzeit des 1. Jupitermondes, das ist die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsterungen, nicht konstant zu sein scheint. Ihr Wert ändert sich, wenn sich während der Messung die Entfernung zwischen Jupiter und Erde ändert. In Abb. 39 stellt der Kreis um *S* die Erdbahn um die Sonne, der kleine Kreis um *J* die Bahn des ersten

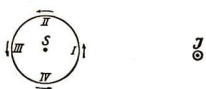


Abb. 39. Verschiedene Stellungen von Erde, Sonne und Jupiter

Trabanten um den Jupiter dar; seine Umlaufzeit ist 1,769 Tage (rund 42½ Stunden). Befindet sich die Erde in I oder III, so ergibt die Messung eines Beobachters auf der Erde für die Umlaufzeit des Jupitertrabanten einen Wert, der mit der wahren Umlaufzeit übereinstimmt. Zwar sieht der Beobachter den Eintritt der Verfinsterung nicht in dem Augenblick, in dem sie beginnt, sondern um so viel später, als das Licht Zeit braucht, um vom Jupiter bis zur Erde zu kommen; aber die Verspätung ist bei zwei aufeinander-

folgenden Verfinsterungen dieselbe, also stimmt der Zeitunterschied zwischen zwei Verfinsterungen mit der wahren Umlaufzeit überein. Wenn dagegen die Erde in II ist und sich nach III hinbewegt, so entfernt sie sich vom Jupiter, der Lichtweg nimmt also zwischen zwei Verfinsterungen ständig zu, deshalb wächst auch die Zeit, die das Licht braucht, um vom Jupiter zur Erde zu kommen. Bei der Messung der Umlaufzeit des Jupitermondes ergibt sich daher ein Wert, der außer der wahren Umlaufzeit noch die Zeit enthält, die das Licht zum Durchheilen der zwischen den beiden Verfinsterungen eingetretenen Abstandsvergrößerung zwischen Jupiter und Erde braucht. Umgekehrt wird bei IV der Wert der Umlaufzeit zu klein ausfallen, da hier eine Abstandsverringerung zwischen Erde und Jupiter eintritt. Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich dann als Quotient aus der Änderung des Abstandes und dem zugehörigen Unterschied der Zeit.

Messungen nach dieser und anderen Methoden ergaben, daß die **Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes 300 000 km/s** beträgt.

Das Licht würde also eine Strecke von der Länge des Äquators (40 000 km) in etwa $\frac{1}{3}$ Sekunde durchlaufen.

§ 12. Reflexion des Lichtes

1. Verhalten der Körper im Licht. Durchlässigkeit. Wir stellen uns ein Bündel parallelen Lichtes her (s. § 11, 3) und halten in den Lichtstrahl senkrecht zu ihm Platten aus verschiedenem Material oder bringen dünne Flüssigkeitsschichten hinein, die sich in Glasküvetten mit parallelen Wänden befinden. Wir betrachten zuerst die Lichterscheinungen auf der von der Lichtquelle abgewandten Seite. Bei einer Klarglasscheibe und einer dünnen Wasserschicht sehen wir, daß der Lichtstrahl hindurchtritt und weitergeht; seitlich vom Strahl sehen wir kein Licht. Blicken wir entgegengesetzt zur Richtung des Lichtstrahlenbündels auf die Platte, so sehen wir die Lichtquelle. Körper von der Eigenschaft der Klarglasscheibe nennen wir durchsichtig. Pergamentpapier oder Scheiben aus Trübglass lassen, wie wir feststellen, auch Licht hindurch, jedoch sehen wir kein fest umrissenes Lichtstrahlenbündel. Die Rückseite dieser Körper scheint Licht nach allen Richtungen des Raumes auszusenden; wir nennen solche Körper durchscheinend. Wir halten Pappe oder eine Metallscheibe in den Lichtstrahl, ihre Rückseite ist dunkel. Diese Körper lassen also kein Licht hindurch, sie sind undurch-

sichtig. Untersuchungen an anderen Körpern würden zeigen, daß viele Zwischenstufen zwischen durchsichtig und undurchsichtig vorkommen. Vollkommen lichtdurchlässig ist ein Körper nie, er läßt also nicht alles in ihn eintretende Licht ohne Schwächung (Absorption¹⁾) hindurch. Uns erscheint eine dünne Wasserschicht lichtdurchlässig, wir wissen aber aus Beobachtungen von Tauchern, daß in größeren Meerestiefen (etwa von 300 m Tiefe an) volle Dunkelheit herrscht. Sehr dicke Wasserschichten sind also lichtundurchlässig. Andererseits sind sehr dünne Schichten von Körpern, die wir als undurchsichtig bezeichnen, lichtdurchlässig. Es lassen sich z.B. lichtdurchlässige Goldschichten herstellen; ihre Dicke beträgt etwa 10^{-5} cm.

2. Regelmäßige Reflexion. Wir betrachten jetzt die der Lichtquelle zugekehrte Seite von Körpern, die wir schräg in das Lichtstrahlenbündel halten. Von einer ebenen Glasscheibe wird, wie wir an einem schwachen Lichtfleck an der gegenüberliegenden Wand erkennen, ein Teil des Lichtes in einer ganz bestimmten Richtung zurückgeworfen. Man nennt diese Erscheinung regelmäßige Reflexion. Der größte Teil des Lichtes geht durch die Glasplatte hindurch, die Vorderseite reflektiert nur etwa 4%. Soll ein größerer Anteil des Lichtes regelmäßig reflektiert werden, so benutzen wir zur Reflexion die bekannten Spiegel. Sie bestehen entweder aus einer ganz fein polierten ebenen Metallplatte oder aus einer Glasplatte, auf deren Rückseite eine dünne Silberschicht aufgetragen ist. Wir stellen ein paralleles Lichtbündel her und machen den Strahlengang durch Rauch sichtbar. Wir verwenden einen Spiegel mit einem darauf senkrecht stehenden dünnen Stab und lassen den einfallenden Strahl gerade den Fuß des Stabes treffen. Der Stab kennzeichnet uns das Einfallslot. Auf einer durch den einfallenden Strahl und gegen das Einfallslot gehaltenen Mattscheibe sehen wir dann auch den reflektierten Strahl. Dieser bleibt also stets in der Ebene, die durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot festgelegt ist.

Um das Verhalten des reflektierten Strahles genauer zu untersuchen, verwenden wir eine optische Scheibe (Abb. 40). Wir lassen durch eine waagerechte Spaltblende ein schmales Lichtbündel eintreten und auf der Vorderseite der Scheibe entlangstreifen. Bringen wir in der Mitte der Scheibe einen kleinen ebenen Spiegel an, dessen Ebene senkrecht zur Scheibe steht, so sehen wir auf dieser auch den gespiegelten Strahl. Durch Drehen der Blende und

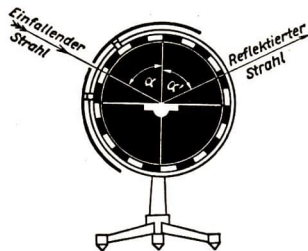


Abb. 40. Reflexion am ebenen Spiegel
(Optische Scheibe)

¹⁾ absorbere (lat.) = aufsaugen

der Scheibe können wir erreichen, daß der einfallende Strahl in der Richtung eines Radius verläuft und auf dem Spiegel senkrecht steht. Dann sehen wir nur einen einzigen mit dem Einfallslot zusammenfallenden Lichtstreifen. Drehen wir nun die Scheibe mit dem Spiegel, so trifft der einfallende Strahl schräg auf, und wir sehen dann an der Winkelteilung der Scheibe, daß der einfallende Strahl und der reflektierte Strahl stets gleiche Winkel mit dem Einfallslot bilden. Man bezeichnet diese Winkel als Einfallswinkel (α) und Reflexionswinkel (α').

Reflexionsgesetz: Fällt ein Lichtstrahl auf einen ebenen Spiegel, so wird er so reflektiert, daß

1. der zurückgeworfene Strahl in der durch den Einfallslot und das Einfallslot bestimmten Ebene liegt und
2. der Reflexionswinkel stets gleich dem Einfallswinkel ist.

3. Diffuse Reflexion. Wir kehren zu unserem Versuch in § 12, 1 zurück und halten eine Trübglasscheibe in den Lichtstrahl. Von dieser wird Licht in den gesamten Raum reflektiert, es wird zerstreut (diffus¹⁾), zurückgestrahlt; außerdem sehen wir, daß auch hier Licht in einer bestimmten Richtung reflektiert wird. Bei weißem Papier finden wir eine diffuse Rückstrahlung und nur eine ganz schwache gerichtete Rückstrahlung, bei ganz rauen weißen Oberflächen, wie z.B. einer dünnen Schicht aus Magnesiumoxyd, kann man nur diffuse, aber keine regelmäßige Reflexion nachweisen. Bei der Trübglasscheibe wird der regelmäßig reflektierte Teil des Lichtes an der Oberfläche der Scheibe zurückgeworfen. Das diffus reflektierte Licht stammt aus dem Inneren. Allgemein wird das Licht diffus zurückgestrahlt, wenn die Oberfläche nicht vollständig glatt ist, sondern viele unregelmäßig gelagerte Erhöhungen hat. Man kann sich den Vorgang etwa so verständlich machen, daß das Licht zwar an den Einzelflächen der Unebenheiten regelmäßig reflektiert wird, jedoch infolge der verschiedenen Lagen der Fläche zur Richtung des einfallenden Lichtes nun in den ganzen Halbraum geworfen wird. Beim Trübglas sind diese unregelmäßig gelagerten reflektierenden Flächen durch die Teilchen gegeben, die in dem Grundglas eingebettet sind.

4. Gerichtete und diffuse Beleuchtung. Im gerichteten Licht, z.B. im Sonnenlicht oder dem Licht, das von einer punktförmigen Lichtquelle ausgeht, geben alle undurchsichtigen Körper scharfe Schatten; der Raum hinter ihnen, von dem aus man die Lichtquelle nicht sehen kann, ist also dunkel. Wir können aber, außer in ganz wenigen schwer herzustellenden Fällen, vom Schattenraum niemals sagen, er sei völlig lichtlos, denn stets wird ihm irgendwie etwas Licht, das durch Reflexion von Körpern der Umgebung aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt ist, zugestrahlt. Wird die Sonne

1) diffus (lat.) = ausgegossen, zerstreut

von Wolken verdeckt, so wird uns aus der Lufthülle Licht zugestrahlt. Dieses Licht kommt also von vielen Seiten, ein Schatten bildet sich nicht; wir sagen, die Beleuchtung ist diffus. Bei künstlichem Licht erzielt man eine diffuse Beleuchtung durch Verwendung großflächiger Lichtquellen oder dadurch, daß man den Lichtstrom, der von der Lichtquelle, z.B. einer Glühlampe, ausgeht, nicht direkt zur Beleuchtung benutzt, sondern ihn auf eine große weiße Fläche, z.B. die Zimmerdecke, richtet und den direkt auf die Arbeitsfläche fallenden Lichtstrom abblendet. Man nennt diese Beleuchtungsart indirekte¹⁾ Beleuchtung. Bei dieser Beleuchtung sind keine scharfen Schatten vorhanden.

5. Bildentstehung beim ebenen Spiegel. Nach unseren Erfahrungen können wir in einem Spiegel ein Bild eines vor dem Spiegel befindlichen Gegenstandes sehen, und zwar scheint es hinter dem Spiegel zu stehen. Wir wollen seinen Ort durch einen Versuch bestimmen (Abb. 41). Wir stellen eine Glastafel

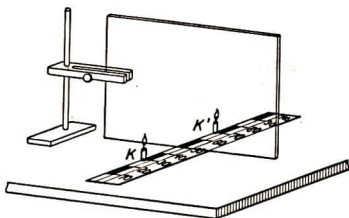


Abb. 41. Ort des Bildes im ebenen Spiegel

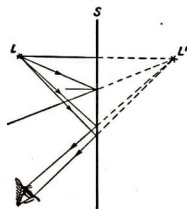


Abb. 42. Entstehung des Bildes im ebenen Spiegel

senkrecht auf den Tisch und zünden davor eine Kerze K an. Wir können dann eine ebenso hohe unangezündete Kerze K' hinter der Glasplatte so lange verschieben, bis sie die Stelle des Bildes einnimmt; dann sieht es so aus, als ob die zweite Kerze hinter der Scheibe brennt. Durch Ausmessen stellen wir fest, daß das Bild der Kerze genau so weit hinter dem Spiegel steht, wie die brennende Kerze vor dem Spiegel. Wir machen uns klar, wie die Wahrnehmung des Bildes zustande kommt. Wenn das Licht einer punktförmigen Lichtquelle unser Auge trifft, dann ist ein divergentes Strahlenbündel durch die Pupille in unser Auge gedrungen. (Über den Strahlengang im Auge vgl. § 19.) Wenn nun das Licht einer punktförmigen Lichtquelle L auf einen Spiegel fällt, so ist das reflektierte Strahlenbündel wieder divergent (Abb. 42). Das Auge wird also wieder von einem divergenten Strahlenbündel getroffen, und wir haben die Vorstellung, daß sich an der Stelle L' , von der die divergenten Strahlen herzukommen scheinen, eine punktförmige Lichtquelle befindet. In Wirklichkeit gehen von dieser Stelle keine

1) indirectus (lat.) = mittelbar

Strahlen aus. Das Bild ist also nur scheinbar oder virtuell¹⁾. Betrachten wir gemeinsam ein Spiegelbild (Versuch mit der Glasplatte und Kerze), so sehen wir alle das Bild an der gleichen Stelle. Für jeden einzelnen wird, wie

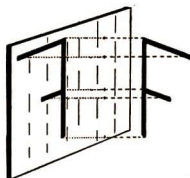


Abb. 43. Spiegelschrift

bei der unmittelbaren Beobachtung eines Gegenstandes, der Eindruck durch besondere Strahlenbündel vermittelt. Auch mit geometrischen Betrachtungen an der Abb. 42 kann man zeigen, daß das virtuelle Bild L' der Lichtquelle L genau so weit hinter dem Spiegel S zu liegen scheint, wie L vor dem Spiegel steht. Beim ebenen Spiegel entsteht von einer punktförmigen Lichtquelle L ein virtuelles Bild L' . Die auf dem Spiegel senkrecht stehende Verbindungslinie LL' wird durch die Spiegelfläche halbiert. Handelt es sich um Bilder ausgedehnter

beleuchteter Gegenstände, so gilt dies für jeden einzelnen Punkt. Das entstehende Spiegelbild liegt dann symmetrisch zum Gegenstand in bezug auf die Spiegelebene, es hat dieselbe Größe, aber Rechts und Links sind vertauscht.

Abb. 43 zeigt dies an dem Buchstaben F . Man bezeichnet die Spiegelbilder

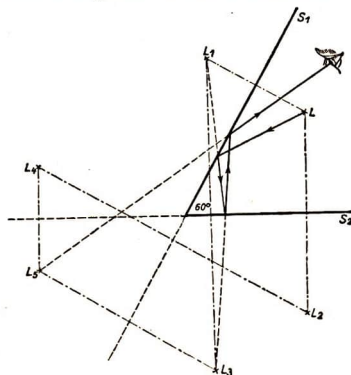


Abb. 44. Winkelspiegel

von Schriftzeichen als Spiegelschrift. Der Abdruck eines mit Tinte geschriebenen Wortes auf Löschpapier gibt dieses in „Spiegelschrift“ wieder. Betrachtet man ihn im Spiegel, so sieht man die ursprüngliche Schrift.

6. Winkelspiegel. Beobachtet man eine Kerze L in zwei gegeneinander um 60° geneigten Spiegeln S_1, S_2 (Abb. 44), so sieht man 5 virtuelle Spiegelbilder $L_1 \dots L_5$, die zusammen mit der Lichtquelle die Ecken eines Sechsecks bilden, das die Ebenen der beiden Spiegel als Symmetrieebenen besitzt. Die Abbildung zeigt den Weg des Lichtes von der Lichtquelle L bis zum Auge des Beobachters, wenn er das virtuelle Bild L_5 wahrnimmt. (An Stelle der abbildenden Strahlenbündel ist nur ein einziger Strahl gezeichnet.) Bringt man irgendwelche Gegenstände zwischen die Spiegel, so sieht man im Winkelspiegel stets symmetrische Figuren.

lenbündel ist nur ein einziger Strahl gezeichnet.) Bringt man irgendwelche Gegenstände zwischen die Spiegel, so sieht man im Winkelspiegel stets symmetrische Figuren.

7. Kaleidoskop.²⁾ Diese Tatsache ist bei der Konstruktion des Kaleidoskops verwendet. Bei ihm betrachtet man in einem Winkelspiegel (gewöhnlich sind die Spiegel unter 60° zueinander geneigt) bunte Glasstückchen, deren Lage man durch Schütteln verändern kann.

1) virtuel (franz.) = wirkungsfähig, möglich

2) kalós (griech.) = schön, eidos (griech.) = Form, skopein (griech.) = sehen

Zur Übung: Zeichne bei der gleichen Lage der Lichtquelle L wie in Abb. 44 den Verlauf der Strahlen, wenn der Beobachter eines der anderen Bilder $I_1 \dots I_4$ wahrnimmt! — 2. Wie groß muß ein an einer senkrechten Wand hängender ebener Spiegel sein, damit eine davorstehende Person sich vollständig darin sehen kann, ohne ihre Stellung zu ändern? Wie hoch muß der Spiegel angebracht sein, und wo muß die Person stehen?

§ 13. Reflexion des Lichtes an gekrümmten Spiegeln

1. Hohlspiegel (Konkavspiegel¹⁾). Versieht man die hohle Seite eines Uhrglases mit einem glatten Metallüberzug, so erhält man einen Hohlspiegel. Er bildet einen Teil einer Kugelfläche und heißt daher Kugelspiegel oder sphärischer²⁾ Spiegel. Den Mittelpunkt der dazugehörigen Kugel nennt man Krümmungsmittelpunkt M , den Mittelpunkt S des Spiegels seinen Scheitel. Die Verbindungslinie zwischen M und S heißt die optische Achse des Hohlspiegels (Abb. 45).

Den Winkel AMB nennt man die Öffnung des Hohlspiegels. Läßt man Sonnenlicht in der Richtung parallel zur Achse auf einen Hohlspiegel fallen, so werden die reflektierten Strahlen nach einem Punkt F hingelenkt, dem sog. Brennpunkt. Strahlen, die nach einem Punkt hinzielen, heißen konvergent. Untersucht man den Weg eines einzelnen Strahles CD an der optischen Scheibe, so

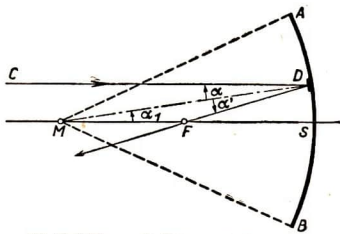


Abb. 45. Halbierung des Krümmungshalbmessers durch den Brennpunkt

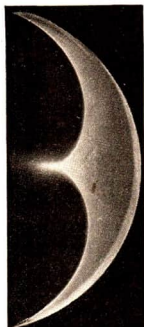
sieht man, daß er so reflektiert wird, als ob der Hohlspiegel am Einfallsort eben wäre und diese Ebene senkrecht zum Radius r stünde. Sie ist also eine Berührungs- oder Tangentialebene für die Kugel. Der Radius ist das Einfallslot. Der einfallende und der reflektierte Strahl bilden mit dem Radius gleiche Winkel. Es ist $\alpha = \alpha'$, und da auch $\alpha = \alpha_1$ ist, so ist das Dreieck $MF D$ gleichschenkelig, $FD = FM$. Liegt D nahe bei S , so ist $FD \approx FS$ und $FM \approx FS$. Stellt man eine Blende mit mehreren Öffnungen in den Gang der Lichtstrahlen, so erkennt man:

1. Ein auf der optischen Achse einfallender Strahl wird in Richtung der Achse reflektiert.
2. Alle parallel zur optischen Achse einfallenden Strahlen werden so reflektiert, daß die zurückgeworfenen Strahlen sich nahezu in einem Punkte, dem Brennpunkt, schneiden. Dieser liegt in der Mitte, zwischen Krümmungsmittelpunkt und Scheitel.

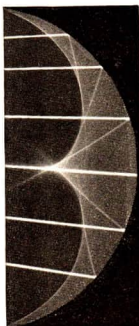
1) concavus (lat.) = hohl

2) sphaera (griech.) = Kugel

Die Entfernung des Brennpunktes F vom Scheitel S heißt Brennweite f . Es ist $f = \frac{r}{2}$, deshalb bezeichnet man die Entfernung MS auch als doppelte Brennweite. Ein Versuch zeigt uns ferner: Die Vereinigung der



a



b

Abb. 46. Katakaustik

Zusammenwirken der an der Innenfläche eines Metallzylinders gespiegelten Strahlen. Die Katakaustik wird von den reflektierten Strahlen umhüllt wie eine Kurve von ihren Tangenten.

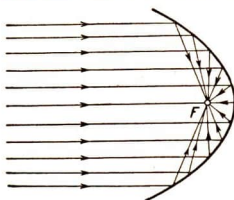


Abb. 47. Parabolspiegel

Bringen wir in den Brennpunkt eines sphärischen Hohlspiegels mit kleiner Öffnung eine punktförmige Lichtquelle, so tritt ein paralleles Strahlenbündel aus. Die Aufgabe, paralleles Licht auf einer kleinen Fläche zu konzentrieren, liegt z.B. bei der Mikroskopbeleuchtung vor. Die umgekehrte Aufgabe, aus dem Lichtstrom einer Lichtquelle mit kleiner leuchtender Fläche ein paralleles oder wenig divergentes Lichtbündel herzustellen, besteht bei den Scheinwerfern.

2. Parabolspiegel. Um Strahlenbündel parallelen Lichtes von größerem Querschnitt zu erzeugen, benutzt man Hohlspiegel, deren Flächen parabolisch gekrümmt sind. Bei einem Parabolspiegel werden alle parallel der Achse einfallenden Strahlen genau in einem Punkt F vereinigt (Abb. 47).

1) katá (griech.) = zurück; kaustikos (griech.) = brennend

3. Hohlspiegelbilder. Mit Hilfe eines Hohlspiegels kann man von Lichtquellen oder beleuchteten Gegenständen Bilder entwerfen und auf einem Schirm auffangen. Es zeigt sich, daß diese Bilder stets vollständig umgekehrt sind. Steht ein Gegenstand senkrecht zur Achse, so liegt sein Bild auch senkrecht zur Achse. Um das Zustandekommen der Bilder zu verstehen, machen wir folgende Versuche:

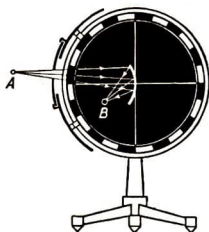


Abb. 48. Spiegelbild eines Punktes (Optische Scheibe)

Wir befestigen im Mittelpunkt einer optischen Scheibe (Abb. 48) einen zylindrisch gebogenen, den Achsenschnitt eines Hohlspiegels darstellenden Spiegelstreifen. Mit ihm zeigen wir, daß alle von einem Punkte A ausgehenden Lichtstrahlen sich nach der Reflexion am Hohlspiegel wieder in einem Punkt B vereinigen. Von den vielen von A ausgehenden und den Hohlspiegel treffenden Lichtstrahlen lassen sich die folgenden am leichtesten in ihrem Verlauf verfolgen und zeichnen (Abb. 49):

1. der **Parallelstrahl** AC : Er fällt parallel zur Achse auf den Hohlspiegel und geht nach der Zurückwerfung durch den Brennpunkt F ;
2. der **Mittelpunktstrahl** AMD : Er geht durch den Krümmungsmittelpunkt M , trifft also den Spiegel unter dem Einfallswinkel 0° und wird daher in sich selbst zurückgeworfen;
3. der **Brennstrahl** AFE : Er geht durch den Brennpunkt F und wird parallel zur Achse zurückgeworfen.

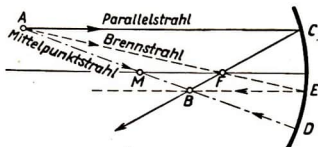


Abb. 49. Verlauf der Hauptstrahlen am Hohlspiegel

Zur zeichnerischen Ermittlung des Hohlspiegelbildes eines Punktes A genügen zwei dieser Strahlen. Soll ein Gegenstand abgebildet werden, so zeichnet man die Bilder seiner einzelnen Punkte. Es sind in Abb. 50a–c mit Hilfe von Parallel- und Mittelpunktstrahlen für einen Gegenstand, der sich a) außerhalb der doppelten Brennweite, b) im Krümmungsmittelpunkt und c) zwischen dem Brennpunkt F und dem Krümmungsmittelpunkt M befindet, die Hohlspiegelbilder gezeichnet. In all diesen Fällen schneiden sich die von jedem einzelnen Punkte ausgehenden Lichtstrahlen nach der Reflexion am Hohlspiegel wieder in einem Punkte. Es entsteht daher auch stets ein auf einem Schirm auffangbares, ein sog. wirkliches oder reelles¹⁾ Bild. Diese Bilder sind vollständig umge-

1) réel (franz.) = wirklich

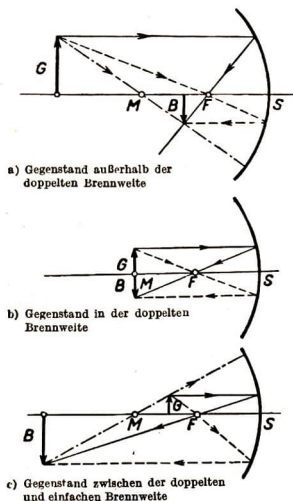


Abb. 50 a — c. Konstruktion der reellen Hohlspiegelbilder

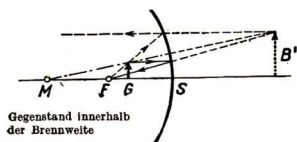


Abb. 51. Konstruktion des virtuellen Hohlspiegelbildes

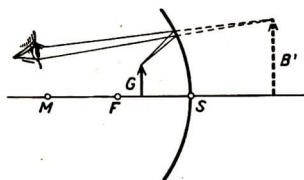


Abb. 52. Strahlenverlauf bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes eines Hohlspiegels

kehrt. Durch Versuche an einem Hohlspiegel mit einer Kerze und einem Schirm prüfen wir die Ergebnisse der Zeichnung nach. — Befindet sich, wie in Abb. 51, der Gegenstand zwischen Scheitel und Brennpunkt, so gehen die Lichtstrahlen nach der Zurückwerfung am Hohlspiegel auseinander; es schneiden sich dann nur ihre Verlängerungen hinter dem Spiegel. Wir können, wie bei einem ebenen Spiegel, das Bild zwar sehen (Abb. 52), aber nicht auf einem Schirm auffangen: es ist ein scheinbares oder virtuelles Bild. Das Bild steht aufrecht.

Die Beziehungen zwischen der Lage und Größe von Gegenstand und Bild am Hohlspiegel, die sich aus den Versuchen und Konstruktionen ergeben, sind in der Tabelle auf Seite 39 zusammengestellt.

Die Ergebnisse zeigen, daß man Bild und Gegenstände miteinander vertauschen kann. Bestimmt man für eine Reihe verschiedener Stellungen die Entfernung eines Gegenstandes vom Hohlspiegel, die Gegenstandsweite g , und die Entfernung des entsprechenden Bildes vom Spiegel, die Bildweite b , so kann man durch Versuche bestätigen, daß zwischen b , g und der Brennweite f des Hohlspiegels die folgende Gleichung gilt:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (\text{Hohlspiegelformel}).$$

Messen wir die Größe des Gegenstandes G und seines Bildes B , so ergibt sich:

Bildgröße zu Gegenstandsgröße wie Bildweite zu Gegenstandsweite ($B : G = b : g$).

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite	zwischen einfacher und doppelter Brennweite	reell	umgekehrt	verkleinert
im Krümmungsmittelpunkt	im Krümmungsmittelpunkt	reell	umgekehrt	ebenso groß wie der Gegenstand
zwischen der doppelten und einfachen Brennweite	außerhalb der doppelten Brennweite	reell	umgekehrt	vergrößert
innerhalb der einfachen Brennweite	hinter dem Spiegel	virtuell	aufrecht	vergrößert

Man kann diese Beziehungen auch aus dem Strahlengang mathematisch herleiten. Abb. 53 zeigt, für den Gegenstand QP die Konstruktion des Bildes $Q'P'$. Die Öffnung des Spiegels ist so gering angenommen, daß man bei der Betrachtung der Länge der Strahlen den Spiegel näherungsweise durch die Tangentialebene in S ersetzen kann. Es ist dann

$$\triangle FST \sim \triangle FQP, \text{ also } \frac{B}{G} = \frac{f}{g-f} \quad (1)$$

$$\triangle FQ'P' \sim \triangle FSR, \text{ also } \frac{B}{G} = \frac{b-f}{f}. \quad (2)$$

Demnach ist $\frac{f}{g-f} = \frac{b-f}{f}$

$$bf + gf = bg$$

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

Aus (2) folgt $\frac{B}{G} = \frac{b}{f} - 1$

und aus (3) $\frac{b}{f} = \frac{b}{g} + 1,$

also $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}.$

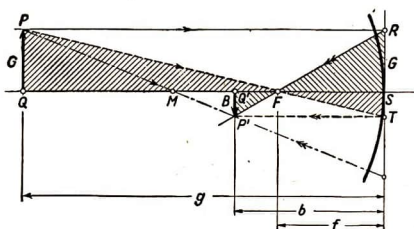


Abb. 53. Herleitung der Hohlspiegelformel

Übung: Was geschieht, wenn der Gegenstand im Brennpunkt liegt? Wie verlaufen dann Mittelpunkts- und Brennstrahl?

4. Konvexspiegel. Kugelspiegel, deren Außenfläche spiegelt, heißen **Konvexspiegel**¹⁾. Wir benutzen die gleichen Bezeichnungen (Krümmungsmittelpunkt, Scheitel usw.) wie beim Hohlspiegel. Lassen wir auf einen Konvex-

1) convexus (lat.) = gewölbt

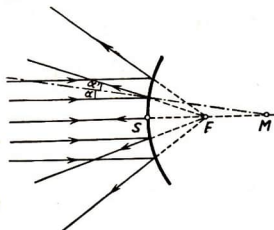


Abb. 54. Reflexion paralleler Strahlen am Konvexspiegel

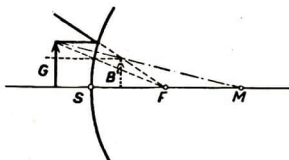


Abb. 55. Bildkonstruktion beim Konvexspiegel

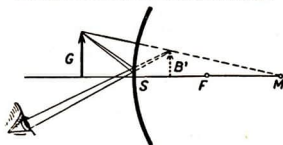


Abb. 56. Strahlengang bei der Wahrnehmung eines virtuellen Bildes in einem Konvexspiegel

spiegel parallele Lichtstrahlen fallen, so beobachten wir, daß die reflektierten Strahlen auseinanderlaufen. Sie scheinen von einem Punkt F (Abb. 54), dem Zerstreuungspunkt, herzukommen. F liegt hinter dem Spiegel und halbiert den Krümmungshalbmesser MS . Man bezeichnet F auch als negativen Brennpunkt und die nach ihm hinzielenden Strahlen als Brennstrahlen. Für den Verlauf der Strahlen gelten dann die entsprechenden Gesetze wie für den Hohlspiegel (vgl. S. 37).

Durch Versuche und Zeichnungen (Abb. 55), die denen beim Hohlspiegel entsprechen, finden wir:

Von einem vor dem Konvexspiegel befindlichen Gegenstande entsteht stets ein virtuelles, aufrechtes und verkleinertes Bild hinter dem Spiegel. Wenn der Gegenstand dicht vor dem Spiegel steht, ist sein Bild fast ebenso groß wie der Gegenstand.

Abb. 56 zeigt den Strahlengang bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes.

Übung: Warum verwendet man Konvexspiegel als Rückspiegel am Auto?

§ 14. Die Brechung des Lichtes

1. Brechungszahl. Wir füllen Wasser in einen Glastrog, lassen einen Lichtstrahl schräg auf die Wasseroberfläche fallen und trüben das Wasser durch Fluoreszin, damit wir den Weg des Lichtstrahls verfolgen können. Dann sehen wir bei Verdunklung des Zimmers, daß der Strahl beim Übergang von Luft in Wasser seine Richtung ändert. Diese Erscheinung heißt Brechung des Lichtes. Zur genaueren Beobachtung bringen wir auf der Innenseite der Hinterwand des Glasgefäßes eine weiße Scheibe an, auf die ein Kreis gezeichnet ist (Abb. 57), und füllen in das Gefäß Wasser bis zum Durchmesser des Kreises JK . Dann steht der auf JK senkrechte Durchmesser LR auch auf der Wasseroberfläche senkrecht und bildet zugleich das Einfallslot für den im Kreismittelpunkt M schräg auf die Wasseroberfläche auftreffenden Licht-

strahl EAM . Dieser spaltet sich in M in zwei Strahlen: der eine wird in der Richtung MS zurückgeworfen, der andere tritt in das Wasser ein und verläuft nicht in seiner bisherigen Richtung weiter, sondern wird in der Richtung MB zum Einfallslot LMR hin abgelenkt.

Verändern wir die Richtung des einfallenden Strahles, so ändert auch der in das Wasser eindringende Lichtstrahl seine Richtung. Fällt er senkrecht auf die Grenzfläche, so wird er nicht abgelenkt. Der einfallende Strahl bildet mit dem Einfallslot den Einfallswinkel α . Man nennt den in das Wasser eindringenden Strahl den gebrochenen Strahl; der Winkel, den er mit dem Einfallslot bildet, ist der Brechungswinkel β (Abb. 57 und 58). Wir beobachten ferner, daß der reflektierte und der gebrochene Strahl in der durch das Einfallslot und den einfallenden Strahl bestimmten Ebene liegen. Auch beim Übergang eines Lichtstrahles von Luft in Glas tritt eine Brechung ein. Man kann dies an der optischen Scheibe nach Abb. 59 zeigen, wenn man in der Mitte der Scheibe einen Glaskörper von der Form eines Halbzylinders befestigt. Wir erhalten folgende Gesetzmäßigkeiten:

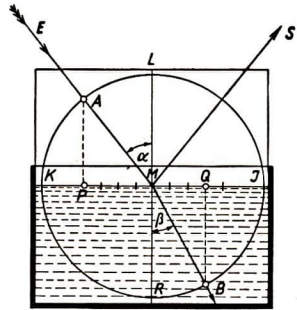


Abb. 57. Brechung und Reflexion eines Lichtstrahles an der Wasseroberfläche

1. Der einfallende Strahl, das Einfallslot und der gebrochene Strahl liegen in einer Ebene.
2. Treten Lichtstrahlen aus der Luft in einen anderen durchsichtigen Körper (optisches Mittel) ein, so werden sie von ihrer ursprünglichen Richtung zum Einfallslot hin abgelenkt, und zwar um so mehr, je größer ihr Einfallswinkel ist.

Wir wollen die Richtungsänderung des Lichtstrahles bei seinem Übertritt von Luft in Wasser genauer untersuchen; dazu gehen wir von dem in Abb. 57 dargestellten Versuch aus. Der Kreis um M wird von dem in M auf die Wasseroberfläche auffallenden Lichtstrahl in A , von dem zugehörigen gebrochenen Strahl in B geschnitten. Messen wir die Länge der Strecke MP und MQ , die durch die Fußpunkte P und Q der Lote von A und B auf die Wasseroberfläche bestimmt sind, für möglichst viele Werte des Einfallswinkels α und des zugehörigen Brechungswinkels

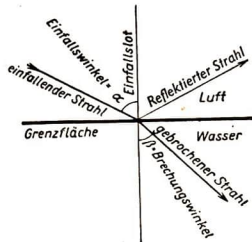


Abb. 58. Einfallswinkel und Brechungswinkel

winkels β , so finden wir, daß das Verhältnis $MP : MG$ stets denselben Wert $\frac{4}{3}$ besitzt. Diese Größe nennen wir die Brechungszahl des Wassers. Führen wir die entsprechenden Messungen für den Übergang des Lichtes von Luft in Glas aus, so ergibt sich, daß der Wert der Brechungszahl von Glas $\frac{3}{2}$ beträgt.

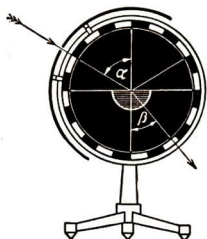


Abb. 59. Brechung des Lichtes beim Übergang von Luft in Glas

Die Brechungszahl n eines optischen Mittels ist von der Beschaffenheit des brechenden Stoffes abhängig; vom Einfallswinkel ist sie unabhängig.

Da $MA = MB$ ist, kann n durch

$$\frac{MP/MA}{MQ/MB} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \text{ angegeben werden.}$$

Die Brechungszahl eines optischen Mittels ist gleich dem Verhältnis des Sinus des Einfallswinkels zu dem Sinus des Brechungswinkels.

Das Brechungsgesetz ist von Snellius (1618) gefunden worden.

Die Brechungszahl für den Übergang des Lichtes vom Vakuum in einen Stoff bezeichnet man als absolute Brechungszahl dieses Mediums. Für Luft ist die absolute Brechungszahl wenig von 1 verschieden, so daß die auf das Vakuum bezogenen Brechungszahlen von festen Körpern und Flüssigkeiten mit großer Annäherung auch für den Übergang des Lichtes aus der Luft in das Medium gelten.

Wird ein Strahl wie beim Übergang von einem Medium in ein anderes zum Einfallslot hin gebrochen, so nennt man das zweite Medium optisch dichter als das erste. Wird der Strahl vom Einfallslot fort gebrochen, dann nennt man das zweite Medium optisch dünner.

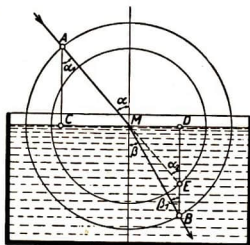


Abb. 60
Konstruktion des gebrochenen Strahles für das Brechungsverhältnis $n = 4 : 3$

Konstruktion des gebrochenen Strahles. Es sei (Abb. 60) AM ein aus Luft in Wasser einfallender Strahl. Die Brechungszahl ist $n = 4 : 3$. Man beschreibe um M zwei Kreise mit den Radien 4 cm und 3 cm und verlängere den einfallenden Strahl bis zum Schnitt mit dem kleinen Kreise in E . Durch E ziehe man die Parallele zum Einfallslot. Sie schneidet den großen Kreis in B . Dann ist MB der gebrochene Strahl.

Beweis: Die Projektionen der Strahlen AM und MB auf die Trennungsfläche sind MC und MD . Es ist $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$, $\triangle ACM \sim \triangle EDM$, also $MC : MD = MA : ME = 4 : 3$.

$$\sin \alpha_1 = \frac{MC}{MA}, \quad \sin \beta_1 = \frac{MD}{MB}, \quad \text{also} \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{MO}{MD}, \quad \text{da} \quad MA = MB \text{ ist.}$$

Es ist $\alpha_1 = \alpha$ und $\beta_1 = \beta$, demnach ergibt sich schließlich:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{4}{3}.$$

(Dieses Ergebnis erhält man unmittelbar, wenn man auf das $\triangle MEB$ den Sinussatz anwendet.)

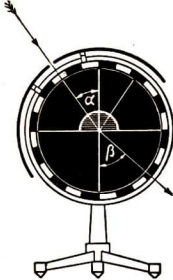


Abb. 61. Brechung des Lichtes beim Übergang von Glas in Luft

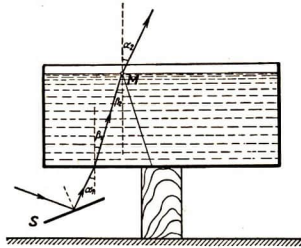


Abb. 62. Brechung des Lichtes beim Übergang vom Wasser in Luft

2. Totale Reflexion. Während wir bisher das Licht stets aus der Luft in ein optisch dichteres Mittel übergehen ließen, wollen wir nunmehr umgekehrt den Übergang des Lichtes aus dem optisch dichteren Mittel in Luft untersuchen. Wir können diesen Versuch für Glas mit der optischen Scheibe (Abb. 61) und für Wasser mit Hilfe einer gläsernen Wanne und eines Spiegels S (Abb. 62) ausführen. Wir finden, daß sich an unseren bisherigen Ergebnissen nur folgendes ändert: Der einfallende und der gebrochene Lichtstrahl sind vertauscht, also auch Einfallswinkel und Brechungswinkel. An der Stelle M ist der Brechungswinkel α_2 stets größer als der Einfallswinkel β_2 . Vergrößert man den Einfallswinkel, so wächst gleichzeitig der Brechungswinkel, und er erreicht einen Wert von 90° , wenn der Einfallswinkel noch spitz ist. Der gebrochene Lichtstrahl streift dann an der Wasseroberfläche entlang (Abb. 63). Lassen wir den Einfallswinkel über diesen Grenzwinkel hinaus wachsen,

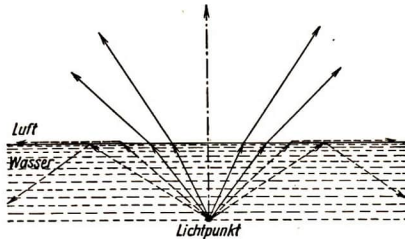


Abb. 63. Brechung und totale Reflexion an einer Wasseroberfläche. (Der an der Wasseroberfläche reflektierte Anteil des Strahles ist nur für den Fall der totalen Reflexion eingezeichnet.)

Lassen wir den Einfallswinkel über diesen Grenzwinkel hinaus wachsen,

so wird der Lichtstrahl an der Wasseroberfläche nicht mehr gebrochen, sondern er wird an ihr vollständig in das Wasser zurückgeworfen. Wir nennen diesen Vorgang totale¹⁾ Reflexion. Der kleinste Einfallswinkel, bei dem sie eintritt, zu dem also der Brechungswinkel 90° gehört, heißt Grenzwinkel der totalen Reflexion; er hat für den Übergang von Wasser in Luft den Wert $48,5^\circ$, für den Übergang von Glas in Luft den Wert 42° .

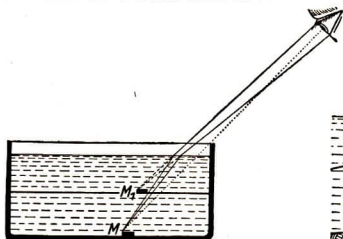


Abb. 64. Scheinbare Hebung und Näherung einer Münze im Wasser

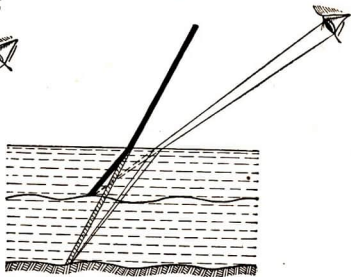


Abb. 65. Scheinbare Knickung eines Stabes beim Eintauchen in Wasser

Treten Lichtstrahlen aus einem optisch dichteren Mittel in ein optisch dünneres über, so werden sie, sobald der Einfallswinkel den Grenzwinkel erreicht hat und größer wird als dieser, an der Grenzfläche nicht mehr gebrochen, sondern total reflektiert.

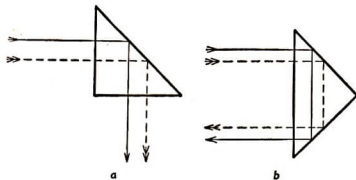


Abb. 66. Totalreflexion
a an der Hypotenusenfläche, b an den Kathetenflächen
eines totalreflektierenden Prismas

Wir machen noch folgende Versuche:

Wir legen auf den Boden eines undurchsichtigen Gefäßes eine Münze und stellen uns so auf, daß sie für das Auge durch den oberen Rand des Gefäßes gerade noch verdeckt wird. Sie wird wieder sichtbar, wenn Wasser in das Gefäß gegossen wird. Der Punkt M erscheint in M_1 . Die Erklärung ist aus Abb. 64 zu entnehmen. Abb. 65 zeigt die scheinbare Knickung eines eingetauchten Stabes.

Wir drücken den Finger fest auf das Rohr eines Glasrichters und tauchen ihn mit nach unten gekehrter Öffnung in eine mit

Wasser gefüllte Glaswanne. Der Kegelmantel, der die Grenze zwischen Luft und Glas bildet, erscheint infolge der totalen Reflexion silberglänzend. Entfernt man den Finger, so dringt Wasser in den Trichter, und die Erscheinung verschwindet.

Die totale Reflexion wird ausgenutzt, um mit dem sog. totalreflektierenden Prisma einen Lichtstrahl um 90° (Abb. 66a) oder um 180° (Abb. 66b) zu knicken. Das totalreflektierende Prisma ist ein gerades Glasprisma, dessen Grundfläche ein rechtwinkliges gleichschenkeliges Dreieck ist.

1) total (franz.) = ganz

3. Lichtdurchgang durch planparallele Platten. Eine Platte, die von zwei parallelen Ebenen begrenzt wird, heißt eine planparallele¹⁾ Platte (Beispiele für durchsichtige planparallele Platten: Glasplatte, Wasserwanne mit durchsichtigen Seitenwänden). Wir betrachten den Durchgang eines Lichtstrahls durch eine solche Glasplatte an Hand der Abb. 67. Der Lichtstrahl LA fällt aus der Luft unter dem Einfallswinkel α_1 auf die vordere Begrenzungsebene; er wird im Glase unter dem Brechungswinkel β_1 zum Einfallslot hin gebrochen. Der im Glase verlaufende Strahl trifft in B unter dem Einfallswinkel β_2 die zweite Begrenzungsebene und tritt dort unter dem Brechungswinkel α_2 in Richtung BL_1 in Luft über. Wegen der Parallelität der Begrenzungsebenen ist $\beta_1 = \beta_2$ und, weil sich der Lichtweg umkehren läßt, ist $\alpha_2 = \alpha_1$. Hieraus folgt, daß BL_1 parallel LA ist. (Vgl. auch Abb. 62.)

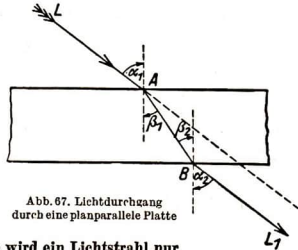


Abb. 67. Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte

Beim Durchgange durch eine planparallele Platte wird ein Lichtstrahl nur seitlich verschoben; seine Richtung ist hinter der Platte dieselbe wie vor ihr.

Die Verschiebung ist um so größer, je dicker die Glasplatte und je größer der Einfallswinkel ist. Wenn dieser 0° beträgt, geht der Lichtstrahl ungebrochen durch die Platte.

4. Lichtdurchgang durch Prismen. Wenn die beiden Begrenzungsebenen des durchsichtigen Körpers, durch den wir einen Lichtstrahl hindurchgehen lassen, nicht parallel sind, sondern miteinander einen Winkel einschließen, so nennen wir diesen Körper ein optisches Prisma²⁾. Die beiden Seitenflächen, durch die das Licht ein- und austritt (in Abb. 68 die Flächen $ABCD$ und $ABEF$), heißen die brechenden Flächen, ihre Schnittkante AB die brechende Kante, und der Winkel ε , den sie miteinander bilden, heißt der brechende Winkel. Wir befestigen ein gläsernes Prisma auf der optischen Scheibe, so daß der Scheitel des brechenden Winkels mit dem Mittelpunkt der Scheibe zusammenfällt, und untersuchen den Strahlengang. Abb. 69 stellt einen sog. Hauptschnitt durch das Prisma dar; er wird senkrecht zur brechenden Kante geführt; diese steht also im Scheitelpunkt von ε auf der Zeichenebene senkrecht. AB ist ein im Hauptschnitt verlaufender Lichtstrahl eines Bündels parallelen, einfarbigen Lichtes (vgl. § 16). Beim Eintritt aus Luft in das Prisma wird er zum Einfallslot hin gebrochen; er geht dann im Prisma geradlinig weiter, bis er die zweite brechende Fläche trifft; hier wird er vom Einfallslot

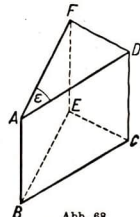


Abb. 68
Optisches Prisma

1) plānus (lat.) = eben

2) prisma (griech.) = das Abgesägte

fort gebrochen. CD ist der aus dem Prisma in die Luft austretende Strahl. Bei jeder Brechung erfährt der Strahl eine Richtungsänderung, eine Ablenkung. Die Gesamtablenkung wird gemessen durch den Winkel δ , den die Verlängerung des eintretenden Lichtstrahles mit der rückwärtigen

Verlängerung des austretenden Lichtstrahles bildet. Der Winkel δ wächst mit dem Winkel ε . Ein von dem austretenden Lichtstrahl CD getroffenes Auge verlegt den Ausgangspunkt des zweimal gebrochenen Lichtstrahles AB in die Rückwärtsverlängerung des Lichtstrahles CD .

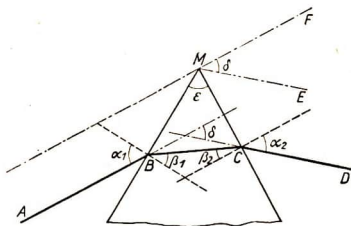


Abb. 69. Strahlengang im Prisma

Beim Durchgang durch das Prisma wird ein Lichtstrahl stets von der brechenden Kante fort, also nach dem breiteren Ende hin, gebrochen.

Um die Gesamtablenkung messen zu können, verschiebt man die Blende

an der optischen Scheibe, bis ein Teil des parallel zu AB einfallenden Lichtes gerade an M vorbeistreift und die Spur MF an der Scheibe hinterläßt, ein anderer Teil durch das Prisma abgelenkt wird und in der Richtung ME verläuft. Der Winkel EMF gibt dann die Gesamtablenkung δ . Sie wird an der Gradeinteilung der Scheibe abgelesen. Durch Drehen der Scheibe kann man den Einfallswinkel und damit auch die Gesamtablenkung verändern. Geht man von kleinen Einfallswinkeln stetig zu größeren über, so wird die Gesamtablenkung zunächst kleiner und dann wieder größer. Sie erreicht bei einer bestimmten Lage einen geringsten Betrag. Man bezeichnet ihn als das Minimum der Ablenkung. Für den Fall des Minimums der Ablenkung

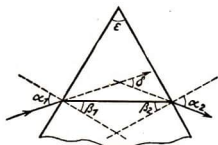


Abb. 70. Minimum der Ablenkung bei symmetrischem Strahlengang

schneidet die Lichtspur im Innern des Prismas (Abb. 70) gerade ein gleichschenkliges Dreieck ab.

Das Minimum der Ablenkung tritt bei symmetrischem Durchgang des Lichtes ein.

Man kann die Gesamtablenkung und das Minimum der Ablenkung auch berechnen. Es ist (Abb. 69)

$$\beta_1 + \beta_2 = \varepsilon \quad \text{und} \quad \delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varepsilon.$$

Beim symmetrischen Strahlenverlauf in einem Glasprisma ($n = 1,5$) mit dem brechenden Winkel $\varepsilon = 60^\circ$ ergibt sich dann, da $\sin \alpha_1 = n \cdot \sin \beta_1$ ist, $\alpha_1 = 48,6^\circ$ und schließlich $\delta = 37,2^\circ$.

5. Die atmosphärische Strahlenbrechung. Ein von der Sonne oder einem Sterne (Abb. 71) ausgehender Lichtstrahl, der schräg zur Erdoberfläche auftrifft, muß, bevor er zur Erde gelangt, auf weite Strecken die Atmosphäre durchdringen. Auf seinem Wege durchläuft er dabei Luftschichten von zunehmender Dichte. Er wird dabei zum Einfallslot hin gebrochen; daher ist seine Bahn innerhalb der Atmosphäre eine schwach gekrümmte Linie. Da unser Auge eine Lichtquelle in der Rückwärtsverlängerung des das Auge treffenden Lichtstrahlbündels sucht, so erscheint dem Beobachter die Sonne oder der Stern nicht in S , sondern in S' , also höher, als er in Wirklichkeit steht.

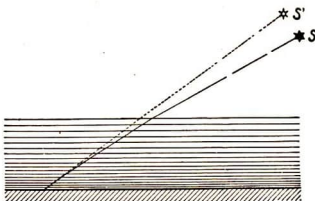


Abb. 71. Atmosphärische Strahlenbrechung

Diese scheinbare Hebung des beobachteten Gestirns heißt atmosphärische Strahlenbrechung. Da die Dicke der durchsetzten Luftschicht um so größer wird, je tiefer das Gestirn am Himmel steht, nimmt die atmosphärische Strahlenbrechung beim Sinken des Gestirns zu. Wir sehen noch Gestirne, die in Wirklichkeit schon unter dem Horizont verschwunden sind. In dem Augenblick, in dem abends der untere Sonnenrand den Horizont zu berühren scheint, steht in Wirklichkeit schon der obere Sonnenrand etwas unter dem Horizont.

6. Flimmern. Warme Luft ist optisch dünner als kalte. Daher werden Lichtstrahlen, die in erwärmte Luftschichten gelangen, wie sie sich z. B. über Schornsteinen, über einer von der Sonne bestrahlten Sandfläche oder vor dem offenen Fenster eines warmen Zimmers im Winter bilden können, gebrochen und von ihrer Richtung abgelenkt. Weil die aufsteigenden Luftströme dabei ihre Form und Lage ändern, erscheinen die hinter ihnen liegenden Gegenstände in zitternder Bewegung. Auch das Flimmern der Fixsterne beruht auf der durch die verschiedenen Dichte der Luftschichten verursachten Brechung der Lichtstrahlen. Solche Erscheinungen, die uns Ungleichmäßigkeiten der Brechzahl anzeigen, heißen Schlieren.

Zur Übung: 1. Bestimme durch Zeichnung und Rechnung den Verlauf eines Lichtstrahles durch ein Flintglasprisma ($n = 1,7$; $\varepsilon = 60^\circ$) für den Einfallswinkel $\alpha = 30^\circ$! Wie groß ist die Totalablenkung? — 2. Kann man durch einen mit Wasser gefüllten quaderförmigen Glastrog über Eck hindurchsehen? — 3. Wie groß ist das Minimum der Ablenkung für ein Kronglasprisma ($n = 1,5$), wenn der brechende Winkel $\varepsilon = 45^\circ$ beträgt?

§ 15. Linsen und Linsenbilder

1. Einteilung der Linsen. Durchsichtige Körper, die von zwei Kugelflächen begrenzt werden, heißen Linsen (Abb. 72). Die Mittelpunkte der dazugehörigen Kugeln nennt man die Krümmungsmittelpunkte, ihre Halbmesser die Krümmungshalbmesser, die Verbindungslinie der Krümmungsmittelpunkte die Hauptachse der Linse. Der auf ihr liegende Mittelpunkt

des Linsenkörpers heißt optischer Mittelpunkt. An die Stelle der einen Kugelhaube kann als Begrenzungsfläche auch eine Ebene treten. Linsen, die in der Mitte dicker sind als am Rande, heißen **konvexe Linsen**, die in der

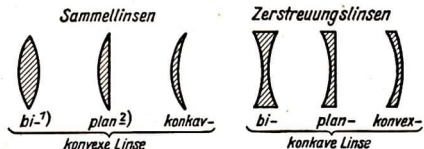


Abb. 72. Einteilung der Linsen

Mitte dünner sind als am Rande, **konkave Linsen**. Bei jeder dieser beiden Linsengruppen haben wir drei verschiedene Arten zu unterscheiden, deren Form und Bezeichnungen sich aus Abb. 72 ergeben.

2. Konvexlinsen (Sammellinsen). Lassen wir Sonnenlicht oder anderes paralleles Licht auf eine Konvexlinse parallel zur Achse fallen (Abb. 73), so sehen wir in raucherfüllter Luft, wie die vorher parallelen Strahlen nach dem Durch-

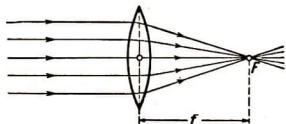


Abb. 73. Sammelwirkung einer Konvexlinse

gange durch die Linse nahezu in einem Punkte, dem **Brennpunkt F** , vereinigt („gesammelt“) werden. Paralleles Licht kann also durch eine Konvexlinse in konvergentes Licht verwandelt werden. Wegen dieser Eigenschaft heißt eine Konvexlinse auch **Sammellinse**. Die Entfernung

des Brennpunktes vom optischen Mittelpunkt heißt die **Brennweite (f)** der Linse. Kehren wir die Linse um, so daß die Sonnenstrahlen nunmehr zuerst auf die andere Begrenzungsfläche auftreffen, so erkennen wir, daß

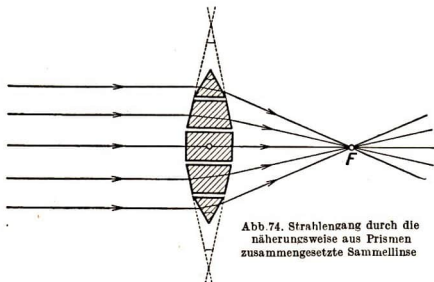


Abb. 74. Strahlengang durch die näherungsweise aus Prismen zusammengesetzte Sammellinse

die Linse einen weiteren Brennpunkt besitzt und die Brennweiten für beide Seiten gleich groß sind. Diese Beobachtungen können wir durch folgende Überlegung erklären. Wir denken uns die Linse näherungsweise aus Prismenstücken zusammengesetzt (Abb. 74). Die brechen-

den Winkel werden nach dem Rande zu immer größer. Das Mittelstück ist dann als kleine planparallele Platte aufzufassen, zu der die Prismen paarweise symmetrisch ange-

1) bis (lat.) = zweimal, doppelt

2) plānus (lat.) = eben

ordnet sind. Nun lenkt jedes Prisma die z. B. von links einfallenden Lichtstrahlen von den brechenden Kanten fort, und zwar die äußeren Strahlen mehr als die inneren, so daß also die oberen Strahlen nach unten und die unteren Strahlen nach oben hin gebrochen werden.

Bringen wir in Umkehrung des oben beschriebenen Versuches eine punktförmige Lichtquelle in den Brennpunkt einer Sammellinse, so werden die Strahlen durch diese so gebrochen, daß sie nach dem Austritt aus der Linse achsenparallel verlaufen (Abb. 75).

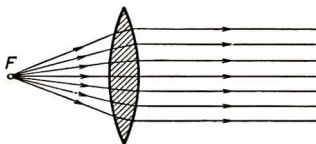


Abb. 75
Lichtquelle im Brennpunkt einer Sammellinse

3. Durch Konvexlinsen erzeugte Bilder. Durch Versuche überzeugen wir uns, daß wir mit Hilfe von Sammellinsen Bilder von Lichtquellen und beleuchteten Gegenständen entwerfen und auf einem Schirm auffangen können. Diese Bilder sind in jedem Falle vollständig umgekehrt, d. h. es sind Rechts und Links sowie Oben und Unten vertauscht. Steht der Gegenstand senkrecht zur Achse, so gilt dasselbe auch für das Bild.

Wir zeigen mit einer punktförmigen Lichtquelle, einer Linse und einem Schirm oder an der optischen Scheibe ähnlich wie beim Hohlspiegel, daß alle von einem Punkt ausgehenden Lichtstrahlen sich nach dem Durchgang durch die Linse nahezu wieder in einem Punkte vereinigen. Je dünner die Linse ist, um so besser ist die punktförmige Vereinigung. Wir wollen uns deshalb auf dünne Sammellinsen beschränken (in den Abbildungen sind die Linsen viel dicker gezeichnet, als sie sein dürften).

Von den vielen von jedem Punkte eines Gegenstandes ausgehenden, die Linse durchsetzenden Lichtstrahlen lassen sich wie beim Hohlspiegel die folgenden am leichtesten in ihrem Verlauf verfolgen und zeichnerisch darstellen (Abb. 76):

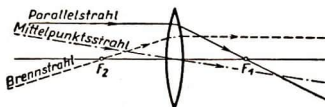


Abb. 76. Hauptstrahlen bei einer Sammellinse

1. der **Parallelstrahl**: Er verläuft vor der Linse parallel zur Achse und hinter der Linse durch den jenseitigen Brennpunkt;

2. der **Brennpunktstrahl**: Er geht durch den vor der Linse liegenden Brennpunkt und verläßt die Linse parallel zur Achse;

3. der **Mittelpunktstrahl**: Er geht geradlinig durch den optischen Mittelpunkt der Linse, da für ihn die Linse wie eine sehr dünne, planparallele Platte wirkt.

Zur zeichnerischen Ermittlung des zu einem Gegenstand gehörigen Linsenbildes genügen für jeden Punkt zwei dieser Strahlen, der dritte dient zur Kontrolle. So sind in Abb. 77 mit Hilfe des Parallel- und des Mittelpunktstrahles Linsenbilder B

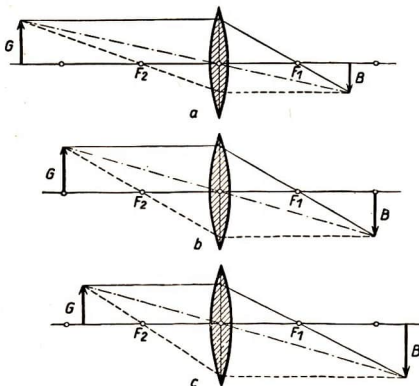


Abb. 77. Konstruktion der Linsenbilder

- a) Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite
- b) Gegenstand in der doppelten Brennweite
- c) Gegenstand zwischen der doppelten und einfachen Brennweite

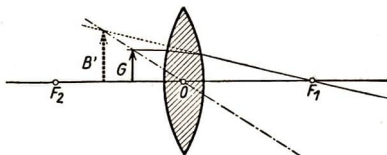


Abb. 78. Konstruktion des virtuellen Bildes bei einer Sammellinse
Gegenstand innerhalb der Brennweite

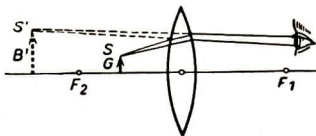


Abb. 79. Strahlengang bei der Wahrnehmung
des virtuellen Bildes einer Sammellinse

strahles Linsenbilder B gezeichnet für einen Gegenstand G , der sich in Lage a) außerhalb der doppelten Brennweite, in Lage b) in der doppelten Brennweite und in Lage c) zwischen doppelter und einfacher Brennweite befindet. Alle diese Bilder sind reell. Abb. 78 zeigt den Strahlengang für den Fall, daß der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite liegt. Es entsteht kein reelles, sondern nur ein virtuelles Bild B' . Wir können es sehen, aber nicht auf einem Schirm auffangen. Das Bild ist in diesem Fall aufrecht und vergrößert und liegt auf der gleichen Seite der Linse wie der Gegenstand. Abb. 79 zeigt den Strahlengang bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes. Rückt der Gegenstand in den Brennpunkt, so werden die Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch die Linse parallel; wir erhalten daher kein Bild. Die Versuche und Konstruktionen ergeben folgende Beziehungen zwischen der Lage und Größe von Gegenstand und Bild bei einer Sammellinse:

Übersicht über die Bilder der Konvexlinsen

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite	auf der anderen Seite der Linse zwischen einfacher und doppelter Brennweite	reell	umgekehrt	verkleinert
in der doppelten Brennweite	auf der anderen Seite der Linse ebenfalls in der doppelten Brennweite	reell	umgekehrt	ebenso groß wie der Gegenstand
zwischen der doppelten und einfachen Brennweite	auf der anderen Seite der Linse außerhalb der doppelten Brennweite	reell	umgekehrt	vergrößert
innerhalb der einfachen Brennweite	auf derselben Seite der Linse	virtuell	aufrecht	vergrößert

4. Linsenformel. Ähnlich wie beim Hohlspiegel bezeichnen wir Gegenstands- und Bildgröße mit G und B , die Entfernung des Gegenstandes von der Linse, die Gegenstandsweite, mit g , die Entfernung des Bildes von der Linse, die Bildweite, mit b und die Brennweite mit f (Abb. 80). Durch Versuche stellen wir fest, daß diese Größen durch dieselbe Formel wie beim Hohlspiegel verbunden sind. Wir können die **Linsenformel** auch mit Hilfe des

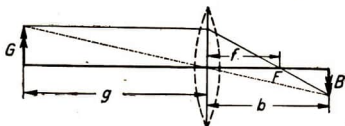


Abb. 80. Herleitung der Linsenformel

Strahlensatzes ableiten (Abb. 80). Es ist $\frac{G}{B} = \frac{g}{b}$, in Worten: Die Bildgröße verhält sich zur Gegenstandsgröße wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Weiter ist
$$\frac{G}{B} = \frac{f}{b-f},$$

folglich $gb - gf = bf$ und $bf + gf = gb$,

also
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \text{ (Linsenformel — vgl. § 13).}$$

5. Konkavlinsen (Zerstreuungslinsen) werden von zwei Kugelflächen begrenzt, die ihre hohle Seite nach außen kehren (s. Abb. 72). Wir denken sie uns, wie die Sammellinsen, aus kleinen Prismen zusammengesetzt, deren brechende Kanten sämtlich zur Linsenachse hin liegen (Abb. 81). Alle in Richtung der Achse auffallenden Strahlen werden von dieser fort gebrochen; sie laufen aus-

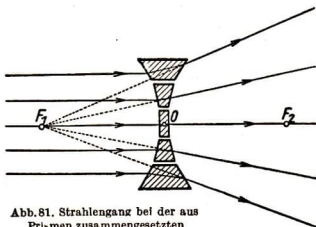


Abb. 81. Strahlengang bei der aus Prismen zusammengesetzten Zerstreuungslinse

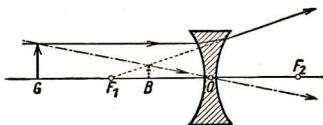


Abb. 82. Konstruktion des virtuellen Bildes bei einer Zerstreuungslinse

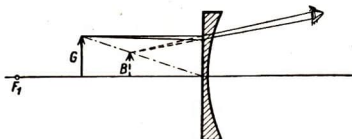


Abb. 83. Strahlengang bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes einer Zerstreuungslinse

einander, sie werden „zerstreut“. Versuche an der optischen Scheiße zeigen, daß ihre rückwärtigen Verlängerungen alle durch einen Punkt F_1 der Hauptachse gehen, der auf derselben Seite liegt wie die ankommenden parallelen Lichtstrahlen. Er heißt der scheinbare Brennpunkt oder auch der Zerstreuungspunkt der Linse. Jede Zerstreuungslinse besitzt zwei Zerstreuungspunkte, die auf der optischen Achse liegen und gleiche Abstände von der Linse haben. Entsprechende Versuche und Überlegungen, wie wir sie bei den Sammellinsen angestellt haben, führen hier zu folgendem Ergebnis (Abb. 82):

Eine Zerstreuungslinse liefert nur virtuelle Bilder. Diese liegen auf derselben Seite der Linse wie die Gegenstände. Sie sind verkleinert und stehen aufrecht.

Abb. 83 zeigt den Strahlengang bei der Wahrnehmung des virtuellen Bildes einer Zerstreuungslinse.

§ 16. Die Zerlegung des Lichtes

1. Das Spektrum. Wir beleuchten in einem verdunkelten Zimmer einen schmalen Spalt S durch eine starke Lichtquelle und entwerfen mit Hilfe einer Sammellinse L ein Bild S' des Spaltes auf einem weißen Schirm. Bringen wir dann in den Strahlengang hinter die Linse ein Glasprisma P , dessen brechende Kante dem Spalt parallel ist (Abb. 84), so werden die Strahlen beim Durchgang durch das Prisma nicht nur von der brechenden Kante fort abgelenkt, sondern gleichzeitig fächerartig auseinandergebreitet („zerstreut“). Dabei zeigt sich auf dem Schirm ein breites Farbenband, dessen am stärksten abgelenktes Ende violett, dessen am wenigsten abgelenktes Ende rot gefärbt

ist. Zwischen Rot und Violett liegen sehr viele Farben. Sie lassen sich nicht scharf voneinander trennen, sondern gehen allmählich ineinander über. Man nennt sie **Spektralfarben** und beschränkt sich beim Aufzählen gewöhnlich auf die sieben Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett. Den Vorgang selbst bezeichnet man als **Zerlegung** des weißen Lichtes.

Das ganze Farbband heißt **Spektrum**¹⁾.

Bringen wir Rauch oder einen weißen Schirm in den Gang der abgelenkten Lichtstrahlen, so sehen wir, daß unmittelbar hinter dem Prisma nur die äußersten Ränder des Strahlenfächers gefärbt erscheinen. Erst in größerer Entfernung vom Prisma treten die Farben vollständig und klar hervor.

Da das Prisma aus farblosem Glas besteht, ist zu vermuten, daß die verschiedenfarbigen Strahlen von vornherein in dem weißen Licht vorhanden gewesen sind und durch verschieden starke Ablenkung im Prisma auseinandergebreitet wurden.

Die Richtigkeit unserer Vermutung wird dadurch bestätigt, daß wir die farbigen Strahlen wieder zu weißem Licht vereinigen können. Wir lassen sämtliche verschiedenfarbigen Strahlen eines Spektrums durch eine Sammellinse hindurchgehen; dann erhalten wir dort, wo sich die Strahlen schneiden, ein weißes Bild des Spaltes (Abb. 85).

Blenden wir aus einem Spektrum durch einen schmalen Spalt die Strahlen einer Farbe heraus und lassen sie durch ein zweites Prisma gehen, so werden sie nochmals abgelenkt, aber nicht weiter zerlegt.

Sämtliche farbigen Strahlen, in die weißes Licht durch ein Prisma zerlegt wird, kann man wieder zu weißem Licht vereinigen; dieses ist also zusammengesetztes Licht. Die einzelnen farbigen Strahlen lassen sich nicht weiter zerlegen, sie sind einfaches, nicht zusammengesetztes Licht.

Die Brechungszahl von Glas für das Licht der verschiedenen Spektralfarben nimmt von Rot über Gelb nach Violett hin zu.

Die Zerlegung des Sonnenlichtes durch ein Prisma wurde Ende des 17. Jahrhunderts von dem englischen Physiker Isaac Newton entdeckt.

2. Achromatisches und geradsichtiges Prisma. Ersetzt man das bei dem Versuch nach Abb. 84 benutzte Prisma durch ein ebenso gestaltetes aus einer anderen Glassorte, so erscheint das Spektrum an einer anderen Stelle und hat auch

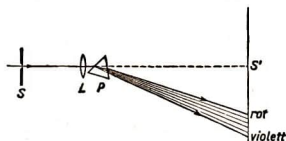
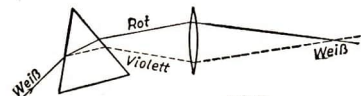


Abb. 84. Zerlegung des weißen Lichtes

Abb. 85
Vereinigung aller Spektralfarben zu Weiß

1) *spéctrum* (lat.) = Bild

eine andere Ausdehnung. Verschiedene Glassorten brechen und zerlegen Licht in besonderer Weise.

Wir machen einen Versuch mit Prismen aus Kron- und Flintglas mit gleichen brechenden Winkeln. Wir stellen fest: 1. Die Ablenkung ist für Flintglas größer als für Kronglas. 2. Die Ausdehnung des Spektrums ist beim Flintglasprisma unter sonst gleichen Bedingungen etwa doppelt so groß wie

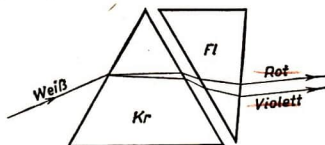


Abb. 86. Achromatisches Prisma

die Ausdehnung des durch das Kronglasprisma erzeugten Spektrums. Außerdem gilt:

Die Gesamtablenkung eines Lichtstrahles durch ein Prisma wächst mit dem brechenden Winkel (§14).

Diese Eigenschaften machen es möglich, durch Zusammensetzung von Prismen aus Kron- und Flint-

glas mit verschiedenen brechenden Winkeln die Farbenzerstreuung des durchgehenden Lichtes aufzuheben. Das einfallende Licht wird dann nur aus seiner Richtung abgelenkt, aber nicht zerlegt. Eine solche Zusammenstellung nennt man achromatisches¹⁾ Prisma (Abb. 86). Im Gegensatz hierzu wird bei den sogenannten geradsichtigen Prismen das Licht in Spektralfarben zerlegt, aber nicht aus seiner Richtung abgelenkt.

3. Misch- und Ergänzungsfarben. Wir wollen jetzt untersuchen, was geschieht, wenn wir nicht alle Farben des Sonnenspektrums, sondern nur einige wieder vereinigen. Wir erzeugen ein Sonnenspektrum, lenken mit einem kleinen Prisma einen schmalen Streifen des Spektrums ab und lassen beide Anteile des Lichtes durch eine Sammellinse gehen. Dann erhalten wir zwei farbige Bilder: das eine hat die Farbe des abgelenkten Teiles des Spektrums, das andere eine Farbe, die sich durch Mischung aus den übrigen Spektralfarben ergibt. Vereinigen wir die beiden Farben, so ergänzen sie sich wieder zu Weiß. Man nennt deshalb die beiden Farben Ergänzung- oder Komplementärfarben²⁾. Nehmen wir nacheinander verschiedene Farben des Spektrums heraus, so finden wir folgende Reihe der Komplementärfarben:

Herausgenommene Farbe	Rot	Orange	Gelb	Grün	Blau	Violett
Entstehende Mischfarbe des Restes	Grün	Violett	Blau	Rot	Gelb	Orange

Wir sehen, bei diesen Farbpaairen kommt jede Farbe einmal als reine Spektralfarbe – obere Reihe – und einmal als Mischfarbe – untere Reihe – vor. Ein Versuch zeigt uns ferner, daß wir auch durch Mischung beispielsweise einer bestimmten gelben und einer bestimmten blauen Spektralfarbe weißes

1) achromatos (griech.) = ungefärbt

2) complémentum = Ergänzung, Ausfüllung

Licht herstellen können. Wir lernen hierdurch, daß wir die Zusammensetzung des Lichtes nicht aus unserer Wahrnehmung erschließen können. Wir können jedoch von einer großen Gruppe von Lichteindrücken, nämlich von Weiß und allen nicht reinen, d. h. „weißlich“ verfärbten Spektralfarben unmittelbar aussagen, daß sie zusammengesetztes Licht sind.

§ 17. Die Linsenfehler und ihre Berichtigung

Wenn wir die durch einfache Sammellinsen entworfenen Bilder näher betrachten, dann bemerken wir an ihnen, besonders in gut abgedunkelten Räumen, mancherlei Unvollkommenheiten. Die Umgebung des Bildes ist aufgehellt, und die Konturen zeigen farbige Ränder. Wenn die Mitte des Bildes scharf eingestellt ist, sind die Bezirke am Rande unscharf, der Maßstab der Abbildung ist außerdem nicht überall derselbe, und daher weist das Bild eigentümliche Verzerrungen auf usw. Wir sahen schon, als wir den Strahlengang durch die Linse prüften und ein Verfahren zur Bildkonstruktion entwickelten, daß die damals gefundenen Gesetze nur annähernd zutreffen, die Abweichungen aber um so geringer sind, je dünner wir die Linse wählen und je näher der Achse die Strahlen verlaufen. Wir wollen nun die Ursachen der erwähnten Unvollkommenheiten im einzelnen untersuchen und, soweit es möglich ist, Mittel zu ihrer Abhilfe angeben.

Zunächst beobachten wir, daß das Bild merklich besser wird, wenn wir die Randpartien der Linse abblenden. Dann wird aber auch das Bild erheblich lichtschwächer. Wenn man helle Bilder erzielen will, muß man danach trachten, eine größere Fläche der Linse für die Erzeugung des Bildes auszunutzen. Wir stellen uns eine Blende her (Abb. 87), die in der Mitte eine kreisförmige Öffnung und nach dem Rande zu einen schmalen konzentrischen Schlitz in der Form eines Kreisringes enthält, und befestigen sie zentrisch auf der Linse. Dann können nur zwei „Zonen“ der Linse wirksam sein. Um je nach Belieben die eine oder die andere ausschalten zu können, hängen wir eine Kreisscheibe oder einen Kreisring aus Pappe über die Linsenfassung.

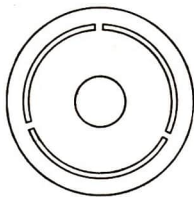


Abb. 87. Doppelblende

1. Sphärische Aberration. Nun bilden wir eine auf der Achse gelegene möglichst punktförmige Lichtquelle – etwa den Glühdraht G einer kleinen Lampe – ab, indem wir jeweils nur eine der beiden Zonen der Linse freigeben. Dabei zeigt sich, daß die Strahlen der Randzone und die der Mittelzone die Bilder B_2 und B_1 an verschiedenen Stellen der Achse entwerfen, und zwar liegt das von den Randstrahlen erzeugte Bild näher an der Linse (Abb. 88a). Bei einer plankonvexen Linse macht auch die Stellung der

Linse etwas aus. Die gegenseitige Abweichung der Bildorte ist größer, wenn die ebene Seite der Linse dem Bildschirm zugekehrt ist. Den geschilderten Fehler bezeichnet man als **sphärische Aberration**.¹⁾ Sie hat ihre Ursache in der Gestalt der Linse. Bei plankonkaven Linsen ist die sphärische Aberration größer, wenn die gekrümmte Fläche nach dem Bildschirm

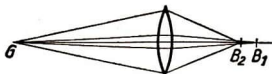


Abb. 88a. Sphärische Aberration



Abb. 88b. Ausgleich der sphärischen Aberration. In dem austretenden Strahlenbündel sind Rand- und Mittelpunktsstrahlen parallel.

zeigt. Kombiniert man eine Konvexlinse in der Stellung der geringsten Abweichung mit einer Plankonkavlinse in der Stellung der größten Abweichung, so arbeiten die Fehler der einen den anderen entgegen. Gleichzeitig wird die sammelnde Kraft der Konvexlinse geschwächt. Durch passende Auswahl und Anordnung der Linsen kann man es erreichen, daß die sphärische Aberration nicht mehr stört und das Linsenpaar noch wie eine Sammellinse wirkt, also zur Bilderzeugung verwendet werden kann (Abb. 88b).

2. Chromatische Aberration. Um das Auftreten der farbigen Ränder in den Bildern einfacher Linsen zu erklären, setzen wir zunächst eineinfarbiges, z. B. rotes Filter vor die punktförmige Lichtquelle und bilden sie durch die Strahlen der Mittelpunktzone ab. Verwenden wir dann bei derselben Zone blaues Licht, so liegt der Vereinigungspunkt der Strahlen näher an der Linse. Machen wir die entsprechenden Versuche mit rotem und blauem Licht



Abb. 88c. Chromatische Aberration

unter Verwendung der Randzone, so sehen wir, daß die entsprechenden Bilder sich beide der Linse genähert haben, das blaue aber in stärkerem Maße.

Sendet die Lichtquelle G weißes

Licht aus, so entwirft das Licht jeder darin enthaltenen Spektralfarben das Bild an einer anderen Stelle, auch wenn nur eine bestimmte Zone der Linse benutzt wird (Abb. 88c). Man erhält, wenn man die Linse mit voller Öffnung verwendet, eine Reihe von Bildern in den Farben des Spektrums, und zwar liegen die violetten Bilder B_v der Linse näher als die roten B_r . Es ist also unmöglich, mit einer einfachen Linse alle farbigen Strahlen wieder an derselben Stelle des Schirmes zu sammeln. Stellt man auf eine Farbe scharf ein, so ergeben die anderen verschwommene Bilder, und es entstehen die beobachteten farbigen Säume. Man bezeichnet den hier auftretenden Fehler als **chromatische**²⁾ Aberration.

1) aberratio (lat.) = Abirrung

2) chrōmátinos (griech.) = gefärbt

Ihre Beseitigung gelang erst, als man Glassorten kennenlernte, die für Licht derselben Farbe verschiedene Brechungszahlen haben und unter sonst gleichen Bedingungen weißes Licht in verschieden ausgedehnte Spektren zerlegen. Solche Gläser haben wir schon benutzt, um durch Zusammenstellung entsprechender Prismen ein achromatisches Prisma herzustellen, das weißes Licht zwar ablenkt, aber nicht zerlegt (vgl. § 16). Man kann nun auch durch Verbindung einer Sammellinse aus Kronglas (*Kr*) und einer Zerstreuungslinse aus Flintglas (*Fl*) ein Linsensystem herstellen, das wie eine Sammellinse wirkt, aber frei von chromatischer Aberration ist. Eine solche Zusammenstellung von Linsen heißt achromatische Linse oder Achromat (Abb. 89).



Abb. 89.
Achromatische
Linse

3. Astigmatismus und Bildfeldwölbung. Bei Aufnahmen mit Hilfe eines photographischen Apparates und bei der Projektion von Lichtbildern hat der Gegenstand bzw. das Bild auf dem Schirm oft eine bedeutende Ausdehnung, und an der Abbildung sind Strahlenbündel beteiligt, die ziemlich schräg zu den Achsen der Objektive gehen. Wir wollen das Verhalten derartiger schiefer Strahlenbündel untersuchen, die von einem Punkt ausgehen und eine einfache Linse durchdringen.

Eine plankonvexe Linse von 10 cm Durchmesser und 30 cm Brennweite versehen wir mit der schon erwähnten Doppelblende und lagern den Stiel der Linse waagrecht. Zunächst decken wir die Randzone zu und entwerfen von einer punktförmigen Lichtquelle ein scharfes Bild auf dem einige Meter entfernten Schirm. Die Linse soll dabei zunächst in normaler Stellung die ebene Seite der Lichtquelle zukehren.

Drehen wir die Linse nun um etwa 10° , so wird das Bild undeutlich. Wir stellen fest, daß die beste Abbildung in etwa 30 cm Entfernung vor der alten Stellung des Schirmes entsteht. Das Bild ist aber nicht annähernd so deutlich wie am Anfang. Nun drehen wir die Linse um etwa 20° . Jetzt erhalten

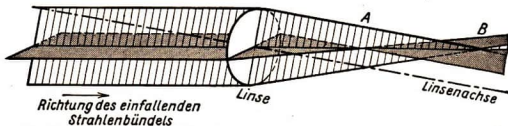


Abb. 90. Astigmatisches Bündel. Bei A und B strichförmige Vereinigungen der Strahlen

wir überhaupt keine Abbildung mehr, aus der wir die Gestalt der Lichtquelle erkennen könnten. Statt des vermuteten punktförmigen Bildes der Lichtquelle erhalten wir auf einem Schirm hinter der Linse Lichtflecke, die sich bei einer bestimmten Entfernung des Schirmes zu einem senkrechten Strich und bei einer anderen Entfernung zu einem waagerechten Strich zusammen-

ziehen. Das durch die Brechung entstandene Strahlenbündel ist also nicht mehr kegelförmig, sondern besitzt an zwei Stellen strichförmige Einschnürungen. Den hier auftretenden Linsenfehler nennt man Astigmatismus¹⁾

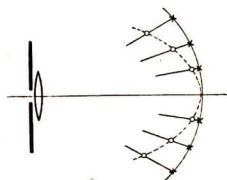


Abb. 91. Bildfeldwölbung.
Bildpunkte für verschiedene
Neigungen der Strahlen
x Strahlenvereinigung in horizontaler,
o in vertikaler Richtung

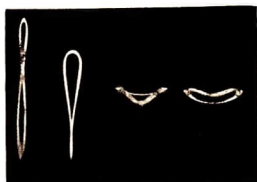


Abb. 92. Koma durch Randstrahlen
bei schiefelem Einfall

(Abb. 90). Neigt man die Linse stärker, dann tritt die Erscheinung noch auffälliger hervor, und die Striche wandern näher an die Linse heran. Stellt man die Orte der Striche für verschiedene Neigungen der Linse fest, dann erkennt man, daß sie auf zwei stark gekrümmten Flächen liegen. Dieselben Erscheinungen treten auf, wenn man die Linse ruhen läßt und die punktförmige Lichtquelle senkrecht zur Achse der Linse bewegt. Die Punkte eines senkrecht zur Linsenachse stehenden Gegenstandes werden also als Striche abgebildet, und diese liegen auf einem Bildfeld, das aus zwei stark gekrümmten Flächen besteht. Man bezeichnet diese Erscheinung als Bildfeldwölbung (Abb. 91).

4. Koma. Macht man die entsprechenden Versuche unter Verwendung der Randzone, dann erhält man auf dem Schirm statt eines Lichtpunktes mehr oder weniger verschlungene Linien (Abb. 92). Man bezeichnet diese Erscheinung als Koma, weil die Figuren eine gewisse Ähnlichkeit mit Kometenschweifen haben. Das Koma wird durch Verkleinerung der Öffnung verringert.

5. Korrigierte Linsensysteme. Die Leistungsfähigkeit der optischen Instrumente ist zum Teil dadurch eingeschränkt, daß sich die Linsenfehler nicht restlos beseitigen lassen. Vgl. auch die Bemerkung über die Grenze der Vergrößerung eines Mikroskops (S. 67). Durch Auswahl der Glassorten und genaue Berechnung der Linsenform ist es aber gelungen, zusammengesetzte Objektive, sog. korrigierte Linsensysteme, herzustellen, bei denen die genannten Fehler nicht mehr störend hervortreten. Ein Linsensystem, bei dem Astigmatismus, Bildfeldwölbung und Koma weitgehend beseitigt sind, heißt Anastigmat. Ernst Abbe hat die theoretischen Grundlagen für die Konstruktion derartiger Linsensysteme für Mikroskope geschaffen. Korrigierte Linsensysteme finden auch Verwendung in hochwertigen photographischen Apparaten. Abb. 93 zeigt das korrigierte Objektiv eines Mikroskops.

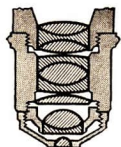


Abb. 93. Objektiv
eines Mikroskops

1) a (griech.) = un; stíigma (griech.) = Punkt

§ 18. Geräte zur Bilderzeugung

1. Die photographische Kamera ist unter Anlehnung an die Lochkamera (§ 11) entwickelt worden. (Auch mit einer Lochkamera kann man photographische Aufnahmen machen.) An die Stelle der Öffnung tritt beim photographischen Apparat das Objektiv¹⁾. Dieses ist im einfachsten Fall eine Sammellinse, bei guten Apparaten besteht es aus einem korrigierten Linsensystem (§ 17). Das durch das Objektiv erzeugte Bild des aufzunehmenden Gegenstandes wird auf einer in die Hinterwand eingesetzten lichtempfindlichen Schicht (Platte oder Film) aufgefangen. Damit es auf der Schicht scharf erscheint, muß der Abstand zwischen ihr und dem Objektiv der Entfernung des Gegenstandes vom Apparat angepaßt werden können. Zu diesem Zweck ist entweder die Vorderwand mit dem fest darin sitzenden Objektiv verschiebbar (die seitliche Begrenzung der Kamera wird dann gewöhnlich von einem harmonikaartig gefalteten Balg gebildet), oder die Kamera besteht aus einem starren Gehäuse, und das Objektiv läßt sich in einem Tubus bewegen. Bei manchen Apparaten kann man das Bild vor der Aufnahme auf einer in die Hinterwand eingeschobenen Mattscheibe beobachten und die richtige Einstellung unmittelbar prüfen, bei anderen ist an der Linsenföhrung oder am Gehäuse eine Skala angebracht, an der man die Scharfeinstellung für eine bestimmte Entfernung ablesen kann. Unmittelbar vor der Linse oder innerhalb des Objektivs, wenn dieses aus mehreren Linsen zusammengesetzt ist, befindet sich eine verstellbare Blende. Sie heißt Öffnungs- oder Aperturblende²⁾. Die Zahlen, die den verschiedenen Öffnungen der Blende zugeordnet sind, geben an, wie groß jeweils das Verhältnis der Brennweite des Objektivs zum Durchmesser der Linsenöffnung ist. Dieses Verhältnis ist ein Maß für die Größe des ausgenutzten Lichtstromes. Die Folge der Blendenöffnungen ist so gewählt, daß bei der nächstfolgenden Zahl jeweils der halbe Lichtstrom hindurchgelassen wird, die Belichtungszeit also verdoppelt werden muß, wenn die gleiche Lichtmenge auf die Schicht fallen soll.

Streng genommen können bei einer festen Stellung des Objektivs nur Punkte in einer bestimmten Entfernung wieder als Punkte abgebildet werden. Das von näheren und entfernteren Stellen ausgehende Licht erzeugt auf der Schicht kleine Lichtflecke, sog. Zerstreuungskreise. Von einem Gegenstand mit merklicher Tiefenausdehnung erhält man also ein Bild, das nicht in allen Teilen gleichmäßig scharf ist. Die Unschärfe stört aber nicht, wenn die Ausdehnung der Zerstreuungskreise einen gewissen Betrag nicht übersteigt. Der Tiefenbereich, der bei der Einstellung des Objektivs auf eine bestimmte Entfernung mit befriedigender Schärfe abgebildet wird, ist um so größer, je kleiner die Brennweite des Objektivs und je kleiner die Blendenöffnung ist. Im allgemeinen wählt man daher die Blende so klein, wie es die Belichtungszeit zuläßt. Dann erreicht man die größte Tiefenschärfe.

1) obiectum (lat.) = Gegenstand

2) apertura (lat.) = Öffnung

2. Der Bildwerfer. (Projektionsapparat). Bei jeder Sammellinse kann man die Lage von Bild und Gegenstand miteinander vertauschen. Bringt man daher in einem photographischen Apparat an die Stelle der Mattscheibe ein durch-

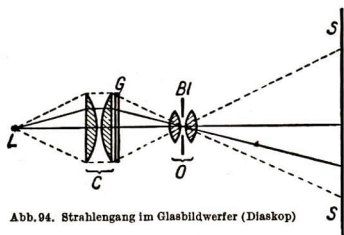


Abb. 94. Strahlengang im Glasbildwerfer (Diaskop)

sichtiges Glasbild, meist eine Photoplatte, das man hinreichend beleuchtet, so kann man in entsprechender Entfernung auf einem Schirm ein vergrößertes Bild des beleuchteten Glasbildes auffangen. Durch Umkehrung des Lichtweges wird also eine photographische Kamera in einen Projektionsapparat¹⁾ verwandelt. (Abb. 94) Man nennt das Glasbild *G* auch

Diapositiv²⁾. Dieses beleuchtet man mit einer starken Lichtquelle *L*, deren Lichtkegel man durch ein aus zwei plunkonvexen Linsen zusammengesetztes Linsensystem *C*, den Kondensor³⁾, konvergent macht. Dadurch erreicht man, daß alle Strahlen, die das unmittelbar vor dem Kondensor stehende Glasbild *G* treffen, durch das Objektiv *O* hindurchgehen. Durch dieses wird dann auf dem Schirm *SS* ein reelles vergrößertes Bild entworfen. Das als Gegenstand dienende Glasbild muß umgekehrt und seiten-

vertauscht in den Strahlengang gestellt werden, damit das Bild auf dem Schirm in richtiger Lage erscheint.

Derartige Bildwerfer, bei denen die abbildenden Strahlen durch den Gegenstand (das Diapositiv) hindurchgehen, werden Diaskope genannt. Ist der Gegenstand undurchsichtig, also z. B. ein Papierbild, so muß man die von dem Gegenstand zurückgeworfenen Lichtstrahlen zur Bilderzeugung ausnützen. Das geschieht im Episkop⁴⁾ (Abb. 95). Man beleuchtet den

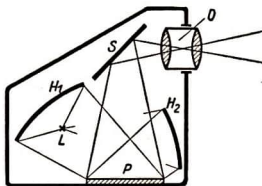


Abb. 95. Episkop

abzubildenden Gegenstand *P* durch eine starke Lichtquelle *L* mit Hilfe von Hohlspiegeln *H*₁ und *H*₂ möglichst kräftig und bildet ihn dann durch das zerstreut zurückgeworfene Licht mit Hilfe des ebenen Silberspiegels *S* und des Objektivs *O* ab. Das Bild ist viel lichtschwächer als beim Diaskop, da nur ein geringer Bruchteil des auf das Papierbild fallenden Lichtes so reflektiert wird, daß er auf den Spiegel *S* fällt.

3. Der Kinematograph. Werden einzelne, schnell aufeinanderfolgende Zustände eines Bewegungsvorganges photographiert, indem man etwa 20 bis

1) proectio (lat.) = das Hinwerfen

2) diá (griech.) = hindurch

3) condensäre (lat.) = verdichten

4) epí (griech.) = auf, darauf

30 Aufnahmen in einer Sekunde macht, so erhält man Reihenbilder. Die Einzelbilder werden mit einem entsprechend eingerichteten Bildwerfer, einem Kinematographen¹⁾, dem Auge im Zeitmaß der Aufnahme ruckweise vorgeführt. Während des Bildwechsels wird das Licht abgeblendet. Strahlengang und Filmlauf in einem Kinematographen sind in Abb. 96 schematisch dargestellt. Der im Auge von einem Bilde hervorgerufene Lichtreiz dauert nach dem Verschwinden des Bildes noch kurze Zeit, etwa $\frac{1}{20}$ s, an; innerhalb dieser Zeiterscheint das folgende Bild. Wir haben dann den Eindruck eines ununterbrochenen Bewegungsvorganges.

Werden von einem Bewegungsvorgang in einer Sekunde nicht 30, sondern etwa 300 Aufnahmen gemacht und führt man diese nicht in einer, sondern in 10 Sekunden vor, so werden die in Wirklichkeit sehr rasch ablaufenden Vorgänge der betrachteten Bewegungen im Bilde stark verlangsamt. Man spricht dann von einer Zeitlupe (Anwendung in der Medizin, z. B. bei der Untersuchung der Herzbewegungen, und im Sport, z. B. beim Studium einer Sprungbewegung). Werden hingegen z. B. die 24 Aufnahmen, die man während eines Tages mit stündlichem Abstand von einer wachsenden Pflanze gemacht hat, in einer Sekunde vorgeführt, so nennt man das Gerät einen Zeitraffer.

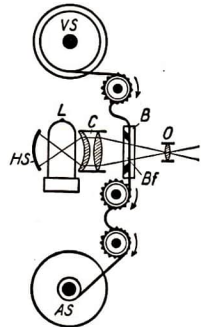


Abb. 96. Schematische Darstellung des Strahlenganges und Filmlaufes eines Kinematographen.
HS Hohlspiegel, *L* Lichtquelle, *C* Kondensor, *B* Bildbühne, *Bf* Bildfenster, *O* Okular, *VS* Vorratsspule, *AS* Aufwickelspule

§ 19. Das Auge und die optischen Instrumente.

1. Das optische System des Auges. Die lichtdurchlässigen Medien des Auges (Abb. 97) bestehen aus folgenden Teilen: der Hornhaut, dem Kammerwasser, der Kristalllinse und dem Glaskörper. Die Brechungszahlen dieser einzelnen optischen Medien sind verschieden groß, die brechenden Flächen annähernd kugelförmig. Die Hornhaut, das Kammerwasser, die Kristalllinse und der Glaskörper wirken zusammen wie eine einzige Sammellinse. Die Pupille ist eine sich automatisch einstellende Blende; sie schützt durch ihre Verengung beim Einfall

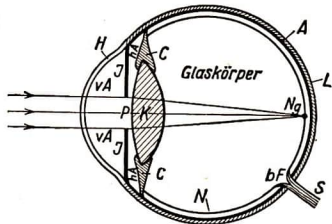


Abb. 97. Waagerechter Schnitt durch das rechte Auge
L Lederhaut, *H* durchsichtige Hornhaut, *A* Aderhaut, *I* Iris (Regenbogenhaut), *P* Pupille, *N* Netzhaut, *S* Sehnerv, *Ng* Netzhautgrube, *bF* blinder Fleck, *K* Kristalllinse, *vA* und *hA* vordere und hintere Augenkammer, *C* Ziliarmuskel

1) *kínama* (griech.) = Bewegung; *gráphein* (griech.) = schreiben

von starkem Licht die Netzhaut vor einer schädigenden Überbeanspruchung. Auf der Netzhaut entwirft das Linsensystem des Auges ein reelles, verkleinertes, umgekehrtes und seitenvertauschtes Bild des betrachteten Gegenstandes. Die Fasern des Sehnerven breiten sich in der Netzhaut aus und enden in feinen Sinneszellen, den Stäbchen und Zäpfchen. An der Stelle des Eintritts des Sehnerven sind keine Sinneszellen vorhanden. Sie heißt der blinde Fleck.

+



Von dem Vorhandensein des blinden Fleckes kann man sich leicht überzeugen, wenn man das linke Auge verdeckt

Abb. 98. Nachweis des blinden Fleckes

und mit dem rechten Auge aus einem senkrechten Abstand von etwa 25 cm das Kreuz der Abb. 98 fixiert. Dann verschwindet für uns der schwarze Kreis, weil das ihm entsprechende Netzhautbild gerade auf den blinden Fleck fällt. Der Kreis wird aber wieder sichtbar, wenn wir mit dem Auge näher herangehen oder uns weiter entfernen.

2. Sehschärfe. Unter Sehschärfe versteht man die Fähigkeit, möglichst viele Einzelheiten des betrachteten Gegenstandes zu erkennen (vgl. S. 66). Diese Fähigkeit ist in der Netzhautgrube, die wegen der Farbe ihrer Umgebung auch gelber Fleck genannt wird, besonders entwickelt. Die Beschaffenheit der Netzhaut weicht im gelben Fleck von der Umgebung ab. Hier liegen als Sinneszellen nur Zäpfchen. Diese stehen hier viel dichter beieinander als die Sinneszellen auf den übrigen Teilen der Netzhaut, und von jedem einzelnen führt eine Nervenfasern zum Gehirn. An den anderen Teilen der Netzhaut sind neben den Zäpfchen auch Stäbchen vorhanden, die Sinneszellen sind hier gruppenweise zusammengefaßt, und jede Gruppe hat nur eine gemeinsame Verbindung zum Gehirn. Die Netzhautgrube ist die Stelle höchster Sehschärfe, nicht aber die lichtempfindlichste Stelle der Netzhaut. Die anderen Stellen der Netzhaut, die besonders Stäbchen enthalten, sprechen auf viel kleinere Lichtreize an als die Netzhautgrube.

3. Tages- und Dämmerungssehen. Wir haben alle schon beobachtet, daß wir bei sehr geringen Helligkeiten keine Farben wahrnehmen, alles erscheint grau. Im Gegensatz zum Tagessehen, bei dem uns die Umwelt farbig erscheint, bezeichnen wir diese Art des Sehens als Dämmerungs- oder Dunkelsehen. Man nimmt an, daß die Stäbchen die lichtaufnehmenden Organe beim Dämmerungssehen, die Zäpfchen die beim Tagessehen sind. Danach vermögen nur die Zäpfchen Farbeindrücke zu vermitteln. Das Auge ist bei Einstellung (Adaptation¹⁾) auf das Dämmerungssehen sehr lichtempfindlich. Um die Augen vom Tagessehen auf Dämmerungssehen umzustellen und zugleich beim Dämmerungssehen die größte Lichtempfindlichkeit zu erreichen, brauchen wir eine lange Zeit, etwa 30 Minuten.

1) adaptäre (lat.) = anpassen

4. Nah- und Fernpunkt. Akkommodation¹⁾. Im entspannten Zustand ist das Auge auf die Ferne eingestellt. Der am weitesten entfernte Punkt, den man noch scharf erkennen kann, heißt der Fernpunkt. Ist das Auge auf die Ferne eingestellt, so vereinigt die Augenlinse parallel ankommende Strahlen in einem Punkte auf der Netzhaut. Rückt der betrachtete Gegenstand näher an das Auge heran, so wird ein scharfes Bild durch Verkleinerung des Krümmungsradius der Kristalllinse erzielt. Man nennt diesen Einstellungs Vorgang **Akkommodation**. Ein jugendliches, normalsichtiges Auge kann die Linse so stark krümmen, daß noch von Gegenständen, die sich in 8 cm Abstand vom Auge befinden, scharfe Bilder auf der Netzhaut entstehen. Der dem Auge am nächsten liegende Punkt, auf den es noch scharf einstellen kann, wird der **Nahpunkt** genannt.

Modell des Auges. Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise optischer Instrumente, bei denen man den Strahlengang bis zur Netzhaut verfolgen will, kann man mit Vorteil ein Modell des Auges benutzen (Abb. 99). Die Augenlinse wird durch eine Sammellinse kurzer Brennweite dargestellt, die Netzhaut durch einen Schirm *S*, der an einem mit der Linse verbundenen Querstab hängt und an diesem verschoben werden kann. Richtet man das Modell auf eine Lichtquelle, so kann man den Schirm so einstellen, daß auf ihm ein scharfes Bild der

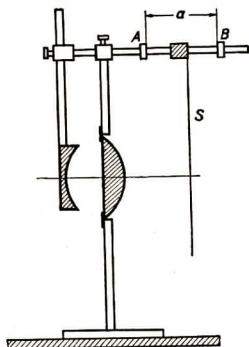


Abb. 99. Modell des kurzsichtigen Auges mit Brille. Die Akkomodationsbreite ist durch $AB = a$ angedeutet.

Lichtquelle entsteht. Bei diesem Modell erfolgt die Anpassung an die Entfernung nicht wie beim wirklichen Auge durch die Veränderung der Linsenkrümmung, sondern durch Verschieben der „Netzhaut“. Bei Einstellung des Auges auf eine Entfernung von 20 bis 30 cm ist die mit der Akkommodation verbundene Anstrengung am wenigsten fühlbar. Die Entfernung von 25 cm bezeichnet man auch als deutliche Sehweite.

Weit-, Alters- und Kurzsichtigkeit. Ist der Nahpunkt schon im jugendlichen Alter weiter als 30 cm entfernt, so ist der Abstand zwischen Augenlinse und Netzhaut so klein (Abb. 100a), daß das Bild *B* naher Gegenstände *G* hinter die Netzhaut fällt und nicht auf *C*; man nennt ein solches Auge weit- oder übersichtig. Durch Vorsetzen einer Sammellinse, einer „Brille“, wird die Brennweite des Augenlinsensystems hinreichend verkleinert, so daß das Bild auf die Netzhaut fällt. Im Alter läßt die Akkommodations-

1) accomodare = sich nach etwas richten

fähigkeit nach, der Nahpunkt rückt weiter vom Auge ab, bei 40- bis 50jährigen auf 40 bis 50 cm. Bei älteren Leuten tritt also, auch wenn sie in der Jugend normalsichtig waren, Weitsichtigkeit (Alterssichtigkeit) ein, daher müssen sie beim Lesen Konvexbrillen tragen oder die Schrift weit von sich entfernt halten.

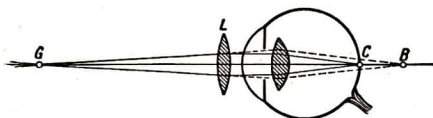


Abb. 100a. Strahlengang im weitsichtigen Auge bei Betrachtung eines nahen Gegenstandes, ohne (gestrichelt) und mit Brille

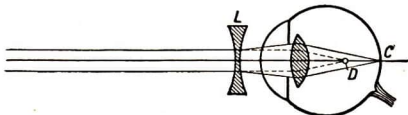


Abb. 100b. Strahlengang im kurzsichtigen Auge bei Betrachtung eines entfernten Gegenstandes, ohne (gestrichelt) und mit Brille

Entfernte Gegenstände kann ein kurzsichtiges Auge daher nicht genau erkennen. Abb. 100b zeigt, daß dann zum deutlichen Sehen eine Brille in Form einer Konkavlinse erforderlich ist.

Weitsichtige müssen konvexe, Kurzsichtige konkave Brillen tragen

Augenärzte und Optiker messen die Brechkraft $\overline{F}$ einer Linse in Dioptrien¹⁾ (Dptr.). Die Dioptrienzahl einer Linse ist der Kehrwert ihrer in Metern gemessenen Brennweite: $\overline{F} = \frac{1}{f}$. Bei Sammellinsen rechnet man die Dioptrien positiv, bei Zerstreuungslinsen negativ.

Hat z. B. eine Sammellinse die Brennweite 0,25 m, so ist ihre Dioptrienzahl + 4. Ein Brillenglas von - 3 Dptr. ist eine Zerstreuungslinse von $33\frac{1}{3}$ cm Brennweite.

5. Das räumliche Sehen. Das Stereoskop. Visieren wir bei gestrecktem Arm erst mit dem linken, dann mit dem rechten Auge bei gleichzeitigem Schließen des anderen Auges über den lotrecht gehaltenen Daumen, so verschiebt sich der Daumen gegen den betrachteten Hintergrund: er scheint dem rechten Auge nach links, dem linken Auge nach rechts zu rücken. Die in beiden Augen entstehenden Netzhautbilder des Daumens stimmen also nicht völlig überein.



Abb. 101. Links und rechts Netzhautbild eines Pyramidenstumpfes

Gegenstände ohne Tiefenausdehnung, z. B. eine Zeichnung, ergeben in beiden Augen übereinstimmende Netzhautbilder. Die beiden Netzhautbilder eines Körpers aber unterscheiden sich um so mehr, je größer seine Tiefenausdehnung ist. Betrachten wir z. B. einen quadratischen Pyramidenstumpf von

1) dioptria (griech.) = das Spähen

oben abwechselnd mit dem linken und dem rechten Auge, so erscheint er dem linken Auge wie das linke, dem rechten Auge wie das rechte Bild in Abb. 101. Halten wir zwischen die beiden Bilder ein Blatt steifes Papier, so daß das linke Auge nur das linke und gleichzeitig das rechte Auge nur das rechte Bild sieht, so erhalten wir einen körperlichen Eindruck des Pyramidenstumpfes. Die Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder ermöglicht es uns, räumlich ausgedehnte Gegenstände körperlich zu sehen, und vermittelt uns auch einen Eindruck von ihrer Tiefenausdehnung. Um mit Hilfe von zwei verschiedenen ebenen Bildern einen körperlichen Eindruck zu erzielen, bedient man sich des Stereoskops¹⁾. Mit diesem betrachtet man gleichzeitig zwei Bilder, die nach Art der Abbildung 101 den verschiedenen Netzhautbildern der beiden Augen entsprechen. Man stellt sie her, indem man mit einem photographischen Apparat von demselben Gegenstand je eine Aufnahme von zwei Standpunkten aus macht, die seitlich so weit voneinander entfernt sind wie die beiden Augen eines Menschen. Bei der in Abb. 102 schematisch dargestellten Form des Stereoskops betrachtet man zwei derartige Stereoskopbilder durch zwei aus einer Sammellinse herausgeschnittene Stücke P_1 und P_2 , die mit ihren schmalen Enden nach innen gegeneinandergestellt sind. Die Abbildung zeigt, wie in den Augen Al und Ar der Eindruck erweckt wird, als ob die beiden Bilder B_1 und B_2 an derselben Stelle, nämlich in B , lägen.

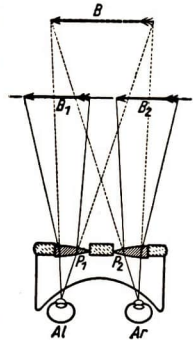


Abb. 102. Stereoskop

Für das plastische Sehen ist es wesentlich, daß die in beiden Augen erzeugten Netzhautbilder sich so voneinander unterscheiden, wie es bei der Betrachtung eines Körpers mit beiden Augen der Fall ist. Eine Verschmelzung der beiden Wahrnehmungen erzeugt dann den Eindruck der Körperlichkeit. Betrachten wir aber ein ebenes Bild, z. B. die Photographie einer Landschaft, mit beiden Augen, so sind die Netzhautbilder identisch. Sie bilden daher keine Grundlage für einen körperlichen Eindruck und verhindern sogar durch ihr gleichzeitiges Auftreten ein plastisches Sehen. Betrachtet man dagegen ein solches Bild nur mit einem Auge, so hat man sofort einen deutlichen räumlichen Eindruck, da die Störung durch das zweite Netzhautbild fortfällt.

6. Schwinkel. Unser Urteil über die Größe eines Gegenstandes hängt von der Größe seines Netzhautbildes in unserem Auge ab. Diese ist durch die Größe des (auch Gesichtswinkel oder scheinbare Größe genannten) Sehwinkels AOB (Abb. 103) bedingt, unter dem wir den hier als Strecke AB angenommenen Gegenstand sehen. Die Größe des Sehwinkels hängt nicht nur von der des Gegenstandes, sondern auch von dessen Entfernung vom Auge ab: Nach Abb. 103 erscheinen die verschieden großen Gegenstände AB und CD in den angegebenen Entfernungen unter demselben Sehwinkel

1) stereós (griech.) = körperlich

AOB , die beiden gleich großen Gegenstände AB und A_1B_1 , die sich in verschiedenen Entfernungen befinden, unter den verschiedenen Schwinkeln AOB und A_1OB_1 . Aus der Größe des Schwinkels können wir daher nur dann

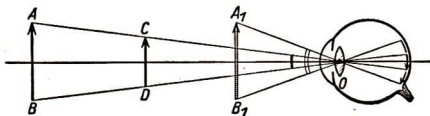


Abb. 103. Schwinkel

auf die wahre Größe des Gegenstandes schließen, wenn wir seine Entfernung kennen, oder umgekehrt auf seine Entfernung, wenn uns seine wahre Größe bekannt ist.

Sonne und Mond, die annähernd denselben Schwinkel ($30''$) haben, erscheinen uns gleich groß. Dabei ist der Durchmesser der Sonne 400 mal so groß wie der des Mondes. Die Sonne ist aber auch 400 mal so weit von der Erde entfernt wie der Mond.

Bei einem normalen Auge muß ein Gegenstand mindestens einen Schwinkel von $1'$ ausfüllen, wenn er getrennt von seiner Umgebung wahrgenommen werden soll. Die Ausdehnung des Bildes des Gegenstandes auf der Netzhaut beträgt dann $0,0114$ mm.

7. Die Lupe. Wenn wir einen sehr kleinen Gegenstand genauer betrachten wollen, bringen wir ihn möglichst nahe an das Auge heran; hierdurch wird sein Schwinkel und damit sein Netzhautbild vergrößert. Das Auge kann aber nur solche Gegenstände noch scharf erkennen, die mindestens so weit entfernt sind wie der Nahpunkt. Wollen wir bei geringerer Entfernung einen kleinen Gegenstand scharf sehen, so bringen wir nahe vor das Auge eine

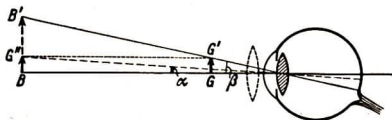


Abb. 104. Vergrößerung durch die Lupe

Sammellinse und halten den Gegenstand so davor, daß er innerhalb der einfachen Brennweite liegt. Wir benutzen dann die Linse als Vergrößerungsglas und nennen sie eine Lupe¹⁾.

In Abb. 104 denken wir uns im Nahpunkt B des Auges einen sehr kleinen Gegenstand BG'' , der unter einem so kleinen Schwinkel α erscheint, daß das Auge seine Einzelheiten nicht mehr erkennt. Bringen wir jetzt eine Lupe vor das Auge, so können wir den Gegenstand näher heranbringen (bis in die Lage GG'), ohne daß sein Bild hinter die Netzhaut fällt; gleichzeitig wird der Schwinkel β dadurch größer. Durch die Lupe betrachtet, erscheint uns also der in G befindliche kleine Gegenstand GG' so groß wie ein in B befindlicher großer Gegenstand BB' . Mit Hilfe des Augenmodells kann man den Strahlengang bis zu dem reellen Bild auf der Netzhaut verfolgen.

1) lupa (lat.) = Wolfsgeschwulst (Form der Linse)

Unter der Vergrößerung v eines optischen Instrumentes versteht man das Verhältnis der Sehwinkel bei der Betrachtung eines Gegenstandes mit und ohne Instrument.

$$v = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument}}$$

Eine Rechnung ergibt für die Vergrößerung einer Lupe mit der Brennweite f , wenn d die deutliche Schweite bezeichnet:

$$v = \frac{d}{f} + 1.$$

8. Das Mikroskop. Eine stärkere Vergrößerung als durch die Lupe erzielt man durch das Mikroskop¹⁾ (Abb. 105). Es besteht im wesentlichen aus zwei Sammellinsen; die eine von ihnen ist stark gekrümmt, hat also eine kleine Brennweite; sie ist dem Gegenstand (Objekt) zugekehrt und heißt daher *Objektiv*. Dieses entwirft von dem Gegenstand GG' ein umgekehrtes, reelles und vergrößertes Bild BB' , das man durch die zweite Linse, das *Okular*²⁾, wie durch eine Lupe betrachtet. CC' ist das virtuelle Bild. Bei der Verwendung des Augenmodells (S. 63) kann man ein reelles Bild auf der „Netzhaut“ auffangen. – Die Linsen eines Mikroskops sitzen an den Enden eines zylindrischen Rohres, des *Tubus*³⁾. Bei den neuzeitlichen Mikroskopen (Abb. 106) verwendet man an Stelle der beiden einfachen Sammellinsen korrigierte Linsensysteme. Abb. 106 zeigt den Schnitt durch ein hochentwickeltes Mikroskop mit binokularem⁴⁾ Tubus.

Man untersucht durchsichtige Gegenstände, wie dünne Membranen, dünne Flüssigkeitsschichten oder Dünnschliffe fester Körper, im durchfallenden Licht. Der Objektstisch, der sich unter dem Tubus befindet, hat eine runde Öffnung, durch die ein darunter angebrachter ebener oder hohler Spiegel (Beleuchtungsspiegel) Licht nach oben wirft. Untersucht man die Oberflächen irgendwelcher undurchsichtiger Stoffe, dann beleuchtet man von oben.

Auch mit den stärksten Mikroskopen kann man über eine 2000fache Vergrößerung nicht hinauskommen. Die kleinste mit ihnen noch erkennbare Strecke ist etwa $\frac{1}{4000}$ mm lang. Der Vergrößerung des Lichtmikroskops ist dadurch eine Grenze gesetzt, daß die Annahme von „Lichtstrahlen“ in

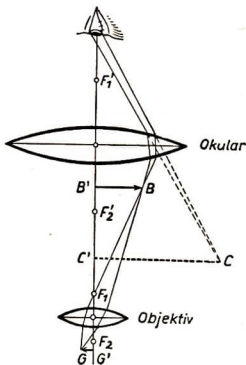


Abb. 105. Strahlengang im Mikroskop
Zeichnung nicht maßgetreu

1) mikrós (griech.) = klein

2) oculus (lat.) = Auge

3) tubus (lat.) = Röhre

4) bini (lat.) = je zwei, binokular = für zwei Augen

dem Sinne von Lichtbündeln mit beliebig kleinem Querschnitt die tatsächlichen Verhältnisse bei der Ausbreitung des Lichtes nicht zutreffend beschreibt (vgl. Teil II B, § 23).

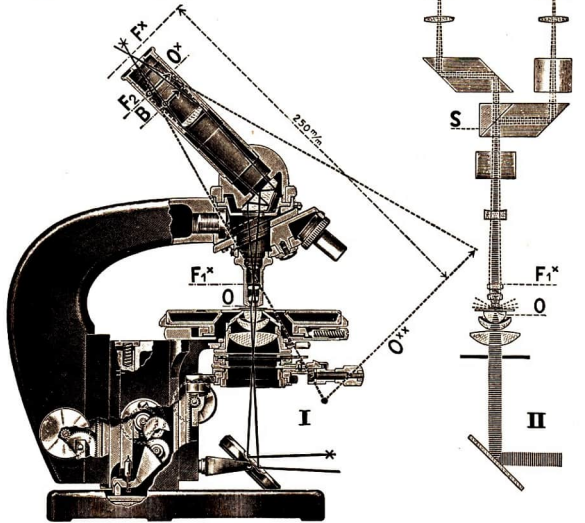


Abb. 106. Schnitt durch ein Mikroskop mit binokularem Tubus aus den optischen Werken Carl Zeiss, Jena, VEB

I Strahlengang für die Begrenzung des Sehfeldes
II Strahlengang für die Abbildung eines Objektpunktes

F_1^* hintere Brennebene des Objektivs

F_2^* vordere Brennebene des Okulars

F_x^* hintere Brennebene des ganzen Mikroskops

O Objekt

O^* reelles Zwischenbild

O^{**} virtuelles Bild

B Okularblenden

S Prismen zur Aufteilung des Strahlenganges auf beide Okularstutzen

9. Fernrohre (Teleskope). Fernrohre dienen dazu, das Netzhautbild eines weit entfernten Gegenstandes zu vergrößern (Vergrößerung des Seh winkels). Die in das Fernrohr eintretenden Strahlen sind nahezu parallel; die Fernrohre sind so gebaut, daß die austretenden ebenfalls nahezu parallel verlaufen.

Das Keplersche Fernrohr (Abb. 107). Ein als Sammellinse von großer Brennweite wirkendes Linsensystem, das Objektiv, entwirft ein reelles, umgekehrtes und verkleinertes Bild, das in der Nähe des Objektivbrennpunktes entsteht. Man betrachtet es durch ein zweites, wie eine Lupe wirkendes Linsensystem, das Okular. Beim experimentellen Aufbau eines Keplerschen

Fernrohres unter Verwendung des Augenmodells erhält man ein reelles Bild auf der „Netzhaut“.

Im fertigen Instrument sind Objektiv und Okular miteinander durch einen Tubus verbunden; sie liegen so zueinander, daß der zweite Brennpunkt des Objektivs fast mit dem ersten des Okulars zusammenfällt; die Tubuslänge ist also annähernd gleich der Summe der Brennweite von Objektiv und Okular. Fernrohre dieser Art liefern umgekehrte Bilder; sie sind vornehm-

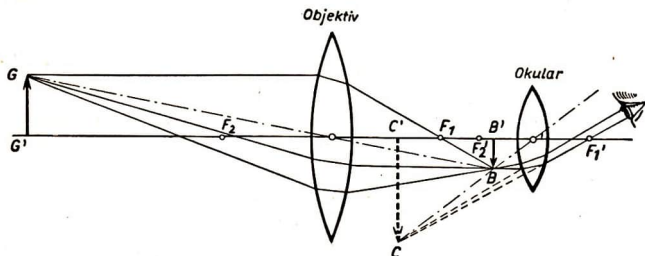


Abb. 107. Strahlengang im Keplerschen Fernrohr
Zeichnung nicht maßgetreu

lich für astronomische Zwecke geeignet, da in diesem Falle die Umkehrung des Bildes nicht stört; sie heißen **astronomische** oder **Keplersche Fernrohre**. Ihre Konstruktion wurde im Jahre 1611 von dem deutschen Astronomen Johann Kepler angegeben. (Abb. 126 zeigt die Ansicht eines astronomischen Fernrohres.)

Bei einem Keplerschen Fernrohr ist die Vergrößerung

$$v = \frac{f_1}{f_2},$$

wenn f_1 und f_2 die Brennweiten von Objektiv und Okular sind.

Das im Jahre 1608 von einem holländischen Brillenschleifer Lippershey erfundene und bald darauf auch von dem italienischen Physiker und Astronomen Galileo Galilei nacherfundene **holländische** oder **Galileische Fernrohr** (Abb. 108) liefert aufrechte Bilder und ist daher auch für Beobachtungen

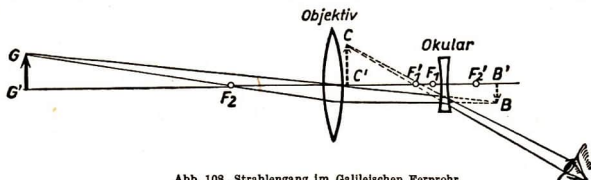


Abb. 108. Strahlengang im Galileischen Fernrohr
Zeichnung nicht maßgetreu

auf der Erde geeignet. Als Okular dient bei ihm eine Zerstreuungslinse. Dieses Fernrohr zeichnet sich durch Handlichkeit und große Helligkeit der Bilder aus; es findet Verwendung als Theaterglass und ist auch als Nacht-

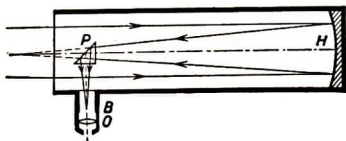


Abb. 109. Strahlengang in einem Spiegelfernrohr
Zeichnung nicht maßgetreu

glas gut brauchbar. Es gibt aber nur geringe Vergrößerungen und besitzt ein kleines Gesichtsfeld.

Für astronomische Zwecke verwendet man vielfach Spiegelfernrohre (Reflektoren, Abb. 109); bei ihnen wird das durch einen Hohlspiegel H erzeugte Bild B eines Gestirnes durch

eine Lupe O betrachtet. Die Strahlen werden am Prisma P total reflektiert. — Spiegelfernrohre sind bis zu sehr bedeutenden Abmessungen hergestellt worden und haben sich besonders bei der Erforschung der Fixsternsysteme bewährt (§ 43). Auf dem Mount Palomar in Kalifornien befindet sich ein Reflektor mit einem Spiegeldurchmesser von 5 m.

Linsenfernrohre (Refraktoren) entsprechender Leistung kann man nicht bauen.

Erdfernrohre. Um durch ein Fernrohr ein aufrechtes und seitenrichtiges Bild zu erhalten, schaltet man in ein astronomisches Fernrohr zwischen Objektiv und Okular eine weitere Linse ein, die man als Umkehrlinse bezeichnet. Diese entwirft von dem durch das Objektiv in der Nähe seines Brennpunktes erzeugten reellen umgekehrten Bild wiederum ein reelles, abermals um-

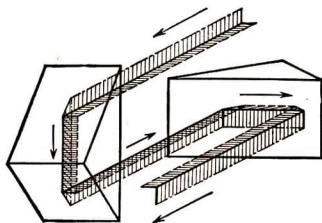


Abb. 110. Bildumkehrung
durch totalreflektierende Prismen

gekehrtes Bild. Betrachten wir dieses Bild durch das Okular wie durch eine Lupe, so zeigt es dieselbe aufrechte Lage wie der Gegenstand. Ein derartiges Erdfernrohr wird durch die erhebliche Länge seines Rohres sehr unhandlich und ist daher für viele Zwecke wenig brauchbar.

Prismenfernrohre. Schaltet man zwischen Objektiv und Okular eines astronomischen Fernrohres statt der Umkehrlinse

zwei zweckentsprechend angeordnete, totalreflektierende Prismen ein, so erhält man ebenfalls aufrechte Bilder; solche Fernrohre nennt man Prismengläser. In ihnen werden die beiden Prismen mit den Hypotenusenflächen so gegeneinander gestellt, wie es die Abb. 110 zeigt. Die durch das Objektiv hindurchgegangenen Lichtstrahlen werden an den Kathetenflächen des ersten

Prismas total reflektiert und somit um 180° gedreht. Dies geschieht nochmals an den Kathetenflächen des zweiten Prismas. Die Lichtstrahlen verlaufen also wieder in ihrer ursprünglichen Richtung, wenn sie nunmehr in das Okular gelangen. Zugleich wird bei der zweimaligen vollständigen Zurückwerfung an den Kathetenflächen des ersten Prismas Oben und Unten, an denen des zweiten Prismas Rechts und Links vertauscht, so daß man bei der Betrachtung durch das als Lupe wirkende Okular das Bild in der richtigen Lage erhält.

§ 20. Die Emission des Lichtes

1. Spektralapparat. Zur Untersuchung der Zusammensetzung des Lichtes benutzt man Spektralapparate, deren Prinzip wir an Abb. 111 kennenlernen. Ein Spalt (*Sp*) wird von der Lichtquelle, deren Spektrum man feststellen will, beleuchtet. Dieser Spalt steht im Brennpunkt einer Sammellinse *K* (Kollimatorlinse); sie macht die Strahlen parallel. Die Strahlen gehen dann durch das unmittelbar hinter der Linse *K* angeordnete Prisma *P* hindurch. Nach ihrem Austritt aus dem Prisma sind sie abgelenkt und zerlegt. Sie fallen auf eine Sammellinse *O*, die jede Gruppe gleichfarbiger Strahlen in ihrer Brennebene zu einem besonderen Spaltbild vereinigt. Diese Bilder ergeben das Spektrum der Lichtquelle. Wir betrachten es mit der Lupe *Ok*. Im Spektralapparat (Abb. 112) sind Spalt (1) und Kollimatorlinse in einem Rohr, dem Spalt- oder Kollimatorrohr (2), vereinigt. Die Linsen *O* und *Ok* bilden das Objektiv und das Okular des Beobachtungsfernrohrs (3). Es ist auf unendliche Entfernung eingestellt. Mit dem Teilkreis (4) kann man den Winkel messen, um den die Strahlen einer bestimmten Farbe aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt sind. Auf diese Weise lassen sich die Linien

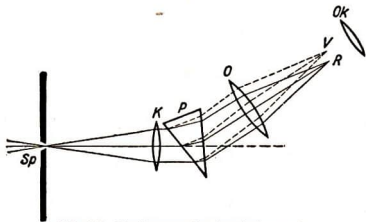


Abb. 111. Strahlengang im Spektralapparat

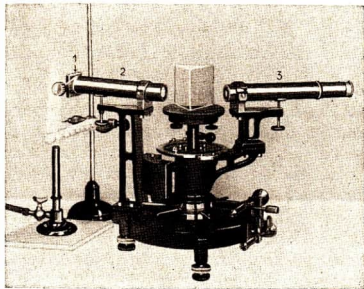


Abb. 112. Spektralapparat.

1 Spalt, 2 Spaltrohr, 3 Beobachtungsfernrohr, 4 Teilkreis

ist auf unendliche Entfernung eingestellt. Mit dem Teilkreis (4) kann man den Winkel messen, um den die Strahlen einer bestimmten Farbe aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt sind. Auf diese Weise lassen sich die Linien

eines Spektrums (vgl. 3.) durch die entsprechenden Ablenkungswinkel genau kennzeichnen. — Zur schnellen Prüfung der spektralen Zusammensetzung einer Lichtstrahlung benutzt man kleine Handspektroskope, die ein geradsichtiges Prisma enthalten.

2. Das kontinuierliche Spektrum. Das Spektrum des Lichtes einer Stearinkerze (in der Flamme glühen kleine Rußteilchen) ist ein zusammenhängendes farbiges Band; ein ebensolches finden wir bei der Zerlegung des Lichtes einer Glühlampe. Wollen wir zwei Spektren vergleichen, so entwerfen wir sie im Spektralapparat übereinander. Dazu klappen wir vor die eine Hälfte des Spaltes ein kleines rechtwinkliges Prisma. Mit dem Licht der einen Lichtquelle beleuchten wir den freigelassenen Teil des Spaltes, die andere Lichtquelle ordnen wir so an, daß ihr Licht nach Reflexion an der Hypotenusenfläche des Prismas in den Spalt gelangt. Wir erhalten dann zwei übereinanderliegende niedrigere Spektren. Wir stellen uns so die Spektren von zwei Glühlampen her; die eine brennt mit normaler Spannung, in den Stromkreis der zweiten haben wir einen Widerstand solcher Größe eingeschaltet, daß das Licht der Glühlampe die Farbe des Kerzenlichtes hat. Wir beobachten: 1. Das Spektrum der zweiten Lampe ist viel lichtschwächer; 2. es erscheint kürzer, die blauen Spektralfarben sind so lichtschwach, daß sie nicht gesehen werden. Vom Sonnenlicht wissen wir, daß hier die blauen Spektralfarben noch viel heller hervorkommen als bei der normal brennenden Glühlampe. Untersuchen wir die Spektren anderer glühender fester Körper, so finden wir immer ein Spektrum, bei dem die Farben ineinander übergehen. Wir nennen dies ein kontinuierliches Spektrum.

Die Spektren glühender fester Körper und glühender Flüssigkeiten (z. B. von geschmolzenem Eisen) sind kontinuierlich.

3. Linienspektren. Wir untersuchen nun die spektrale Zusammensetzung des Lichtes einiger Flammen. Zuerst bringen wir in eine nichtleuchtende Bunsenflamme ein Natriumsalz, z. B. Kochsalz, und sehen, daß die Flamme sich gelb färbt. Die Gelbfärbung wird durch das Leuchten des dampfförmigen Natriums hervorgebracht. Bei der Zerlegung dieses Lichtes sehen wir, daß anstatt eines breiten Farbenbandes nur ein schmaler gelber Streifen vorhanden ist; wir sagen: Das Spektrum des Natriums besteht aus einer gelben Linie. Nehmen wir ein Lithiumsalz, so werden zwei rote Linien sichtbar; Thalliumsalze geben eine grüne Linie, Kaliumsalze zwei rote und eine violette Linie. Auch die Spektren elektrisch angeregter Gase bestehen aus Linien.

Jedes Element sendet als Gas oder Dampf ein ganz bestimmtes, das Element kennzeichnendes Spektrum aus, das sog. Emissionsspektrum des Elementes.

Aus der Lage der Linien kann das Element eindeutig bestimmt werden. In der sog. Spektralanalyse benutzt man die Spektren zum Nachweis von

Elementen. Bei den zur chemischen Analyse gebrauchten modernen Spektralapparaten können die Spektren photographiert werden; an die Stelle des Okulars und des Auges tritt dann die Kamera. Die Analyse wird stets an Hand von Vergleichsspektren durchgeführt. Man nimmt dazu auf der gleichen Platte das Spektrum des zu untersuchenden Stoffes und das einer Vergleichssubstanz auf. Diese enthält meist mehrere Elemente, so daß überall im Spektralbereich Linien bekannter Lage vorhanden sind.

§ 21. Die Absorption des Lichtes

1. Absorptionsspektrum. Wir entwerfen das Spektrum von weißem Licht auf einem weißen Schirm und untersuchen, wie sich das Spektrum ändert, wenn wir farbige durchsichtige optische Medien in den Strahlengang halten. Wir nehmen zuerst eine rote Glasscheibe und beobachten, daß das Spektrum nur noch aus dem roten Teil besteht. Die übrigen Spektralfarben sind von der roten Scheibe verschluckt (absorbiert¹⁾) worden. Das entstandene Spektrum heißt Absorptionsspektrum. Die Vereinigung des durchgelassenen Lichtes gibt uns die Farbe, die wir an der Glasplatte sehen. Ein blaues Stück Glas läßt außer blauen noch einen Teil der roten Spektralfarben hindurch, absorbiert also Gelb und Grün. Nun halten wir ein Stück Neophanglas, das keine solche ausgesprochene Farbe wie das rote oder blaue Glas hat, sondern in der Durchsicht nur schwach violett erscheint, in den Strahlengang und sehen, daß vor allem der gelbe Teil des Spektrums absorbiert worden ist. Auch hier gibt die Vereinigung der hindurchgelassenen Spektralfarben wieder den Farbton des Glases. Die genaue Lage der Absorptionsstreifen können wir am besten mit Hilfe des Spektralapparates erkennen.

Wir prüfen die Absorption von Flüssigkeiten, z. B. von Wasser, in dem Kaliumpermanganat aufgelöst ist, oder von Wasser, das einige Tropfen Blut enthält; immer finden wir, daß aus dem Spektrum bestimmte Teile verschluckt sind und daß die Lage dieser Absorptionsstellen bei jedem Stoff anders ist. Auch mit Gasen können wir diesen Versuch machen. Wir nehmen z. B. ein Glasröhrchen mit Stickstoffdioxid und finden wieder ein bestimmtes Absorptionsspektrum. Nun nehmen wir ein Kugelrohr, in dem Natriummetall eingeschmolzen ist, und erwärmen das Metall; dann füllt sich die Kugel mit Natriumdampf. Wir halten die Kugel in den Strahlengang, es erscheint im gelben Teil des Spektrums eine dunkle Absorptionslinie. Wir hatten schon gesehen, daß das Emissionsspektrum des Natriumdampfes aus einer gelben Linie besteht. Nun achten wir auf die Lage der Absorptionslinie des Natriums und entwerfen dann nochmals das Emissionsspektrum des Natriums. Wir stellen fest, daß Absorptions- und Emissionslinie an der gleichen Stelle liegen. Dasselbe Ergebnis würde die Untersuchung bestimmter Emissions- und Absorptionslinien anderer Elemente liefern. Wir fassen zusammen:

1) absorbère (lat.) = aufsaugen

Das Absorptionsspektrum eines Stoffes ist für den Stoff kennzeichnend. Das von einem Element ausgesandte Emissionsspektrum enthält Linien, die unter bestimmten Bedingungen von diesem Element absorbiert werden.

2. Fraunhofersche Linien. Das Spektrum des Sonnenlichtes scheint bei flüchtiger Betrachtung kontinuierlich zu sein, eine genauere Untersuchung zeigt aber, daß es sehr viele dunkle Linien enthält. Sie wurden von Fraunhofer entdeckt (1814) und werden nach ihm benannt. Ihre Entstehung als Absorptionslinien wurde erst durch Kirchhoff und Bunsen erklärt (1860). Die Strahlung, die aus dem Innern der Sonne kommt, durchdringt die äußere Sonnenhülle und wird dort z.T. absorbiert. Aus der Lage der dunklen Linien kann man erkennen, welche Stoffe in der durchsetzten Schicht vorhanden sind.

Auf diese Weise konnten fast alle irdischen Elemente auf der Sonne nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung des Sonnenspektrums konnte man anfangs nicht alle Absorptionslinien deuten und schloß auf unbekannte Elemente. So wurde 1868 ein Element auf der Sonne vermutet, das man als Helium bezeichnete. Erst 1895 konnte dann sein Vorkommen auf der Erde auf Grund der entsprechenden Emissionslinien nachgewiesen werden.

§ 22. Körperfarben

1. Lichtabsorption und Körperfarben. Wir fangen jetzt das Spektrum von weißem Lichte auf einem roten, dann auf einem blauen Stück Papier auf und sehen, daß nur die Teile des Spektrums, die im roten und angrenzenden gelben bzw. im blauen und angrenzenden grünen Spektralgebiet liegen, aufleuchten. Die anderen Spektralfarben werden von dem Papier verschluckt. Im Gegensatz zu den Spektralfarben bezeichnet man die Körperfarben als Pigmentfarben¹⁾. Fassen wir dieses Ergebnis mit dem an durchsichtigen Körpern gefundenen zusammen, so erkennen wir:

Die Körperfarben entstehen dadurch, daß von dem Körper aus dem weißen Licht bestimmte Teile des Spektrums absorbiert werden.

Die Farben Weiß, Grau und Schwarz entstehen, 1. wenn die Absorption im gesamten Spektrum gleichmäßig ist – bei Weiß ist sie sehr klein, bei Schwarz sehr groß – und 2. wenn das Spektrum nach der Absorption das zweier Ergänzungsfarben ist. Diese zweite Behauptung wollen wir mit dem Farbenkreisel prüfen: Wir nehmen eine Kreisscheibe, bei der abwechselnd Sektoren mit blauem und gelbem Papier beklebt sind, und lassen sie rotieren. Die Mischung der von dem gelben und von dem blauen Papier reflektierten Strahlung ruft einen weißgrauen Farbeneindruck hervor. Bei diesem Verfahren wird farbiges Licht im Auge des Beobachters gemischt (Additive Farbmischung). Blaue Pigmentfarben reflektieren außer dem blauen Teil des Spektrums auch den grünen, eine gelbe Pigmentfarbe reflektiert außer dem gelben

1) pigmentum (lat.) = Farbstoff

Teil ebenfalls den grünen. Mischen wir nun eine blaue und eine gelbe Pigmentfarbe, dann reflektiert die Mischung nur den Teil des Spektrums, der von keiner der beiden Pigmentfarben absorbiert wird, also Grün. So erklärt es sich, daß der Maler durch Mischung von blauer und gelber Farbe eine grüne Pigmentfarbe herstellen kann.

Eine ähnliche Erscheinung liegt vor, wenn Licht durch mehrere durchsichtige Schichten (Filter) hindurchgeht. Von dem eintretenden Licht bleiben dann nur die Farben übrig, die von keiner der Schichten absorbiert worden sind. Die Farbe des austretenden Lichtes ist in diesem Falle eine Mischfarbe des übriggebliebenen farbigen Lichtes (Subtraktive Farbmischung).

2. Abhängigkeit der Körperfarben von der Lichtzusammensetzung. Wir haben festgestellt, daß die Farben der Gegenstände durch die unterschiedliche Absorption der einzelnen Lichtarten des Spektrums zustande kommen. Wir ordnen dabei dem Gegenstand die Farbe zu, die durch Absorption von Teilen des Spektrums des Sonnenlichtes entsteht. Bei künstlicher Beleuchtung behält er diese Farbe nur, wenn die zur Beleuchtung benutzte Lichtquelle ein Spektrum hat, das dem der Sonne ähnlich ist. Sehr einfach können wir uns von der Veränderung der Körperfarben bei Beleuchtung mit nichtweißem Licht überzeugen: Wir schalten eine Glühlampe mit rotem Farbenüberzug – eine sogenannte Dunkelkammerlampe – ein und beleuchten ein Stück weißes Papier; es erscheint rot, ein grüner Stoff erscheint schwarz, nur rote Stoffe bleiben rot. Diese krassen Farbänderungen kommen bei den üblichen künstlichen Beleuchtungen nicht vor. Bei dem Vergleich des Sonnenspektrums mit dem der Glühlampe sahen wir aber, daß im Glühlampenspektrum verhältnismäßig wenig blaues, aber viel rotes Licht enthalten ist. Diese Verschiedenheit der Spektren bedingt schon eine Farbänderung für viele Körperfarben. Muß man z. B. die Zusammenstellung von verschiedenfarbigen Stoffen, die bei Tageslicht aufeinander abgestimmt erscheinen sollen, bei künstlichem Licht vornehmen, so erhält man nur dann eine gute Abstimmung, wenn man mit sog. „künstlichem Tageslicht“ beleuchtet. Das künstliche Tageslicht wird in den meisten Fällen aus Glühlampenlicht hergestellt. Man läßt dieses, ehe es zur Beleuchtung benutzt wird, durch eine dünne bläuliche Glasscheibe hindurchgehen. Dadurch werden die roten Anteile des Glühlampenlichtes stärker als die blauen absorbiert, der Lichtstrom wird dadurch geschwächt, aber die spektrale Zusammensetzung wird der des Sonnenlichtes besser angeglichen.

§ 23. Lichterzeugung

1. Glühlampen. Für Beleuchtungszwecke wird am häufigsten die Glühlampe benutzt. Wir wissen, daß in ihr ein Draht aus Wolframmetall, der zu einer Wendel gewickelt ist, zum Glühen gebracht wird. Wir rufen uns die Kennzeichnung dieser Lampen ins Gedächtnis zurück. Sie sind für 15, 25, 40,

100 Watt usw. zu haben. Außerdem muß man, um die richtige Lampe zu erhalten, die Spannung des Lichtnetzes, an das man sie anschließen will, angeben. Wir schalten jetzt eine Glühlampe über einen Widerstand in das Lichtnetz ein, legen also nicht die volle Spannung an die Glühlampe. Allmählich verringern wir den Widerstand, erhöhen also die an der Glühlampe liegende Spannung, und zwar so lange, bis der Endwert erreicht ist. Wir beobachten dabei die Wolframwendel und sehen, daß sie bei einer gewissen Spannung anfängt zu glühen; sie ist dann auf eine Temperatur von etwa 600°C erwärmt. Das ausgesandte Licht hat eine rote Farbe. Bei Vergrößerung der Spannung erwärmt sich die Wendel immer mehr, ihre Temperatur steigt, sie sendet rotgelbes, gelbliches und schließlich weißes Licht aus; die entsprechenden Temperaturen sind etwa 1200°C , 1800°C und 2600°C . Die Größe des Lichtstromes nimmt mit Erhöhung der Temperatur sehr stark zu (vgl. Tabelle S. 80). Würden wir den Versuch weiterführen, an die Lampe also Spannungen legen, die höher sind als die, für die sie gebaut ist, dann würden wir eine weitere große Steigerung des Lichtstromes beobachten, aber wir würden die Lampe zerstören. Ihr Glühkörper hält nur kurze Zeit eine höhere Temperatur als die beim Brennen an normaler Spannung erreichte aus; er brennt bei höherer Temperatur bald an irgendeiner Stelle durch. — Die Temperatur des Glühdrahtes liegt weit unterhalb der Temperatur der Sonne. Aus der bei Temperatursteigerung beobachteten Farbänderung des Lichtes der Glühlampe können wir ersehen, daß das Spektrum des Wolframs bei tieferen Glühtemperaturen vor allem rotes Licht enthält und daß bei Temperatursteigerung allmählich auch gelbes, grünes und schließlich blaues Licht ausgesandt wird (wir sahen dies ja schon in § 20, 2). Denselben Farbgang können wir bei allen glühenden Körpern feststellen, nur daß wir bei anderem Material den Versuch schon bei tieferen Temperaturen abbrechen müssen, da Glühkörper aus anderen Stoffen schon bei einer tieferen Temperatur zerstört werden. Wir können keinen festen Körper auf die Temperatur der Sonne erhitzen, also auch nicht ein Licht gleicher Farbzusammensetzung herstellen.

2. Kohlebogenlampen. Bei dem Kohlelichtbogen leuchten die Enden der Kohlen (der Elektroden), zwischen denen der Lichtbogen brennt. Bei den sog. Effektkohlebogenlampen geht außerdem Licht von leuchtenden Gasen (Flammen) zwischen den Elektroden aus. Kohlebogenlampen werden überall dort benutzt, wo man große Lichtströme und hohe Leuchtdichten (s. § 24) benötigt, z. B. bei großen Projektionsapparaten. Die Temperatur der glühenden Kohlen einer Kohlebogenlampe beträgt etwa 3500°C .

3. Leuchtröhren. Neben Glühlampen und Kohlebogenlampen kennen wir als weitere Lichtquellen die sog. Leuchtröhren. Sie wurden früher vor allem zur Reklamebeleuchtung benutzt, finden aber jetzt immer mehr Verwendung für Raum- und Straßenbeleuchtung. In ihnen leuchtet ein elektrisch

angeregtes Gas. Das Gas sendet dabei das ihm eigentümliche Spektrum aus (s. § 20, 3), meist ein Linienspektrum. Da dieses im allgemeinen nur wenige Linien enthält, erscheint das Licht gefärbt. Enthält die Leuchtröhre Natrium, so ist ihr Licht rein gelb, enthält sie Neon, so ist ihr Licht rötlich; Quecksilberdampf leuchtet bläulich. Die Erwärmung der Röhre ist im allgemeinen nur gering. Man spricht daher von kaltem Licht.

Die zur Raumbeleuchtung benutzten Röhren haben auf der Glaswand einen Überzug aus Phosphoren (Luminophoren) (s.u. unter 5). Sie sind mit Quecksilber beschickt. Die Strahlung des Quecksilberdampfes regt diese Stoffe zur Lichtaussendung an. Die Phosphore senden im Gegensatz zu dem Linienspektrum des Quecksilberdampfes ein breites Spektralband aus, dessen Lage und Ausdehnung in weiten Grenzen durch Verwendung von Phosphoren verschiedener Zusammensetzung einflußbar ist. Man benutzt Phosphore, die wenig nachleuchten.

Zur Übung: Warum kann man die Farbe des Lichtes einer Natriumleuchtröhre durch Benutzung gefärbten Glases nicht ändern?

4. Chemolumineszenz. Wir lernten bisher nur die Lichterzeugung durch Erhitzen fester Körper und durch Anregung von Gasen in der elektrischen Entladung kennen. Nun beobachten wir in der Natur auch Lichterscheinungen, die auf eine andere Weise hervorgerufen werden. Wir denken z.B. an das Leuchten von Phosphor und faulendem Holz, an das Leuchten der Glühwürmchen und an das Meeresleuchten. Diese Leuchterscheinungen entstehen beim Ablauf chemischer Prozesse und verbrauchen einen Teil der dabei freiwerdenden Energie. Man nennt sie *Chemolumineszenz*.

5. Leuchtfarben. Uns allen sind die Leuchtknöpfe bekannt, die im dunklen Zimmer das Auffinden des Lichtschalters erleichtern, oder die Leuchtzahlen auf den Weckern. Wir haben es bei diesen Leuchtfarben — Luminophoren oder Phosphoren — nicht mit selbstleuchtenden Körpern zu tun, sondern mit nachleuchtenden Körpern. Die Leuchtfarben haben nämlich die Eigenschaft, eingestrahktes Licht sozusagen aufzuspeichern und dann erst allmählich wieder auszustrahlen. Wir können durch einen Versuch feststellen, daß die Leuchtfarben keine Selbstleuchter sind, müssen aber die Prüfung über mehrere Tage erstrecken. Heute sehen wir, daß die Leuchtfarbe, die bis kurz zuvor dem Licht ausgesetzt war, im Dunklen hell leuchtet. Wir legen sie in einen lichtundurchlässigen Kasten und finden, wenn wir sie nach etwa zwei Tagen im verdunkelten Zimmer herausnehmen, daß die Leuchtfarbe kein Licht mehr aussendet. Belichten wir sie von neuem, geben ihr also Gelegenheit, wieder Licht zu speichern, so sehen wir nach Verdunklung des Zimmers, daß sie erneut hell leuchtet. Die Farbe des ausgestrahlten Lichtes und die Dauer des Nachleuchtens hängen von der chemischen Zusammensetzung der Leuchtfarben ab.

§ 24. Photometrie

Die Lichttechnik beschränkt sich nicht darauf, Lichtquellen herzustellen, sondern sie untersucht auch, wie eine Beleuchtung, die ausreichend und zugleich wirtschaftlich ist, zustande kommt. Die dazu nötigen Untersuchungen und Messungen bilden ein besonderes Gebiet der Physik, das *Photometrie* genannt wird.

1. Photometrisches Entfernungsgesetz. Wir wissen bereits, daß bei einer punktförmigen Lichtquelle der Querschnitt eines Lichtstrahlenbündels mit dem Quadrat des Abstandes von der Lichtquelle zunimmt (§ 11). Fällt Licht auf einen Auffangschirm, der senkrecht auf der Verbindungslinie zwischen Lichtquelle und Schirm steht, so wird von ihm ein Teil des Lichtstroms aufgefangen, dessen Größe dem Quadrat des Abstandes zwischen Schirm und Lichtquelle umgekehrt proportional ist. Man nennt das Verhältnis der Größe des Lichtstromes zu der Flächengröße des Schirmes die Beleuchtungsstärke auf dem Schirm.

Die Beleuchtungsstärke auf einem Auffangschirm, der sich senkrecht zu der Verbindungslinie zwischen Lichtquelle und Schirm befindet, ist dem Quadrat der Entfernung zwischen Lichtquelle und Auffangschirm umgekehrt proportional.

Stellt man den Schirm schräg zum Lichtstrom, so wird er von einem kleineren Teil des Lichtstromes getroffen, seine Beleuchtungsstärke ist kleiner.

Lichtmessungen beruhen immer auf dem Vergleich von Beleuchtungsstärken.

2. Lichtstärke. Die Teile des Lichtstromes, die von einer Lichtquelle in die verschiedenen Richtungen des umgebenden Raumes ausgesandt werden, sind nicht gleich groß. Man muß also zur Bestimmung des gesamten Lichtstromes die Lichtströme in den einzelnen Richtungen messen. Die Lichtquelle sei der Mittelpunkt einer Kugel vom Halbmesser 1 m, die Kugeloberfläche hat die Größe $4\pi \text{ m}^2$. Man sagt, der gesamte Raumwinkel, in den die Lichtquelle strahlt, ist 4π . Der Begrenzungskegel des Raumwinkels 1 schneidet also auf der Einheitskugel die Fläche 1 m^2 heraus. Den Lichtstrom, der von der Lichtquelle in den Raumwinkel 1 in einer bestimmten Richtung ausgesandt wird, bezeichnet man als Lichtstärke der Lichtquelle in dieser Richtung.

3. Einheit der Lichtstärke. Alle lichttechnischen Messungen werden an eine bestimmte Lichtquelle angeschlossen. Bis 1941 war dies in Deutschland die Flamme der Hefnerlampe; die Lichtstärke der Hefnerlampe in horizontaler Richtung war die Lichtstärkeneinheit; sie wurde eine Hefnerkerze (HK) genannt. Fast dieselbe Lichtstärke besitzt eine Stearinkerze von 2 cm Durchmesser bei einer Flammenhöhe von 5 cm.

Seit 1941 ist die Einheit der Lichtstärke die Neue Kerze (NK). Diese weicht nicht viel von der Hefnerkerze ab ($1 \text{ NK} = 1,111 \text{ HK}$).

4. Einheit des Lichtstromes. Eine Lichtquelle, die in allen Richtungen des Raumes die Lichtstärke 1 NK hat, sendet einen Lichtstrom von 4π Lumen (lm) aus. Als Beispiel sei eine 40-Watt-Lampe gewählt, deren Leuchtkörper eine Wendel aus Wolframdraht ist, die in einer Ebene senkrecht zur Symmetrieachse der Glühlampe angeordnet ist. Die Lichtstärke ist in den verschiedenen Richtungen des Raumes verschieden groß, besonders klein in Rich-

tung des Sockels, denn hier schirmt der Sockel den Lichtstrom ab; besonders groß in der entgegengesetzten Richtung; hier beträgt sie etwa 48 NK. Berechnet man den Gesamtlichtstrom, so ergibt sich dieser zu etwa 480 lm.

5. Einheit der Beleuchtungsstärke. Wird auf eine 1 m^2 große Fläche der Lichtstrom 1 lm gleichmäßig verteilt, so herrscht überall die Beleuchtungsstärke 1 Lux^1 (lx). Als Beispiel sei wieder die 40-Watt-Lampe gewählt, deren Sockel der Decke zugekehrt ist. Man erhält mit ihr auf einer Tischplatte, die sich 1,5 m unter der Lampe befindet, eine Beleuchtungsstärke von 21 lx.

6. Lichtmenge ist das Produkt aus Lichtstrom und Zeit.

7. Lichtmessung. Wir führen jetzt eine Lichtmessung aus und benutzen dazu ein ganz einfaches Photometer, das Bunsensche Fettfleckphotometer (Abb. 113). Sein wesentlicher Bestandteil ist ein weißer Papierschirm, in dessen Mitte sich ein Fettfleck befindet. Der Fettfleck reflektiert von dem auffallenden Licht weniger als das übrige Papier, er läßt aber mehr Licht hindurch. Wird der Schirm nur von einer Seite beleuchtet, so erscheint der Fettfleck auf der der Lichtquelle zugekehrten Seite („im auffallenden Licht“)

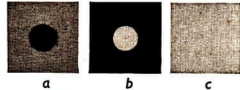


Abb. 113. Fettfleck, von vorn, von hinten, von beiden Seiten beleuchtet

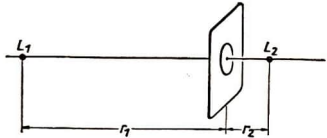


Abb. 114. Schema des Fettfleckphotometers

dunkel auf hellem Grund (Abb. 113a), auf der entgegengesetzten Seite („im durchfallenden Licht“) hell auf dunklem Grund (Abb. 113b). Beleuchten wir den Schirm von beiden Seiten mit je einer Lichtquelle (L_1 und L_2 , Abb. 114), so können wir durch Veränderung der Entfernung der einen Lichtquelle vom Schirm erreichen, daß der Fettfleck fast unsichtbar wird (Abb. 113c). Dann ist die Beleuchtungsstärke auf der einen Seite des Schirmes ebenso groß wie auf der anderen.

Ist die Lichtstärke J_1 der Lampe L_1 bekannt, und hat L_1 vom Schirm den Abstand r_1 , L_2 dagegen den Abstand r_2 , so läßt sich die unbekannte Lichtstärke J_2 aus dem photometrischen Entfernungsgesetz berechnen. Die Beleuchtungsstärken E_1 und E_2 sind gleich. Von dem in Richtung zum Schirm ausgesandten Lichtstrom von L_1 fällt ein Teil, der umgekehrt proportional r_1^2 ist, auf den Schirm, von L_2 ein Teil, der umgekehrt proportional r_2^2 ist. Die Lichtstärken der Lichtquellen sind also den Quadraten der Entfernungen proportional:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}, \quad J_2 = J_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

1) lux (lat.) = Licht

Zur Übung: Wie groß ist die Lichtstärke einer Lampe, wenn die Beleuchtungsstärke in 3 m Abstand ebenso groß ist wie die durch eine Lichtquelle von 40 NK in der Entfernung 2 m erzielte?

8. Leuchtdichte: Beträgt die Lichtstärke einer ebenen, 1 cm^2 großen Fläche einer Lichtquelle in senkrechter Richtung 1 NK, so sagt man, ihre Leuchtdichte ist 1 Stilb¹⁾ (sb.)

§ 25. Lichttechnische Daten

1. Lichttechnische Daten von Lichtquellen. Wir kennen nun die Größen, durch die man die Lichtstrahlung kennzeichnet, und können die in nachstehender Tabelle gebrachten Daten verstehen.

Lichtquelle	Spannung V	Leistung W	Licht- strom lm	Licht- ausbeute lm/W	Temperatur des Leucht- körpers (ungefähre Werte) °C	Leuchtdichte des Leucht- körpers sb
Kohlefaden- lampe	220	55	160	2,93	1850	75
Wolframlampe	110	15	150	10	2200	220
Wolframlampe	110	40	480	12	2450	660
Glühlampe f. Pro- jektionszwecke	30	900	24 070	26,7	2900	2540
Leuchtstoff- lampe HNG (Osram)	220	31	1300	44	—	0,4
Sonne					5600	100 000 bis 150 000

Wir ersehen aus der Tabelle, in welchem hohem Maße die Leuchtdichte mit der Temperatur zunimmt. Wir sehen ferner, daß die Lichtausbeute, das ist das Verhältnis zwischen Lichtstrom (lm) und aufgenommener Leistung (W), bei erhitzten festen Körpern sehr stark mit der Temperatur ansteigt. Je höher die Temperatur ist, um so größer ist der Lichtstrom, den wir durch glühende feste Körper mit 1 Watt erzeugen können. Wie das Beispiel der Leuchtstofflampe zeigt, kann man mit Hilfe von elektrisch angeregtem Quecksilberdampf und Leuchtstoffen eine bedeutend größere Lichtausbeute erzielen als mit glühenden festen Körpern.

2. Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Mondlicht. Der höchste Wert der Beleuchtungsstärke, die in unseren Breiten bei Sonnenlicht auftritt, ist etwa

1) stilbó (griech.) = ich glänze

100000 lx. Bei Vollmond ist die Beleuchtungsstärke etwa 0,2 lx, in einer klaren Nacht ohne Mondschein $3 \cdot 10^{-4}$ lx.

Wir können bei vollständiger Dunkeladaptation beim Dämmerungssehen noch eine Lichtquelle wahrnehmen, durch die auf dem Auge eine Beleuchtungsstärke von etwa 10^{-9} lx hervorgerufen wird. Die niedrigste Leuchtdichte, die das Auge wahrnehmen kann, ist etwa $3 \cdot 10^{-10}$ sb. Vollständiges Dämmerungssehen tritt bei Beleuchtungsstärken unter 0,1 lx auf.

§ 26. Geschichtliche Entwicklung

Im Altertum nahm man an, das Sehen käme in der Weise zustande, daß das Auge geradlinige Strahlen aussende, die auf die sichtbaren Körper träfen und sie gewissermaßen betasteten. Man verwendete damals schon Spiegel aus Metall, sowohl Planspiegel als auch Hohlspiegel und erhabene Spiegel. Hohlspiegel haben zum Erzeugen von Feuer, besonders von Opferfeuern, gedient. Es sind auch Sammellinsen zu diesem Zwecke benutzt worden. Der Schliff dieser Linsen war allerdings noch sehr ungleichmäßig.

Das Reflexionsgesetz ist schon im 3. Jahrhundert v. u. Ztr. bekannt gewesen. Die Ablenkung des Lichtes bei der Brechung ist ebenfalls schon von griechischen Forschern untersucht worden, doch wurde das Brechungsgesetz in der heutigen Form erst um das Jahr 1618 von dem holländischen Physiker Snellius ausgesprochen. Die Totalreflexion ist von dem deutschen Astronomen Kepler (1571–1630) etwa um dieselbe Zeit entdeckt worden.

Von der vergrößernden Wirkung gläserner Kugelsegmente hat zuerst der arabische Gelehrte Alhazen im 11. Jahrhundert berichtet. Er hat auch als erster auf die Bedeutung der Augenlinse für die Entstehung des Bildes im Auge hingewiesen. Die Erfindung der Augengläser wird dem Florentiner Salvino degli Armati zugeschrieben, der im 13. Jahrhundert lebte. Sicher ist, daß sich im 14., 15. und 16. Jahrhundert in Italien und besonders in Flandern das Handwerk der Brillenmacher entwickelt hat.

Die Lochkamera war schon im 13. Jahrhundert bekannt. Die Kamera mit Linse ist zuerst von dem Neapolitaner della Porta im 16. Jahrhundert beschrieben worden.

Um 1590 soll der Glasschleifer Jansen in Holland ein Mikroskop gebaut haben. Die Erfindung wurde von dem englischen Physiker Hooke im 17. Jahrhundert verbessert.

Im Jahre 1608 verbreitete sich von Holland aus die Kunde von der Erfindung des Fernrohres. Die Brillenmacher Jansen und Lippershey hatten die vereinte Wirkung einer Konvex- und einer Konkavlinse erkannt.

Noch in demselben Jahr hörte der italienische Physiker Galilei (1564–1642) von der Erfindung des Fernrohres. Er baute sich nach der Beschreibung ein Fernrohr aus einer Konvex- und einer Konkavlinse. Mit diesem Instrument machte Galilei in den Jahren 1610 bis 1612 wichtige astronomische Entdeckungen. Er stellte fest, daß der Planet Jupiter 4 Monde besitzt, daß der Planet Venus Lichtphasen wie der Mond zeigt und daß auf der Sonne dunkle Sonnenflecken entstehen und verschwinden. Er erkannte die Berge auf dem Mond.

Um dieselbe Zeit beschäftigte sich der deutsche Astronom Johannes Kepler mit der Konstruktion von Fernrohren und den Wirkungen, die Zusammenstellungen verschiedener Linsen zeigen. Dabei erkannte er, daß aus zwei Sammellinsen ein Fernrohr gebildet werden könnte. Er hat zum erstenmal besonders darauf hingewiesen, daß von einem leuchtenden Punkt nicht nur ein einziger Strahl, sondern ein ganzes Strahlenbündel ausgeht und daß dieses Strahlenbündel durch die Augenlinse in einem Punkt vereinigt werden muß, wenn ein deutliches und scharfes Bild entstehen soll. So hat er den Grund zur modernen Optik gelegt. Das von ihm erfundene Fernrohr ist von dem Jesuitenpater Scheiner einige Jahre später zuerst gebaut und zu erfolgreichen Beobachtungen und Entdeckungen am Sternenhimmel benutzt worden.

Achromatische Linsen sind erst um die Mitte des 18. Jahrhunderts von dem Engländer Dollond hergestellt worden. In Deutschland entstand im 19. Jahrhundert an vielen Orten (Rathenow, Jena) eine blühende optische Industrie. Die erzielten Fortschritte hingen erheblich von der Entwicklung der Glashütten ab, die es allmählich lernten, Glassorten mit



Joseph
von Fraunhofer
(1787–1826)

den erforderlichen optischen Eigenschaften herzustellen. Die optischen Instrumente sind anfänglich im wesentlichen auf Grund praktischer Erfahrungen entstanden. Erst als es gelang, Theorie und Praxis zu verbinden, wurden wesentliche Fortschritte erzielt. Joseph von Fraunhofer (1787–1826) und Ernst Abbe (1840–1905), der Schöpfer der Zeißwerke-Jena, haben hervorragenden Anteil an dieser Entwicklung. Die Firma Zeiß baute das erste Prismenfernrohr gegen Ende des 19. Jahrhunderts.

Die Frage nach der physikalischen Natur der Farben ist erst spät gelöst worden. In den Jahren zwischen 1666 und 1704 hat der englische Physiker Isaac Newton (1643–1727) umfangreiche Untersuchungen über die Zerlegung des Lichtes durch das Prisma angestellt. Er hat dann die Ansicht vertreten und experimentell begründet, daß weißes Licht aus farbigen Lichtarten zusammengesetzt sei. Er hat die Körperfarben richtig erklärt und auf den Unterschied zwischen den einfachen und zusammengesetzten Farben hingewiesen. Es hat sehr lange gedauert, bis man allgemein diese Farbenlehre anerkannt hat.

Die dunklen Linien im Spektrum der Sonne sind zuerst von dem Optiker Joseph Fraunhofer in München untersucht worden (1814).

Kirchhoff und Bunsen haben 1860 das Entstehen der Fraunhoferschen Linien erklärt und gezeigt, daß Spektren leuchtender oder absorbierender Dämpfe zur chemischen Analyse benutzt werden können. Verfahren zur photographischen Bilderzeugung wurden zwischen 1820 und 1840 erfunden. Daguerre gelang es, Bilder auf bromierten Silberplatten hervorzurufen. Der Engländer Talbot erzeugte sie zuerst auf Papier.

ASTRONOMIE

A. Scheinbare Bewegungen der Sonne und der anderen Fixsterne

§ 27. Orientierung in der Horizontebene

Wir begeben uns an einen Ort unserer Umgebung, wo unser Blick nicht durch Häuser, Bodenerhebungen usw. gehemmt wird. Dann überblicken wir ein fast ebenes Stück der Erdoberfläche. Über uns wölbt sich der Himmel, und wir sehen bei Tage, wie die Sonne, bei Nacht, wie die Sterne und der Mond am Firmament ihre Kreise beschreiben. Wir können nicht schätzen, wie weit die Gestirne von uns entfernt sind; wer es versuchte, würde sich, wie wir sehen werden, gewaltig irren. Deshalb ist es auch belanglos, daß infolge einer optischen Täuschung das Himmelsgewölbe in waagerechter Richtung weiter ausgedehnt zu sein scheint als in lotrechter Richtung; wir betrachten

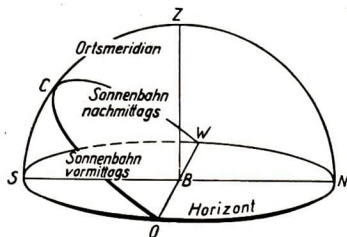


Abb. 115. Horizont und Ortsmeridian

es als eine Halbkugel, die durch eine unter unseren Füßen liegende, uns unsichtbare Halbkugel zur Himmelskugel ergänzt wird.

Die Kreislinie, in der das Himmelsgewölbe auf der Erdoberfläche zu ruhen scheint, heißt unser **Horizont**¹⁾. Die im Standort des Beobachters (B in Abb. 115) auf der Horizontebene errichtete Lotrechte zeigt zu einem Punkte der Himmelskugel hin, der als **Scheitelpunkt** oder **Zenit**²⁾ (Z) bezeichnet wird. Es ist einerlei, ob wir ihn uns 100 km oder 1000 000 km oder noch viel weiter entfernt denken. Der ihm diametral gegenüberliegende Punkt auf der uns unsichtbaren Halbkugel heißt **Nadir**²⁾.

Da wir die Entfernungen der Himmelskörper von uns zunächst nicht kennen, können wir auch ihren Abstand voneinander nicht in Längen-, sondern nur in Winkelmaß angeben. Der Zenit hat von jedem Punkte des Horizontes die Entfernung 90°. Sind zwei Sterne um 10° voneinander entfernt, so sieht

1) horizein (griech.) = begrenzen

2) Die Worte Zenit und Nadir stammen aus dem Arabischen.

diese beiden Schatten bilden, ist die Nordsüd- oder Mittagslinie. Indem man mehrere Kreise benutzt, kann man die Beobachtungsfehler ausgleichen.

Statt einen Stab zu verwenden, kann man auch das Sonnenlicht durch eine kleine Öffnung fallen lassen, die in einem vertikal aufgestellten Schirm angebracht ist, und beobachten, wann das auf der Horizontebene wandernde Sonnenbildchen einen der konzentrischen Kreise passiert, die um den Fußpunkt der von der Öffnung ausgehenden Lotrechten beschrieben sind. Die Öffnung entspricht dann dem oberen Ende des Stabes.

Stellen wir unsere Beobachtungen an verschiedenen Tagen an, so finden wir, daß beim höchsten Sonnenstande der Schatten des Stabes stets in dieselbe Richtung fällt:

Also erreicht die Sonne ihren höchsten Stand an allen Tagen des Jahres auf dem Meridian des Beobachtungsortes.

§ 28. Orientierung am Sternhimmel

1. Fixsterne. Etwa eine Stunde nach Sonnenuntergang werden am Himmel mehr und mehr Sterne sichtbar. Die weitaus meisten von ihnen ändern ihre gegenseitige Lage nicht. Wohl aber erkennen wir im Verlauf einer Stunde, daß sie zueinander parallele Kreisbogen zurückgelegt haben, als ob sie an der sich drehenden Himmelskugel angeheftet wären; sie heißen deshalb Fixsterne¹⁾. Schon die Phantasie der ältesten Völker vereinigte gewisse Fixsterne zu Gruppen, die man **Sternbilder** nennt. Ein Sternbild, das wir in sternklarer Nacht immer irgendwo am Himmel finden, ist der Große Wagen, der die bekanntesten Sterne des Großen Bären umfaßt (Abb. 117). Man bezeichnet die einzelnen Sterne

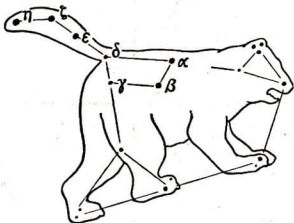


Abb. 117. Der Große Bär mit dem Großen Wagen

eines jeden Sternbildes mit griechischen Buchstaben; die hellsten Sterne haben außerdem besondere Namen, die meistens aus dem Arabischen stammen. Die Sterne α , β , ϵ , ζ , η des Großen Wagens sind Sterne zweiter Größe. Nur etwa 20 Fixsterne sind noch heller und heißen Sterne erster Größe. γ und δ des Großen Wagens sind dritter Größe. In nächster Nähe von ζ steht ein Stern vierter Größe, das „Reiterlein“, das zur Prüfung der Augen dient; doch sehen gute Augen unter günstigen Umständen auch noch Sterne fünfter und sechster Größe. Im ganzen sind auf der nördlichen Halbkugel dem unbewaffneten Auge höchstens 3000 Sterne sichtbar (Genaueres s. § 43).

1) fixus = angeheftet, von figere (lat.) = anheften

Wenn wir die Sterne nach ihrer Helligkeit in Größenklassen einteilen, so hat das mit dem wirklichen Rauminhalt und der wirklichen Lichtstärke der Sterne nichts zu tun; es soll vielmehr nur ausgedrückt werden, wie hell die Sterne uns erscheinen. Ein Stern sechster Größe kann einen sehr viel größeren Durchmesser und eine sehr viel größere Lichtstärke als ein Stern erster Größe haben. Dies ist der Fall, wenn er von uns die millionenfache Entfernung hat.

Wir erwähnen schon hier, daß die Sternbilder durchaus nicht immer eine zusammengehörige „Familie“ bilden. So stehen die 5 Sterne des W der Kassiopeia nur für unser Auge, perspektivisch, zusammen; in Wirklichkeit braucht das Licht, das die Strecke von der Sonne bis zur Erde in 8 Minuten zurücklegt, um von einem dieser Sterne zu uns zu gelangen, vielleicht „nur“ einige Jahrzehnte, von andern aus aber viele Jahrhunderte.

2. Die Himmelsachse. Verlängert man die Verbindungsgrade der Sterne β und α des Großen Wagens fünfmal um sich selbst, so kommt man zu einem Stern zweiter Größe, der Polarstern heißt. In ihm endet die Deichsel des Kleinen

Wagens. In seiner nächsten Nähe liegt der Himmelsnordpol. Wir verbinden ihn mit unserem Standort; die Verlängerung der Verbindungslinie weist zum Himmels-südpol.

Man unterscheidet Himmelsnord- und Himmels-südpol kürzer auch als **Pol** und **Gegenpol**. Die Gerade Pol-Auge-Gegenpol heißt Himmelsachse (Abb. 118). Betrachten wir von Stunde zu Stunde den Sternhimmel, so erkennen wir, daß er sich um die Himmelsachse dreht. Durch Beobachtungen an Mond und Sonne stellen wir fest, daß auch diese sich um die Himmelsachse drehen.

Wenn der Mittelpunkt der Sonne morgens über unserem östlichen Horizont sichtbar wird, sagen wir

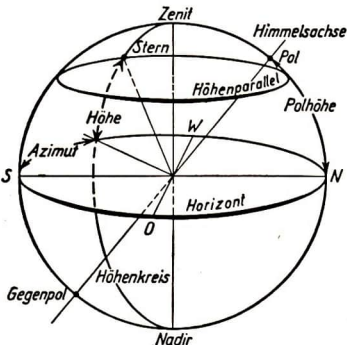


Abb. 118. Das Horizontsystem

(Der Stern und sein Höhenkreis liegen auf der hinteren Halbkugel. Die Ebenen des Höhenparallels und des Horizonts sind undurchsichtig gedacht; daher ist der Höhenkreis zum Teil gestrichelt gezeichnet).

„die Sonne geht auf“; an jedem Abend „geht sie im Westen unter“. Die Aufgangspunkte der Fixsterne verteilen sich auf den ganzen Halbkreis Nord-Ost-Süd.

Der Winkel, den die Himmelsachse mit der Horizontalebene bildet, heißt **Polhöhe**. Um sie angenähert zu messen, stellen wir aus zwei Stäben eine Art Zirkel her, den wir mit einer Gradteilung versehen. Wir lagern den einen Schenkel horizontal und lassen ihn zum Nordpunkt zeigen; dem anderen geben wir

die Richtung zum Himmelspol, indem wir an ihm entlang visieren. So finden wir, daß die Polhöhe in unserer geographischen Breite rund 50° beträgt.

3. Das Horizontsystem. Um eine Stelle der Himmelskugel, z. B. den Ort eines Sternes, zu bezeichnen, bedient man sich sphärischer¹⁾ Koordinaten. Wir wollen zwei verschiedene Systeme kennenlernen, zunächst das Horizontsystem. In ihm ist die Horizontebene die Grundebene. Wir legen durch Zenit und Stern den größten Kugelkreis (Abb. 118); seine vom Zenit über den Stern bis zum Nadir reichende Hälfte heißt Vertikal- oder Höhenkreis (eigentlich Höhenhalbkreis); er steht im sog. Höhenfußpunkt auf dem Horizont senkrecht.

Das in Grad gemessene Stück des Höhenkreises von seinem Fußpunkt bis zum Stern heißt Höhe des Sternes; in Abb. 118 beträgt die Höhe des auf der westlichen Hälfte der Himmelskugel stehenden Sternes etwa 40° . Der Bogen Zenit–Stern heißt Zenitdistanz; sie ergänzt die Sternhöhe zu 90° .

Die Angabe der Höhe reicht zur Festlegung eines Himmelspunktes nicht aus; denn alle Punkte, die auf dem durch den Stern gehenden zum Horizont parallelen Kreise liegen, haben dieselbe Höhe. Man nennt diesen Kreis den Höhenparallel des Sternes. Der Höhenfußpunkt hat vom Südpunkt des Horizontes einen bestimmten, in Winkelmaß anzugebenden Abstand (in Abb. 118 etwa 55°). Er heißt das Azimut²⁾ des Sternortes. Durch die Angabe von Azimut und Höhe, die der Abszisse und Ordinate eines ebenen rechtwinkligen Koordinatensystems entsprechen, ist der Sternort eindeutig festgelegt. Wir rechnen in der Astronomie das Azimut vom Südpunkt aus nach Westen hin von 0° bis 360° . (In der Geodäsie und Nautik mißt man das Azimut vom Nordpunkt aus nach Ost und West von 0° bis 180° .) Die Höhe wird vom Höhenfußpunkt aus zum Zenit und Nadir hin von 0° bis 90° gemessen und zum Nadir hin mit dem Minuszeichen versehen.

Zur Übung: 1. Wie groß sind Azimut und Höhe des Nordpunktes, des Ostpunktes, des Himmelspols? — 2. Welcher Bogen der Abb. 118 liefert die Höhe des Sternes in unverzerrter Größe?

4. Das ruhende Äquatorsystem. Wir denken uns durch den Standort des Beobachters die Ebene gelegt, auf der die Himmelsachse senkrecht steht. Sie schneidet die Himmelskugel in einem Kreise, dem Himmelsäquator. Jeder seiner Punkte ist von den beiden Polen um 90° entfernt. Der Äquator geht durch den Ost- und Westpunkt des Horizontes (Abb. 119). Ein im Ostpunkt aufgehender Stern beschreibt den Himmelsäquator, die Sonne vollführt am 21. März und 23. September auf ihm ihren Tageslauf. Der höchste Punkt des Äquators, die Stelle also, an der die Sonne an den genannten Tagen kulminiert, heißt Äquatorkulm; seine Höhe ergänzt, da der Winkel Pol–Zenit–Äquatorkulm 90° beträgt, die Polhöhe zu 90° . Die Ebene des Äquators teilt die Himmelskugel in zwei Halbkugeln, die nördliche, der der Pol, und die südliche, der der Gegenpol angehört.

1) sphäira (griech.) = Kugel

2) Das Wort Azimut stammt aus dem Arabischen und bedeutet „Weg“.

Wie wir im Horizontsystem durch Zenit und Stern den Höhenkreis legen, so legen wir jetzt durch Himmelspol und Stern den größten Kugelkreis. Er

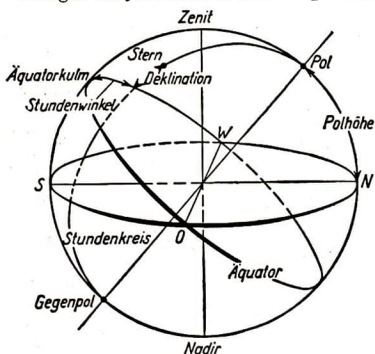


Abb. 119. Das ruhende Äquatorsystem

steht auf dem Äquator senkrecht und heißt Stundenkreis (besser wieder „halbkreis“, denn man versteht darunter nur den Bogen Pol–Stern–Gegenpol). Der auf ihm in Gradmaß gemessene Abstand des Sternes vom Äquator heißt seine Abweichung oder Deklination¹⁾. Sie wird vom Äquator aus zum Pol hin positiv, zum Gegenpol hin negativ gerechnet und als nördliche bzw. südliche Deklination bezeichnet. Die sog. Poldistanz des Sternes ergänzt seine Deklination zu 90°. Das Wort „Stundenkreis“ wird in § 30,5 seine

Erklärung finden. Alle Punkte, die vom Äquator den gleichen Abstand, also dieselbe Deklination haben, liegen auf einem zum Äquator parallelen Kreise, der als Parallelkreis oder kurz Parallel bezeichnet wird. Er darf nicht mit dem entsprechenden „Höhenparallel“ des Horizontsystems verwechselt werden. In der Abbildung ist er nicht eingezeichnet. Um den Ort eines Sternes eindeutig festzulegen, geben wir noch den Winkelabstand des Äquatorpunkts vom dem Punkte an, in dem der Stundenkreis des Sternes den Äquator schneidet, und messen diesen sog. Stundenwinkel vom Äquatorpunkt aus nach Westen hin von 0° bis 360° (s. Abb. 119).

Zur Übung: 1. Welche der vier Größen Azimut, Höhe, Stundenwinkel, Deklination eines Fixsternes ändern sich dauernd? – 2. Wie groß sind schätzungsweise Deklination und Stundenwinkel des Sternes in Abb. 119? – 3. Denke dir das Äquatorsystem um die Ost-Westlinie links herum um 40° gekippt. Welche Punkte und Bogen der beiden Systeme kommen dadurch zur Deckung?

§ 29. Die tägliche Bewegung der Sonne am ruhenden Himmel

1. Die tägliche Sonnenbahn. Die scheinbare Größe des Sonnendurchmessers wird fast immer stark überschätzt. Messungen lehren, daß der Durchmesser rund $\frac{1}{2}$ beträgt, genauer, daß er zwischen $31\frac{1}{2}'$ Anfang Juli und $32\frac{1}{2}'$ Anfang Januar schwankt.

Wenn wir vom Standort der Sonne sprechen, meinen wir den Ort des Sonnenmittelpunktes.

1) *declinatio* (lat.) = Abweichung

In unseren Breiten geht die Sonne täglich im Osten (nicht stets im Ostpunkte) auf, kulminiert auf dem Ortsmeridian zwischen Südpunkt und Zenit und geht im Westen unter (s. Abb. 119). Dabei ändert sich ihr Azimut dauernd; morgens und abends wächst es langsam, mittags schneller; die Höhe nimmt hingegen morgens und abends schneller zu bzw. ab als zur Mittagszeit. Ganz anders verhalten sich die Koordinaten des Äquatorsystems: Der Stundenwinkel wächst gleichförmig, und zwar in jeder Stunde um 15° . Die Deklination der Sonne jedoch ändert sich im Laufe eines Tages nicht merklich; deshalb, und weil sich die Sonne (nahezu) gleichförmig bewegt, sind die Sonnenhöhen zu gleichen Zeiten vor und nach der Kulmination gleich groß und die Schatten, die dann ein lotrechter Stab wirft, gleich lang; dies benutzen wir bei der Anwendung des Gnomons.

Wenn die Deklination der Sonne genau konstant wäre, würde sie wie die Fixsterne Tag für Tag denselben Kreis beschreiben und immer an derselben Stelle des Horizontes aufgehen. Unsere Beobachtungen lehren uns aber folgendes:

2. Sonnenbahn vom 21. März bis 22. Juni. Am 21. März geht die Sonne im Ostpunkte gegen 6 Uhr auf, sie durchläuft den Himmelsäquator und geht im Westpunkte gegen 18 Uhr unter (Abb. 120). Dann hat sie einen Tagbogen von 180° zurückgelegt, es folgt der ebenso lange Nachtbogen.

Da die Bewegung nahezu gleichförmig ist, sind Tag und Nacht gleich lang. Der Frühling beginnt; wir haben Frühlings-Tagundnachtgleiche oder Frühlings-Äquinoktium¹⁾. Am folgenden Morgen geht die Sonne etwas weiter nach Norden hin auf, ihre nördliche Deklination wird von Tag zu Tag größer, sie schraubt sich immer höher am Himmel empor, die Länge der Tage nimmt zu auf Kosten der Nächte, bis am 22. Juni die Deklination $23\frac{1}{2}^\circ$ (genauer $23^\circ 27'$) beträgt. Wir haben den längsten Tag, rund 16 Stunden, und nur 8 Stunden Nacht.

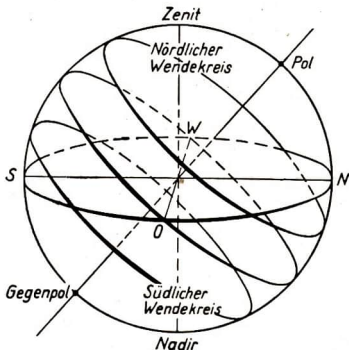


Abb. 120. Die tägliche Sonnenbahn

3. Sonnenbahn vom 22. Juni bis zum 23. September. Nach dem 22. Juni nähert sich der Schraubengang der Sonne dem Pol nicht weiter, deshalb nennt man den Parallel, den sie dann beschreibt, den **nördlichen Wendekreis** oder den

1) aequus (lat.) = gleich; nox (lat.) = Nacht

Wendekreis des Krebses (s. § 31,1). Sie schraubt sich wieder herab, aber zunächst sehr langsam; die Schraubenwindungen liegen recht eng aneinander, so daß die Tage nur langsam kürzer werden; daher heißt die Zeit der Sommer-Sonnenwende auch die des Sommer-Solstitiums¹⁾. Am 23. September durchläuft die Sonne wieder den Äquator; es ist der Tag des Herbst-Äquinoktiums oder der Herbst-Tagundnachtgleiche. Das Sommerhalbjahr ist mit $2 \cdot 93 = 186$ Tagen vorbei. Der Herbst beginnt.

4. Sonnenbahn vom 23. September über den 22. Dezember bis zum 21. März. Die Sonne schraubt sich weiter hinab. Die Schraubenwindungen liegen in Äquaturnähe nicht so dicht wie am nördlichen Wendekreis. Zur Zeit der Äquinoktien ändert sich die Sonnendeklination also rascher; deshalb nehmen jetzt die Tageslängen schnell ab. Am 22. Dezember, dem Tag der Winter-Sonnenwende, erreicht die Sonnenbahn ihre größte Entfernung vom Äquator; die Sonne durchläuft den **südlichen Wendekreis**, den Wendekreis des Steinbocks; ihre Deklination beträgt $-23\frac{1}{2}^\circ$. Gleichzeitig ist ihre Morgenweite, d. i. die auf dem Horizont gemessene Entfernung ihres Aufgangspunktes vom Ostpunkt, am größten geworden, nämlich für die in unseren Zeichnungen angenommene geographische Breite von 50° gleich etwa 38° . Ebenso groß ist an diesem Tage ihre Abendweite, die Entfernung ihres Untergangspunktes vom Westpunkte; und ebenso groß sind auch Morgen- und Abendweite am Tage der Sommer-Sonnenwende, dann jedoch beide nach Norden gerichtet. — Vom 22. Dezember an, dem Tage, an dem der astronomische Winter beginnt, nähert sich die Sonne wieder, zunächst ganz allmählich, dem Äquator, den sie am 21. März wieder durchläuft.

Das Winterhalbjahr, Herbst und Winter, umfaßt $90 + 89 = 179$ Tage, ist also 7 Tage kürzer als das Sommerhalbjahr. Die astronomischen Begriffe Sommer- und Winterhalbjahr decken sich wegen meteorologischer Einflüsse nicht mit den Begriffen warme und kalte Jahreszeit. Die Temperatur bleibt sowohl im Jahres- wie im Tagesgang hinter dem höchsten Sonnenstand zurück. Nicht der Juni, sondern der Juli ist durchschnittlich der heißeste Monat, und die höchste Tagestemperatur herrscht in der Regel erst 1 bis 2 Stunden nach der Sonnenkulmination.

Genauer als vom Tage des Frühlings-Äquinoktiums müßte man eigentlich von dem Augenblick, in dem der Sonnenmittelpunkt auf seiner aufsteigenden Schraubenbahn durch den Äquator geht, als dem Frühlingsanfang reden. Dies kann zu jeder Tages- und Nachtstunde eintreten. Entsprechendes gilt für den Beginn der übrigen Jahreszeiten; deshalb schwanken ihre kalendermäßigen Angaben in den verschiedenen Jahren um einen Tag.

5. Die Zeitgleichung. Die Sonne bewegt sich nur nahezu gleichförmig auf ihrer Bahn. Daher sind die Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kulminationen oder wahren Mittagen, die wahren Sonnentage, nicht ge-

1) sol (lat.) = Sonne; stare (lat.) = stehen

nau gleich lang; sie sind daher als Zeitmaß nicht geeignet. Der Unterschied zwischen dem längsten und dem kürzesten Sonnentage beträgt zwar weniger als eine Minute, doch summieren sich im Laufe der Wochen die Unterschiede.

Man denkt sich daher zu der wahren eine mittlere Sonne, die den Äquator mit gleichbleibender Geschwindigkeit durchläuft. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kulminationen der mittleren Sonne, den mittleren Sonnentag, bestimmt man als arithmetisches Mittel aller Sonnentage eines Jahres. In Abb. 121 sind die Abweichungen der wahren Zeit von der mittleren Zeit für die 12 Monate (I bis XII) des Jahres graphisch dargestellt. Wie man sieht, weichen mittlere und wahre Zeit zuweilen erheblich voneinander ab, am meisten am 3. November, nämlich um 16 Minuten.

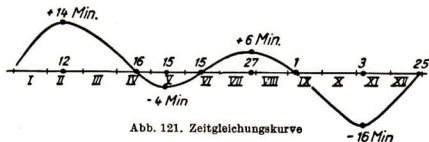


Abb. 121. Zeitgleichungskurve

Der Zeitunterschied zwischen der mittleren Zeit und der wahren Zeit heißt Zeitgleichung (besser würde man „Zeitausgleichung“ sagen). Man rechnet sie positiv, wenn der mittlere Mittag früher als der wahre Mittag liegt, wenn die wahre Sonne also „zu spät“, negativ, wenn sie „zu früh“ kulminiert:

$$\text{Mittlere Zeit} - \text{wahre Zeit} = \text{Zeitgleichung.}$$

An vier aus der Abb. 121 ersichtlichen Tagen ist die Zeitgleichung gleich Null.

Den ersten dieser Tage, den 16 April, hat man so gewählt, daß das Maximum der Zeitgleichung ungefähr gleich dem Minimum ist (genauer so, daß die Summe der über der Abszissenachse liegenden Flächen unserer graphischen Darstellung gleich der Summe der unter ihr liegenden Flächen ist).

Die größte positive Zeitgleichung haben wir am 12. Februar. Dann ist die wahre Sonne gegen die mittlere zurück. Sie kulminiert erst 14 Minuten nach 12 Uhr mittlerer Sonnenzeit. Der Vormittag, die Zeit vom Sonnenaufgang bis zum mittleren Mittag, ist also fast eine Viertelstunde „zu kurz“ und der Nachmittag um ebensoviel „zu lang“. Umgekehrt wird es Anfang November abends zu zeitig dunkel.

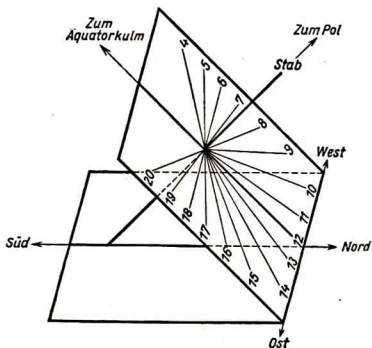


Abb. 122. Äquatorial-Sonnenuhr

6. Die Sonnenuhr. Sie besteht aus einem „Zifferblatt“, an dem ein Stab befestigt ist, der die Richtung der Himmelsachse hat. Der Schatten des Stabes dient als Uhrzeiger. Die Einteilung des Zifferblattes ist am einfachsten, wenn es auf dem schattenwerfenden Stabe senkrecht steht (Äquatorialuhr, Abb. 122); dann rückt der Schatten in jeder Stunde um 15° vor. Für eine andere Lage des Zifferblattes findet man seine Einteilung entweder durch mathematische Berechnung oder auf empirischem¹⁾ Wege.

Zu welcher Zeit des Jahres dient bei der Äquatorialuhr die untere Seite der in der Abbildung schräg liegenden Fläche als Zifferblatt?

§ 30. Der rotierende Fixsternhimmel

1. Der Sterntag. Abb. 123 zeigt eine mit feststehender Kamera gemachte photographische Aufnahme der Gegend des nördlichen Sternhimmels um den Pol herum. Die Belichtungszeit betrug 5 Stunden. Man sieht, wie die Fixsterne in

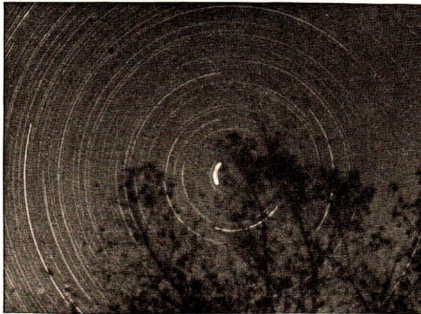


Abb. 123. Zirkumpolarsterne (5 Std. belichtet)

dieser Zeit etwa $\frac{1}{2}$ eines Kreises zurückgelegt haben. Man erkennt auch, daß der Polars Stern nicht der ruhende Himmelspol ist; sein Abstand von ihm beträgt $1^\circ 7'$.

Alle Sterne, die vom Pol nicht weiter entfernt sind als die Polhöhe angibt, gehen für uns nicht auf und nicht unter; sie heißen **Zirkumpolarsterne**²⁾. Aber auch die übrigen Sterne beschreiben geschlossene Kreise, wie wir

es für die Sonne in Abb. 120 dargestellt haben. Während jedoch der heutige Aufgangspunkt der Sonne nur angenähert mit dem gestrigen zusammenfällt, gilt das für die Fixsterne vollkommen genau; sie bleiben jahraus, jahrein auf derselben Kreisbahn; ihre Deklination ändert sich im Laufe eines Jahres nicht. Die Fixsterne, soweit sie nicht Zirkumpolarsterne sind, gehen irgendwo auf dem Halbkreis NOS auf, kulminieren auf dem Ortsmeridian und gehen auf dem Halbkreis NWS unter. Der „Tagbogen“ – wenn wir einen bei der Sonnenbewegung eingeführten Begriff anwenden dürfen – aller Sterne, die nördlich vom Äquator stehen, ist länger als der „Nachtbogen“; bei den südlich vom Äquator stehenden Sternen, also bei denen, die auf der dem Gegenpol zugewandten Halbkugel stehen, ist es umgekehrt.

1) empiria (griech.) = Erfahrung

2) circū (lat.) = um . . . herum

Wir legen an einem sternklaren Abend, wenn wir die Umriss eines entfernten Daches o.ä. gerade noch erkennen können, eine Visierlinie fest von einem dem Auge nahen Punkte über einen entfernten Punkt zu einem Fixstern, der

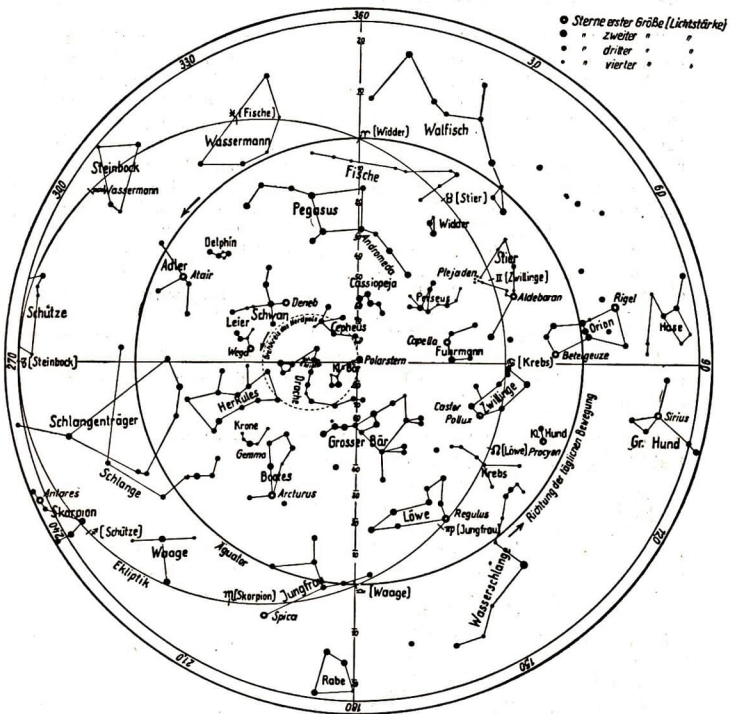


Abb. 124. Der nördliche Sternhimmel

im Süden in der Nähe des Äquators steht. Zehn Tage später finden wir ihn schon 40 Minuten früher an derselben Stelle. (Nach Ablauf dieser 40 Minuten hat er sich auf seiner Kreisbahn um 20 Vollmondbreiten weiter bewegt.) Die mittlere Sonne, nach der unsere Uhr geht, ist also an jedem Tage 4 Minuten hinter den Fixsternen zurückgeblieben. Hieraus folgt, daß die Zeit, in der

ein Fixstern einen vollen Umlauf vollendet, 4 Minuten weniger beträgt als die Umlaufszeit der Sonne, also nur 23 h 56 min. Man nennt diese Zeit einen Sterntag.

Der Sterntag ist um 4 Minuten kürzer als ein mittlerer Sonnentag.

2. Sternkarten. Da die Fixsterne ihre gegenseitige Lage zueinander nicht ändern, können sie auf Himmelsgloben und angenähert auch auf Sternkarten dargestellt werden. Auf einem gewöhnlichen Himmelsglobus sieht man den Sternhimmel von außen, wie wir ihn in Wirklichkeit nicht sehen. Von innen betrachtet man ihn im Zeißschen Planetarium. Man muß sich auch bei Sternkarten darüber Klarheit verschaffen, ob sie den Fixsternhimmel von außen oder von innen gesehen darstellen. Wir ziehen die zweite Art von Sternkarten vor, wie sie sich in der Regel in Atlanten finden. Eine derartige Karte zeigt Abb. 124. Sie stellt den Sternhimmel bis zum südlichen Wendekreis dar. Natürlich ist das, wie bei jeder Darstellung eines Teiles einer Kugeloberfläche in einer Ebene, nicht ohne Verzerrungen möglich. Bei unserer Karte sind die Sterne durch Strahlen, die alle vom Gegenpol ausgehen, auf die Äquatorebene projiziert. Dadurch wird der Abstand von je zwei Sternen, die in Wirklichkeit den gleichen Winkelabstand voneinander haben, am Rande der Karte etwa doppelt so groß wie in der Mitte. Es gibt auch andere Projektionsarten. Daher stimmen die Umrisse von weiter ausgedehnten Sternbildern verschiedener Sternkarten nicht überein. Man muß immer und immer wieder den gestirnten Himmel selbst betrachten.

3. Sternbilder. Das nächst dem Großen und Kleinen Wagen bekannteste Sternbild ist wohl die aus fünf Sternen zweiter und dritter Größe ein W bildende



Abb. 125. Orion

Kassiopeia. Wir kommen zu dem letzten Stern β dieser Zickzacklinie, wenn wir den von δ im Großen Bären zum Polarstern reichenden Bogen um sich selbst verlängern. Man hat diesen Stern aus einem nachher anzugebenden Grunde Kolorstern genannt. Verlängert man abermals um denselben Bogen, so gelangt man zu einem Stern zweiter Größe, α in der Andromeda. Eine nochmalige Verlängerung um denselben Bogen führt zu einem Punkte in einer sternarmen Himmelsgegend, der von größter Bedeutung ist, dem Frühlings- oder Widderpunkt. Kolorstern, α in der Andromeda und Frühlingspunkt haben die Deklinationen 59° , 29° , 0° :

Von den Sternen erster Größe sind 15 in unserer geographischen Breite sichtbar. Nach ihrer scheinbaren Größe oder Helligkeit geordnet sind es: Sirius, Wega, Kapella, Arkturus, Rigel, Prokyon, Atair, Beteigeuze, Aldebaran, Pollux, Spika, Antares, Fomalhaut, Deneb und Regulus. Von diesen bilden Kapella, Pollux, Prokyon, Sirius, Rigel und Aldebaran das „große Sechseck um Orion“,

das häufig als schönster Teil des Himmels bezeichnet wird. Mitten im Sechseck liegt Beteigeuze, der Schulterstern des Orion. (Verlege die in Abb. 125 gezeichnete Kontur des Orion an den Himmel.) Orion ist in den Monaten Mai bis August nicht sichtbar, weil er dann bei Tage über unserem Horizonte steht.

Als Beispiel dafür, wie die Mythologie der Alten den Himmel belebte, mag die Sternsage von den Zwillingen hier Platz finden. „Pollux ist ein Sohn Jupiters und unsterblich; Kastor, sterblicher Natur, fällt im Kampf, und Pollux bittet Jupiter, er möge seinem so sehr geliebten Bruder auch olympische Unsterblichkeit verleihen. Jupiter verweigert dies, stellt es aber Pollux anheim, entweder allein im Olymp zu bleiben, oder abwechselnd je einen Tag im Olymp, den anderen in Gesellschaft des Bruders in der Unterwelt zuzubringen. Pollux entscheidet sich für das letztere; zur ewigen Erinnerung an diese innige Geschwisterliebe wurden die Brüder unter die Sterne versetzt.“ (Oswald Thomas, *Astronomie*.)

4. Das rotierende Äquatorsystem. Im Horizont- und im ruhenden Äquatorsystem ändern sich Azimut, Höhe und Stundenwinkel eines Sternes dauernd, nicht so die Deklination. Um die Lage eines Gestirns den Fixsternen gegenüber angeben zu können, führen wir jetzt ein drittes Koordinatensystem ein, das mit dem rotierenden Fixsternhimmel fest verbunden ist; wir nennen es das rotierende Äquatorsystem. Wie im ruhenden System, so teilen wir auch hier den Äquator in 360 Grad und legen vom Pol durch die Teilpunkte zum Gegenpol Halbkreise, die nun rotierende Stundenkreise heißen. Auf ihnen messen wir, genau wie im ruhenden System, die Deklination. Sterne gleicher Deklination liegen auf einem rotierenden Parallelkreis, der stets mit dem entsprechenden ruhenden Parallelkreis in Deckung bleibt. Die großen Fernrohre der Sternwarten sind so aufgestellt, daß das Rohr durch eine Drehung um eine Achse der Bewegung eines Gestirns auf seinem Parallelkreise folgen kann; dazu liegt diese Achse in der Himmelsachse (Abb. 126). Der rotierende Stundenkreis eines Sternes schneidet den Äquator in einem bestimmten Punkt (Abb. 127); das zweite Bestimmungsstück des Sternes, die Abszisse des neuen Systems, ist der Abstand dieses

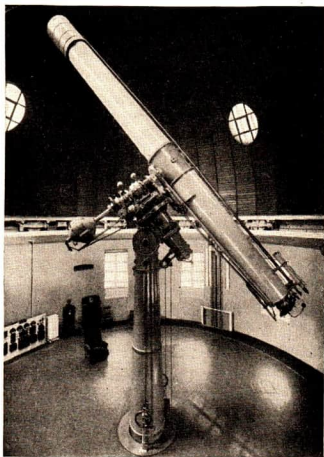


Abb. 126. Fernrohr

Schnittpunktes von einem bestimmten anderen Punkt des rotierenden Äquators; und dieser Ausgangspunkt der Abszissen-zählung ist der Frühlingspunkt, dessen Lage am Sternhimmel oben schon beschrieben wurde. Während wir aber im ruhenden Äquatorsystem vom Äquatorkulm aus den Stundenwinkel im Sinne des Uhrzeigers (vom Pol aus gesehen) zählen, läuft die Zählung auf dem rotierenden Äquator im Gegenzeigersinn. Man nennt

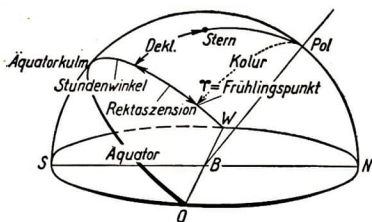


Abb. 127. Das rotierende Äquatorsystem

diese Zählung rechtläufig, während die Zählung im Uhrzeigersinn rückläufig heißt. Der im Äquator liegende Bogen vom (rotierenden) Frühlingspunkt bis zum „Fußpunkt“ des rotierenden Stundenkreises heißt Rektaszension¹⁾ (Abb. 127).

Folgendes ist sorgfältig zu beachten: Der Fixsternhimmel dreht sich von Osten über Süden nach Westen. Vom Pol

aus gesehen, wie wir auch Abb. 127 betrachten, erfolgt diese Drehung im Sinne des Uhrzeigers. Blicken wir aber nach Norden, zum Polarstern – und so betrachten wir unsere Sternkarte –, so erfolgt dieselbe Drehung links herum, im Gegenzeigersinn. In der entgegengesetzten Richtung, jetzt also rechts herum, „rechtläufig“, messen wir die Rektaszension. In dieser Richtung ist am Rande der Sternkarte Abb. 124 vom Frühlingspunkt aus die Rektaszension im Winkelmaß angeschrieben. Um z. B. die Rektaszension des Aldebaran abzulesen, legt man durch ihn und den Pol den auf der Karte als Gerade erscheinenden Stundenkreis; er trifft die Kreiseinteilung am Rande unter $67\frac{1}{2}^\circ$. Auf dem durch den Frühlingspunkt gehenden Stundenkreis ist vom Äquator aus nach Norden und Süden die Deklination angeschrieben. Beschreibt man um den Pol einen Kreisbogen vom Aldebaran bis zu diesem Stundenkreise, so findet man als Deklination des Sternes $+16^\circ$.

Der Stundenhalbkreis des Frühlingspunktes und die von ihm um je 90° und um 180° abstehenden Halbkreise sind in Abb. 124 als 4 zueinander senkrechte Halbmesser eingezeichnet. Sie haben besondere Namen erhalten, die im folgenden Paragraphen ihre Erklärung finden:

1. Der 0-Uhr-Halbkreis, der Kolor der Frühlings-Tagundnachtgleiche, vom Pol über den Kolorstern in der Kassiopeia zum Frühlingspunkt und weiter bis zum Gegenpol.
2. Der 6-Uhr-Halbkreis, der Kolor der Sommer-Sonnenwende, auf unserer Karte nach rechts gerichtet; alle Punkte auf ihm – Beteigeuze steht in seiner Nähe – haben die Rektaszension 90° .

1) recta ascensio (lat.) = gerade Aufsteigung (sprich daher Rekt-ascension)

3. Der 12-Uhr-Halbkreis, der Kolor der Herbst-Tagundnachtgleiche; er verläuft durch den Stern δ des Großen Wagens.
 4. Der 18-Uhr-Halbkreis, der Kolor der Winter-Sonnenwende; nicht weit von ihm entfernt steht Wega in der Leier.

Der erste und dritte Halbkreis zusammen heißen auch Äquinoktialkolor, der zweite und vierte Solstitialkolor. Das Wort Kolor kommt von den griechischen Wörtern *kólos* = verstümmelt und *oúra* (sprich: *ura*) = Schwanz, vielleicht deshalb so, weil der Kolor der Tagundnachtgleichen vom Großen Bären und der der Sonnenwenden vom Kleinen Bären den Schwanz abschneidet.

5. Die Sternzeit. Der Fixsternhimmel rotiert fast vollkommen gleichförmig; deshalb ist irgendein rotierender Stundenkreis, am besten der erste Kolor, der gekrümmte Zeiger einer recht zuverlässigen Uhr. Wir denken uns im Pol an die Himmelskugel die Tangentialebene gelegt und auf dieser ein 24teiliges Zifferblatt angebracht; oben steht 0, unten 12; dann zeigt unser vom Pol zum Kolorstern gehender Zeiger stets 0 Uhr an, wenn der Frühlingspunkt kulminiert. Versetzt man sich in Gedanken an den Ort *B* der Abb. 127, so erkennt man, daß der Sternzeiger links herum läuft. In dieser Richtung ist das Zifferblatt unserer Sternuhr also beziffert; in dieser Richtung ist auch die Sternkarte zu drehen, wenn sie dem Lauf der Sterne folgen soll. Um das auszuführen, richte man den Blick gerade auf den Pol und halte die Sternkarte in geeignetem Abstand senkrecht zur Blickrichtung.

Wenn der Frühlingspunkt zum zweiten Male kulminiert, sind nach unserer „richtiggehenden“ Taschenuhr nicht 24 Stunden, sondern erst 23 Stunden und 56 Minuten verflossen. Die Sternuhr gibt aber 24^h an, sie geht nicht nach mittlerer Sonnenzeit, sondern nach Sternzeit. Nach Sternzeit gehen alle Sternzeituhren der Sternwarten, sie lassen sich also nach dem Meridiandurchgang des Frühlingspunktes oder eines beliebigen Sternes, dessen Rektaszension bekannt ist, jederzeit kontrollieren.

Hieraus wird auch die Bezeichnung „Stundenwinkel“ für die Abszisse eines Sternes im Äquatorsystem verständlich. Der durch den Stern gehende „Stundenkreis“ dreht sich wie der Zeiger unserer Himmelsuhr in 24 Stunden um 360°. Der Stundenwinkel kann also leicht in Zeit umgerechnet werden. Dann gibt er an, vor wieviel Stunden der Stern kulminiert hat, also durch den Meridian des Beobachtungsortes gegangen ist. In der Astronomie wird deshalb der Himmelsäquator statt in 360° auch in 24 Stunden geteilt und sowohl der Stundenwinkel wie auch die Rektaszension statt in Grad (°), Winkelminuten (′) und Winkelsekunden (″) in Stunden (h), Zeitminuten (min) und Zeitsekunden (s) angegeben. Zur Umrechnung hat man die Gleichungen:

$$24 \text{ h} \cong 360^\circ; \quad 1 \text{ h} \cong 15^\circ; \quad 4 \text{ min} \cong 1^\circ; \quad 1 \text{ min} \cong 15'; \quad 4 \text{ s} \cong 1'; \quad 1 \text{ s} \cong 15'',$$

wobei z. B. die letzte Gleichung „1 Zeitsekunde entspricht 15 Winkelsekunden“ zu lesen ist.

Bei der dritten Kulmination des Frühlingspunktes ist die mittlere Sonne um 8 Minuten und in den 30 Tagen eines Monats um 2 Stunden hinter dem Frühlingspunkt zurückgeblieben. Nun geben im Augenblick des Frühlings-Äquinoktiums Sternzeituhr und mittlere Sonnenzeituhr dieselbe Zeit an, denn dann steht die Sonne im Frühlingspunkt. Einen Monat später, im April, ist die Sternzeituhr um 2 Stunden, im Mai um 4 Stunden, im Juni um 6 Stunden und, wenn die Sonne ein Jahr später wieder im Frühlingspunkte steht, um 24 Stunden vorausgeeilt. So ergibt sich:

Auf 365,2422 mittlere Sonnentage kommen 366,2422 Sterntage.

Da die Sternzeit die seit der Kulmination des Frühlingspunktes verflossene Zeit bedeutet, ergibt sich aus Abb. 127 für den augenblicklichen Stundenwinkel und die konstante Rektaszension jedes Gestirnes die Beziehung

$$\text{Sternzeit} = \text{Stundenwinkel} + \text{Rektaszension.}$$

Für genaue Beobachtungen von Kulminationen dient das Meridianinstrument, ein Fernrohr, das sich um eine waagerechte Achse nur in der Ebene des Ortsmeridians drehen läßt. Mit ihm wird die Polhöhe aus der oberen und unteren Kulmination eines Zirkumpolarsterns bestimmt, ebenso die zur Polhöhe komplementäre Höhe des Äquatorkulms und die Deklination eines Gestirns. Bestimmt man an irgendeinem Tage im Fernrohr den Durchgang des Frühlingspunktes durch den Meridian, so weiß man, daß es 0^h Sternzeit ist. Beobachtet man den Durchgang des Aldebaran mit der Rektaszension $67\frac{1}{2}^{\circ}$ oder 4 h 30 min, so ist es 4^h 30^{min}.

§ 31. Der jährliche Umlauf der Sonne am rotierenden Himmel

1. Die Ekliptik. Wenn wir den Mond gestern abend in der Nähe eines uns bekannten Sternes gesehen haben und ihn heute zur gleichen Zeit wieder beobachten, so finden wir, daß er ein beträchtliches Stück hinter dem Fixsternhimmel zurückgeblieben ist. Bei der Sonne können wir dieselbe Beobachtung nicht machen, weil ihr Licht die Sterne verdunkelt; wir mußten deshalb die gleiche Tatsache daraus erschließen, daß der Sterntag kürzer ist als der mittlere Sonnentag. Die Rektaszension der Sonne nimmt also täglich zu, und zwar, da sie in einem Jahr um 360° hinter den Fixsternen zurückbleibt, täglich ungefähr um 1° . Diesen Befund können wir auch in die Worte kleiden: Die Sonne hat sich am rotierenden Himmelsgewölbe in einer der Rotation entgegengesetzten Richtung fortbewegt. Dabei handelt es sich also nicht um die Bewegung der Sonne im ruhenden Äquatorsystem, sondern um ihre Bewegung in bezug auf den rotierenden Himmel.

So kommt es, daß wir in jedem Monat abends über der Untergangsstelle der Sonne andere Sternbilder erblicken, nämlich, wenn wir im März beginnen:

Widder, Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau, Waage, Skorpion, Schütze, Steinbock, Wassermann, Fische.

Daraus, daß sich auch die Deklination der Sonne dauernd ändert, nämlich im Frühjahr von 0° bis $23^\circ 27'$ zunimmt (§ 29, 2), dann im Sommer und Herbst über 0° bis $-23^\circ 27'$ abnimmt, um im Winter wieder auf 0° zu wachsen, folgt:

Die Ebene der jährlichen Sonnenbahn am rotierenden Fixsternhimmel ist gegen die Äquatorebene um $23^\circ 27'$ geneigt. Diese jährliche Sonnenbahn heißt Ekliptik; der angegebene Neigungswinkel ist die sog. Schiefe der Ekliptik¹⁾.

Abb. 128 zeigt die Lage der Ekliptik gegen unseren Horizont am 23. September 6 Uhr. Dieselbe Lage hat sie ein, zwei, drei Vierteljahre später um 24^h, 18^h, 12^h. Im Laufe eines Sterntages dreht sich die Ekliptik ebenso wie der rotierende Äquator einmal um die Himmelsachse. Während dabei aber der Äquator mit sich selbst in Deckung bleibt, überstreicht die Ekliptik bei einer Drehung die ganze Kugelzone zwischen den beiden Wendekreisen. 12 Stunden nach dem Augenblick, für den Abb. 128 gilt, ist die Ekliptikebene statt $40^\circ + 23\frac{1}{2}^\circ = 63\frac{1}{2}^\circ$ nur $40^\circ - 23\frac{1}{2}^\circ = 16\frac{1}{2}^\circ$ gegen die Horizontebene geneigt. Die Punkte, die (ebenso wie der Pol vom Äquator) um 90° von der Ekliptik entfernt sind, heißen Pol und Gegenpol der Ekliptik. Sie haben die Poldistanz $23\frac{1}{2}^\circ$ und beschreiben in 24 Stunden (Sternzeit) Kreise um die Himmelspole.

Die genannten 12 Sternbilder umfassen einen Gürtel von 7° bis 8° Breite zu beiden Seiten der Ekliptik; man nennt ihn **Tierkreis** oder **Zodiakus**²⁾.

2. Die Präzession der Tagundnachtgleiche. Die Ekliptikpole liegen dauernd bei denselben Fixsternen, der nördliche Pol im Sternbild des Drachen (s. Abb. 124). Der Nordpol des Äquators behält nicht nur dem Fixsternhimmel gegenüber, sondern auch im Horizontsystem Jahre hindurch seine Lage; er ist „der ruhende Pol in der Erscheinungen Flucht“. Beobachtungen, die sich über sehr lange Zeiträume erstrecken, lehren jedoch, daß der Nordpol in 26000 Jahren einen Kreis um den Ekliptikpol beschreibt; in 12000 Jahren wird Wega Polarstern sein. Dadurch ändert auch der Äquator seine Lage gegen die Ekliptik, und ihre Schnittpunkte, der Frühlings- und der Herbstpunkt, rücken auf der Ekliptik weiter. In bezug auf die jährliche Bewegung der Sonne bleiben sie zurück; in bezug auf die tägliche Bewegung der Fixsterne rücken sie vor; deshalb wird diese Bewegung als Präzession³⁾ der Tagundnachtgleiche bezeichnet. Die Erscheinung wird später (Teil IB, § 30, 2) erklärt werden.

Infolge der Präzession steht die Sonne, die vor 2000 Jahren bei Frühlingsanfang im Sternbild des Widders stand, heute zur selben Zeit im Sternbild der Fische. Es ist also streng zwischen den Zeichen und den Sternbildern der Ekliptik zu unterscheiden. Die heutigen Zeichen, je 30° umfassend, haben ihre Namen nach den benachbarten Sternbildern. Deshalb steht, wenn

1) Erklärung des Wortes folgt in § 37

2) zōdiakos (griech.) = Tierkreis

3) praecedere (lat.) = vorrücken

die Sonne schon untergegangen ist, das Sternbild noch über dem Horizont, das denselben Namen führt wie das Zeichen, in dem die Sonne steht. An der

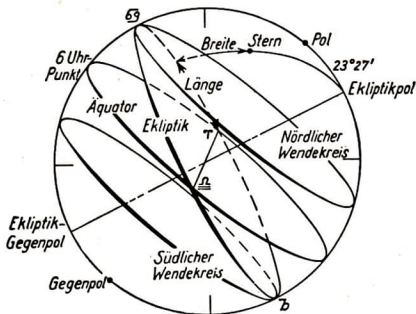


Abb. 128. Das Ekliptiksystem

Rektaszension und Deklination eines Fixsterns. Auch die entsprechenden Koordinaten in einem vierten System, dem Ekliptiksystem, sind nicht konstant. Ausgangspunkt der Zählung ist hier wie im rotierenden Äquatorsystem der Frühlingspunkt auf der Ekliptik; der Rektaszension und Deklination entsprechen astronomische Länge (ebenfalls in rechtläufiger Richtung gemessen) und Breite (Abb. 128).

4. Nochmals die Zeitgleichung. Die Sonne durchläuft in $365\frac{1}{4}$ Tagen die ganze Ekliptik, deshalb nimmt ihre Länge täglich um durchschnittlich $360^\circ : 365\frac{1}{4} = 0,986^\circ$ zu, „durchschnittlich“, weil sich die Sonne auf der Ekliptik nicht ganz gleichförmig bewegt.

Dies ist der eine Grund für die Veränderlichkeit der Zeitgleichung (§ 29, 5); der Hauptgrund aber ist der folgende. Zur Einführung der mittleren Zeit dachten wir uns eine „mittlere

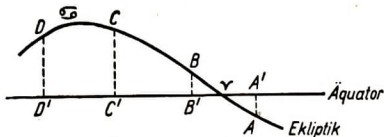


Abb. 129. Ungleichmäßige Änderung der Sonnenrektaszension
 $AB = CD$; $A'B' < C'D'$

Stelle unserer Sternkarte, an der die Sonne auf ihrer jährlichen Bahn in das Zeichen des Widder tritt – sie heißt der Widderpunkt – stehen als Symbol des Zeichens die Widderhörner (γ). Auch die Gestalt der übrigen Symbole (Abb. 124) erinnert z. T. an die Namen der Sternbilder, nach denen die Tierkreiszeichen vor 2000 Jahren benannt wurden.

3. Das Ekliptiksystem. Infolge der Wanderung des Frühlingspunktes ändern sich im Laufe der Jahrzehnte auch

Sonne“, die sich auf dem Äquator gleichförmig bewegt, in 24 Stunden einmal herum. Die „wahre Sonne“ führt eine Bewegung aus, die wir uns aus zwei Bewegungen „zusammengesetzt“ denken, erstens nimmt sie teil an der nahezu ideal gleichförmigen Drehung des Fixsternhimmels; zweitens bewegt sie sich in entgegengesetzter Richtung mit einer Geschwindigkeit, die wir jetzt als

konstant annehmen. Doch ist die zweite Bewegung der ersten nicht genau entgegengerichtet, da die Ekliptik gegen den Äquator geneigt ist. In Abb. 129 ist ein Stück des

Äquators samt seiner Umgebung so in eine Ebene abgewickelt, daß der Äquator eine Gerade ist. Wir grenzen auf der Ekliptik in der Umgebung eines Äquinoktiums und eines Solstitiums Bogen ab, AB und CD , die die Sonne in gleichen Zeiten, z.B. in einem Monat, zurücklegt. Die Rektaszensionen wachsen in diesen Zeiten um die Projektionen dieser Bogen auf die Richtung, in der sich der Himmel dreht oder auf den Äquator; und diese Projektionen $A'B'$ und $C'D'$ sind verschieden groß, am größten zur Zeit der Sonnenwenden.

So kommt es, daß infolge der Schiefe der Ekliptik die Rektaszension der Sonne zu verschiedenen Zeiten des Jahres verschieden stark zunimmt, nämlich, während sich die Länge um je 30° ändert, im ersten Tierkreiszeichen um 28° und im dritten um 32° . Die Zeitgleichungskurve (Abb. 121) läßt erkennen, daß diese Ursache von einer zweiten, der schon in § 29,5 angeführten, überlagert wird.

5. Der Kalender. Die Sonne hat einen vollen Umlauf längs der Ekliptik vollendet, wenn sie wieder an derselben Stelle des Fixsternhimmels steht wie im Jahre vorher. Diese Zeit heißt ein siderisches¹⁾ Jahr. Es ist

$$1 \text{ siderisches Jahr} = 365,25 \text{ 636 Tagen} = 365 \text{ d } 6 \text{ h } 9 \text{ min } 9 \text{ s.}$$

Die Tage (d^2) sind Tage mittlerer Sonnenzeit.

Bis die Sonne auf ihrer Jahresbahn wieder bis zum Frühlingspunkt gelangt, vergeht eine kürzere Zeit, weil dieser Punkt infolge der Präzession auf der Ekliptik wandert, und zwar während eines Jahres durchschnittlich $50,221''$. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen durch den Frühlingspunkt heißt ein tropisches³⁾ Jahr. Es ist

$$1 \text{ tropisches Jahr} = 365,24 \text{ 222 Tagen} = 365 \text{ d } 5 \text{ h } 48 \text{ min } 46 \text{ s.}$$

Der Unterschied der beiden Jahre beträgt 20 min 23 s.

Unserer Zeitmessung ist das tropische Jahr zugrunde gelegt. Da dieses aber keine ganze Anzahl von Tagen umfaßt, bestimmte Julius Cäsar im Jahre 46 v.u. Ztr., daß jedes Jahr 365 Tage dauern und in jedem vierten Jahr ein Schalttag eingefügt werden solle (Julianischer Kalender). Das Jahr währte dann im Durchschnitt genau 365,25 Tage. In 400 Jahren mußte damit ein Unterschied von 3 Tagen gegen das tropische Jahr auftreten. Deshalb wurde durch die Kalenderreform des Papstes Gregor XIII. im Jahre 1582 festgesetzt, daß alle 400 Jahre 3 Schalttage ausfallen sollten, indem nur diejenigen Vielfachen von 100 (z.B. 1600) Schaltjahre blieben, bei denen die Hunderter sich durch 4 teilen lassen (Gregorianischer Kalender). Der noch verbleibende Fehler wird erst in 4000 Jahren wieder einen ganzen Tag betragen.

Dadurch, daß man im Jahre 1582 auf den 4. Oktober unmittelbar den 15. Oktober folgen ließ, wurde erreicht, daß der Frühlingsanfang wieder auf den 21. März fiel.

1) sidus (lat.) = Gestirn

2) d von dies (lat.) = Tag

3) trópos (griech.) = Wendung, Richtung

B. Unser Sonnensystem¹⁾

§ 32. Geozentrisches und heliozentrisches System

Die Bewegung der Himmelskörper hat seit den ältesten Zeiten das Interesse der Menschen erregt. Jahrtausende vor unserer Zeitrechnung sind schon von den Völkern am Nil und Euphrat astronomische Beobachtungen angestellt und aufgezeichnet worden. Priesterschaften pflegten diese Wissenschaft und waren so tief in die Geheimnisse des Himmels eingeweiht, daß sie z. B. die Periode kannten, in der sich die Sonnen- und Mondfinsternisse wiederholen.

Die Geschichte der Astronomie zeigt, wie der äußere Anschein oft zu irrtümlichen Erklärungen verleitet. Nur wenige Menschen haben im Altertum daran gezweifelt, daß die Erde im Mittelpunkt der Welt stünde, daß die Sterne an einer Himmelskugel angeheftet seien und sich mit ihr täglich um die Erde drehten; und so haben auch wir bis jetzt die Bewegung der Gestirne beschrieben. Hipparch, einer der berühmtesten Astronomen des Altertums (um 150 v. u. Ztr.), folgerte aus der ungleichen Länge der Jahreszeiten, daß die Erde nicht genau im Mittelpunkt der kreisförmigen Sonnenbahn stünde. Von Sonne und Mond nahmen die Alten an, daß sie auf der Himmelskugel wanderten. Ihre Erklärungen für die sonderbaren Planetenbahnen (s. § 38) wurden um so umständlicher, je genauer man sie beobachtete.



Nikolaus Kopernikus
(1473—1543)

Der in Alexandrien lebende Schriftsteller Ptolemaios legte 130 u. Ztr. diese Auffassung in seiner „Megálē syntaxis“²⁾ („Almagest“) nieder, einem

Werk, das die Stürme der Völkerwanderung und die Kämpfe des folgenden Jahrtausends überstand und dann auf dem Wege über die Araber bei den westeuropäischen Völkern bekannt wurde. Diesen Erklärungsversuch bezeichnet man als das **Ptolemäische oder geozentrische**³⁾ **Weltsystem**.

Schon um 270 v. u. Ztr. hatte jedoch Aristarch von Samos behauptet, nicht die Erde, sondern die Sonne stünde im Mittelpunkt der Welt. Von ihm erhielt Nikolaus Kopernikus (geb. 1473 zu Thorn, gest. 1543 als Domherr in Frauenburg) die erste Anregung zur Aufstellung des **Kopernikanischen oder heliozentrischen**⁴⁾ **Weltsystems**. Er erklärte den scheinbaren täglichen Umschwung des Fixsternhimmels aus der Drehung der Erde um ihre

1) Die Behandlung dieses und des folgenden Abschnittes kann auch bis zum 12. Schuljahr zurückgestellt werden.

2) „Große Zusammenstellung“

3) gē (griech.) = Erde

4) hēlios (griech.) = Sonne

Achse; die Fixsterne ließ er in unmeßbarer Ferne ruhen. Die Sonne steht still; um sie drehen sich auf Kreisbahnen die Erde und die übrigen Planeten; um die Erde dreht sich nur der Mond. Kopernikus war sich bewußt, wieviel Widerspruch er finden würde, da er eine durch die Jahrhunderte hindurch geheiligte Anschauung zu stürzen unternahm. Deshalb ließ er sich erst in hohem Alter bewegen, sein Hauptwerk „De revolutionibus orbium coelestium“ („Über den Umschwung der Himmelskörper“) in Nürnberg drucken zu lassen. Wenige Stunden vor seinem Tode hatte er die Freude, das erste Exemplar in den Händen zu halten.

Wir werden im folgenden die Gründe kennenlernen, die für das Kopernikanische Weltsystem sprechen, und auch sehen, wie es in der Folgezeit beachtet und ausgebaut worden ist.

§ 33. Gestalt und Größe der Erde

1. Kugelgestalt der Erde. Wir blicken aus beispielsweise 20 m Entfernung nach der Spitze eines hohen Baumes oder nach der oberen Kante eines Schornsteins; die Visierlinie bildet mit der Horizontebene einen Höhenwinkel von z. B. 45° . Entfernen wir uns, rückwärtsgehend, im ebenen Gelände um 10 m von dem Baum, so verkleinert sich dieser Höhenwinkel um 12° . Visieren wir die Baumspitze aus 50 m Abstand an, so beträgt der Höhenwinkel nur noch 22° . Schreiten wir dann abermals um 10 m zurück, so verringert sich der Winkel statt um 12° nur um 4° . So verkleinert sich mit zunehmendem Abstand die in Grad gemessene Höhe des Baumes immer weniger. Visieren wir den Polarstern an – in der geographischen Breite Berlins erscheint er unter einem Höhenwinkel von etwa 52° –, so können wir, wenn wir rückwärts schreiten, keinerlei Änderung des Höhenwinkels feststellen; wir sagen deshalb, er sei „unendlich weit“ von uns entfernt.

Aus Reiseberichten erfahren wir, daß in einem Ort, der in 2222 km Entfernung südlich von Berlin liegt (Tripolis an der nordafrikanischen Küste), der Polarstern die Höhe 32° hat, während er an einem um 2222 km nördlicher gelegenen Ort (Tromsø im Norden Norwegens) unter dem Höhenwinkel 72° erscheint. Stellen wir diese Beobachtungen in einer Zeichnung dar, wobei wir annehmen, daß die Erde eine Ebene sei (in Abb. 130 bedeuten dann A Berlin, B Tripolis und C' Tromsø), so haben die Visierlinien von A und B' zum Polarstern einen anderen Schnittpunkt (P_1) als die Visierlinien von A und C' (P_2). Wir kommen also zu der widersinnigen Folgerung, daß es zwei verschiedene Polarsterne gibt, die sich bei weiteren Beobachtungsorten noch um beliebig viele vermehren.

Der Widerspruch verschwindet, wenn wir annehmen, die Erde sei nach Süden und Norden hin gleichmäßig gekrümmt. Reisen wir dann von A aus südwärts um 2222 km nach B , so kann sehr wohl die Visierlinie unter dem Erhebungswinkel von 32° der Visierlinie von A aus parallel sein und ebenso die von C

aus unter 72° ; sie sind es aus mathematischen Gründen tatsächlich, wenn die Bogen AB und AC 20° betragen. Die drei und alle weiteren Visierlinien weisen dann nach dem einen Polarstern in „unendlicher Ferne“.

Daß auf einer Reise von Norden nach Süden die Polhöhe gleichmäßig mit der zurückgelegten Strecke abnimmt, ist also ein Beweis für die nordsüdliche

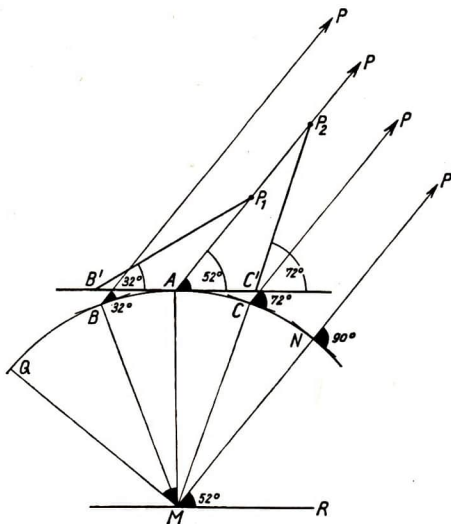


Abb. 130. Beweis für die Erdkrümmung

kreisförmige Krümmung der Erdoberfläche. Daß sie auch in ost-westlicher Richtung kreisförmig gekrümmt ist, geht aus folgender Beobachtung hervor. Reist man auf dem Erdäquator nach Westen, so zeigt eine Taschenuhr, daß irgendein Fixstern für je 111 km Reiseweg 4 Minuten später kulminiert, also um die Zeit später, die der Fixsternhimmel braucht, um sich um 1° zu drehen.

Als weitere Beweise für die Kugelgestalt der Erde gelten die folgenden. Von einem aus der Ferne herankommenden Schiffe sieht man zunächst die Mastspitze und dann allmählich die weiter

unten liegenden Aufbauten und den Rumpf. — Der Horizont ist kreisförmig begrenzt. — Er erweitert sich, wenn man auf einen Turm steigt. — Reist man westwärts, so kommt man schließlich von Osten her zum Ausgangspunkte zurück.

2. Die Größe der Erde. Um uns auf der Erdoberfläche zu orientieren, versehen wir sie mit einem Gradnetz. Die **Längengrade** (richtiger Längenhalfkreise) oder **Meridiane** reichen vom Nordpol bis zum Südpol und werden in $2 \cdot 90^\circ$ geteilt. Die **Breiten-** oder **Parallelkreise** verlaufen von Osten nach Westen und werden in 360° unterteilt. Wir sahen, daß die Polhöhe sich um 20° ändert, wenn man sich um 2222 km auf einem Meridian bewegt. In § 36, 5 werden wir zeigen, daß sich gleichzeitig auch die geographische Breite um 20° ändert.

Also hat ein Breitengrad die Länge 111,1 km, und der Erdumfang beträgt $360 \cdot 111,1 \text{ km} = 40000 \text{ km}$. Hieraus ergibt sich der Erdhalbmesser zu 6370 km, die Erdoberfläche zu 500 Millionen km^2 und das Erdvolumen zu 1 Billion km^3 .

§ 34. Die Achsendrehung der Erde

1. Relativität der Bewegung. Wir denken uns eine Taschenuhr ohne Deckglas mit einem 24stündigen Zifferblatt. Der Minutenzeiger sei entfernt; der recht kräftig gehaltene Stundenzeiger sei auf das 10- oder 20fache verlängert; er dreht sich in 24 Stunden einmal um den Mittelpunkt der Uhr rechts herum und hält die Uhrzeit an. Jetzt halten wir nicht die Uhr, sondern nur das Ende des Zeigers fest; das Uhrwerk geht weiter und bewegt nun die Uhr links herum, unter dem Zeiger fort; dieser zeigt auch jetzt die richtige Zeit. Nun befestigen wir in Gedanken am Ende des Zeigers eine Kugel; sie bedeutet die Sonne. Auch die Uhr denken wir uns kugelförmig; sie bedeutet die Erde. Wir erkennen: Es kommt für einen Erdbewohner die gleiche Erscheinung zustande, mag die Erde ruhen und die Sonne sich in 24 Stunden einmal in der Richtung *OSWNO* um die Erde herum drehen oder mag die Sonne ruhen und die Erde in 24 Stunden in entgegengesetzter Richtung einmal um ihre Achse rotieren. Zur Beschreibung unserer Beobachtungen ist die eine Annahme genau so geeignet wie die andere. Es gibt nun aber doch eine Reihe von Gründen, die für die Achsendrehung der Erde sprechen; zwei der bekanntesten sind die folgenden.

2. Nachweis der Erdrotation durch Fallversuche. Tycho de Brahe (§40) hatte als Argument gegen die Erddrehung angeführt, daß dann ja ein aus großer Höhe herabfallender Körper nach Westen hinter der Erde zurückbleiben müsse, indem diese unter ihm sozusagen davonlief, und das wurde niemals beobachtet. Galilei und Newton hatten im Gegenteil eine Abweichung nach Osten als Beweis für die Erdrotation vorausgesagt. Bei ruhender Erde nämlich würde eine von *A* aus fallende Bleikugel den Fußpunkt *F* der Lotrechten *AF* erreichen (Abb. 131). Bei rotierender Erde hat die relativ zur Erde ruhende Kugel in größerer Entfernung von der Erdachse eine größere Geschwindigkeit als der Fußpunkt jener Lotrechten. Da die Kugel diese größere west-östliche Geschwindigkeit während des Fallens beibehält, eilt sie dem Erdboden ein wenig nach Osten voraus und erreicht ihn, wenn *A* nach *A'* gelangt ist, im Punkt *B*. Bei einem Fallversuch aus einer Höhe von 158,5 m ergab sich in der Tat eine östliche Abweichung; sie betrug 28 mm, die Rechnung hatte 27,5 mm ergeben. Benzenberg wiederholte derartige schon vor ihm angestellte Versuche im Turm der Michaeliskirche in Hamburg (1802).

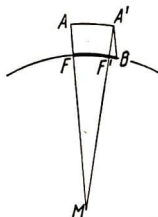


Abb. 131. Benzenbergs Fallversuch. (Die Figur ist nicht maßstabgerecht.)

$$AA' = FB; FB > FF'$$

3. Nachweis der Erdrotation durch Pendelversuche. Ein schwingendes Pendel behält seine Schwingungsebene unverändert bei (Versuch mit einer Schwingmaschine). Hinge man ein Pendel über dem Nordpol auf, so würde, falls sich die Erde von Westen nach Osten in 24 Stunden einmal herumdreht, die Schwingungsebene des Pendels scheinbar eine Umdrehung im entgegengesetzten Sinne ausführen. Am Äquator erfährt offenbar weder ein in der Meridian- noch ein in der Äquatorebene schwingendes Pendel eine Ablenkung. In Orten mittlerer geographischer Breite muß die Schwingungsebene eine mathematisch berechenbare Drehung erfahren, die in Berlin in einem Sterntag $285\frac{1}{2}^\circ$ beträgt. Diese Folgerung aus der Annahme der Achsendrehung ist durch Versuche immer wieder bestätigt worden, zum erstenmal durch Foucault (1851) im Pariser Observatorium, daraufhin im Pantheon mit einem 62 m langen Pendel.

4. Der erste Hauptsatz des Kopernikanischen Systems. Für Kopernikus war der wichtigste Grund zur Aufstellung des heliozentrischen Systems die ungeheure Entfernung der Gestirne. Er hielt es für unmöglich, daß sie sich in einem Tage um die Erde drehen. Wir können heute hinzufügen, daß es im höchsten Maße unwahrscheinlich ist, daß die Unzahl von Fixsternen, von denen die entferntesten vielmillionenmal so weit von uns entfernt sind wie die nächsten, alle ihren Umschwung um die Erde in genau der gleichen Zeit vollenden sollten. Ihren eifrigsten Verfechter fand die neue Lehre in Galilei, der sie in seinem „Dialog über die beiden größten Weltsysteme“ gegen alle erdenklichen Einwände verteidigte. Galileis Entdeckung der vier größten Jupitermonde und die von Olaf Römer zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit (§ 11, 5) benutzten Tatsachen sind weitere Beweise für die Kopernikanische Lehre. Ein wesentlicher Grund für die Bevorzugung der heliozentrischen Auffassung beruht auch darin, daß sie die Vorgänge am Himmel weit einfacher erklärt, als es im geozentrischen System möglich ist. Das wird uns bei der Beschreibung der Planetenbewegung besonders deutlich werden. Wir fassen unsere Ergebnisse zusammen in den **ersten Hauptsatz** der Kopernikanischen Lehre:

Die Erde dreht sich in bezug auf den Fixsternhimmel um ihre Achse von West über Süd gen Ost völlig gleichförmig, und zwar vollendet sie eine volle Drehung in einem Sterntag (23 h 56 min mittlerer Sonnenzeit); diese Drehung heißt die tägliche Rotation der Erde.

So erklärt es sich, daß sich alle Fixsterne scheinbar in Kreisen bewegen, deren Ebenen parallel sind und auf der Himmelsachse senkrecht stehen. Wenn ein Fixstern „untergeht“, hebt sich in Wirklichkeit der Westrand des Horizontes über ihn empor.

5. Geographische Breite und Polhöhe. Setzen wir unsere Reise auf dem in Abb. 130 dargestellten Meridian von *A* aus über *C* nach Norden hin fort, so kommen wir schließlich zu einem Erdort, an dem der Himmelspol für uns im

Zenit steht. Diesen Ort nennen wir den Nordpol (N) der Erde. Hiernach liegt die Erdachse in der Himmelsachse. Der Erdäquator ist vom Nordpol überall 90° entfernt. MQ ist ein Äquatorradius, und QMA ist die geographische Breite des Ortes A . Wir denken uns durch den Erdmittelpunkt M zur Horizontebene von A die parallele Ebene gelegt; die Himmelsachse bildet mit ihr einen Winkel NMR , der gleich der Polhöhe des Beobachtungsortes ist, denn die Schenkel der beiden Winkel sind paarweise parallel. Nun wird sowohl $\angle NMR$ wie auch $\angle QMA$ durch $\angle AMN$ zu 90° ergänzt; daraus folgt:

Die Polhöhe eines Erdortes ist gleich seiner geographischen Breite.

In Abb. 132 ist der zum Beweis dieses wichtigen Satzes erforderliche Teil der früheren Abbildung wiederholt. Die geographische Breite ist mit φ , die Polhöhe mit ψ bezeichnet. Die Horizontebene berührt die Erdkugel im Beobachtungsort A . Die Ebene, die durch den Erdmittelpunkt parallel zur Tangentialebene gelegt ist, heißt mathematischer Horizont. Der Erdradius AM ist, verglichen mit der Entfernung der Gestirne, sehr klein. Er beträgt 6370 km; der Mond hingegen ist fast 400 000 km, die Sonne 150 000 000 km und die übrigen Fixsterne sind noch sehr viel weiter von uns entfernt. Infolgedessen gehen die Gestirne für beide Horizonte gleichzeitig auf. Deshalb dürfen wir uns bei der Beschreibung ihrer Bewegungen auf den mathematischen Horizont beziehen, indem wir uns in den Erdmittelpunkt versetzt denken. Von der Erdmitte aus können wir alle Linien der Erdkugel auf die konzentrische Himmelskugel projizieren. Dabei sind Erd- und Himmelsäquator konzentrische Kreise. Jedem Stundenkreise entspricht ein Erdmeridian, der mit dem Stundenkreis in derselben durch die Erd- und Himmelsachse gelegten Ebene liegt. Den Parallelkreisen am Himmel entsprechen die Parallel- oder Breitenkreise der Erdoberfläche; im besonderen werden bei der Projektion aus den irdischen Wendekreisen die himmlischen.

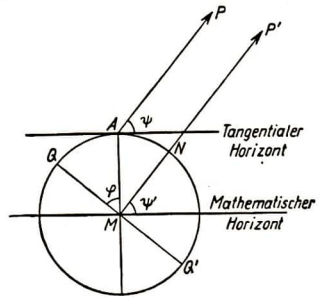


Abb. 132. Polhöhe gleich geographische Breite

§ 35. Die jährliche Bewegung der Erde

1. Der zweite Hauptsatz des Kopernikanischen Systems. Ebenso wie die tägliche Bewegung des Fixsternhimmels ist auch die tägliche Drehung der Sonne im wesentlichen aus der Drehung der Erde um ihre Achse zu erklären. Daß aber die Sonne zu ihrem täglichen Umschwung vier Minuten länger braucht als der Fixsternhimmel, erklärt sich aus dem folgenden zweiten Hauptsatz der Kopernikanischen Lehre:

Die Erde dreht sich in einem Jahre in gleichförmiger Bewegung auf einem Kreise um die in bezug auf den Fixsternhimmel ruhende Sonne; man nennt diese Bewegung die jährliche Revolution der Erde.

Es ist für das erste Verständnis belanglos, daß die jährliche Erdbahn nicht genau kreisförmig und daß die Bewegung der Erde auf ihr nicht genau gleichförmig ist (s. § 40). Ferner wissen wir heute, daß die Sonne relativ zu den Fixsternen nicht ruht, sondern samt der Erde und den übrigen Planeten mit einer Geschwindigkeit von 20 km je Sekunde durch den Himmelsraum fliegt.

Die Erde vollendet ihren Umlauf um die Sonne in $365\frac{1}{4}$ Sonnentagen = 366 $\frac{1}{4}$ Sterntagen, und zwar dreht sie sich im Sinne *WSO*, denn in diesem Sinne scheint sich die Sonne durch die Zeichen des Tierkreises zu bewegen. Wenn die Sonne von der Erde aus gesehen nacheinander die Zeichen Widder, Stier, Zwillinge durchläuft, bewegt sich die Erde von der Sonne aus gesehen durch die diametral gegenüberliegenden Tierkreiszeichen Waage, Skorpion, Schütze.

2. Die Jahres- und die Tageszeiten. Um nun die „scheinbare“ Bewegung der Sonne am Himmelsgewölbe aus der „wirklichen“ Bewegung der Erde abzuleiten, müssen wir annehmen: Die Erdbahn liegt in einer durch den Mittelpunkt der Sonne gelegten Ebene, und zwar ist dies die Ebene der Ekliptik.

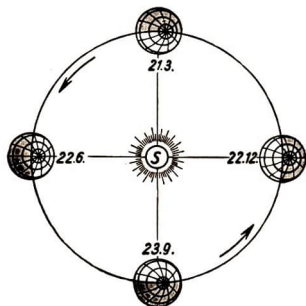


Abb. 133. Zur Entstehung der Jahreszeiten. (Inwiefern ist die Abbildung durchaus nicht maßstabgerecht?)

Die Erdbachse zeigt an allen Punkten der Bahn in derselben Richtung nach dem unendlich fernen Himmelspol, denn zu diesem weist zu allen Zeiten die Himmelsachse. Die Erdbachse beschreibt also, sich selbst parallel bleibend, im Laufe eines Jahres die Oberfläche eines Zylinders. Sie bildet mit der Ebene der Ekliptik jederzeit einen Winkel von $66\frac{1}{2}^\circ$, so daß die irdische (und himmlische) Äquatorebene um $23\frac{1}{2}^\circ$ gegen die Ekliptikenebene geneigt ist. Hieraus erklären sich dann die Jahres- und Tageszeiten folgendermaßen.

Am 22. 6. ist, wie Abb. 133 zeigt, die Erdbachse mit ihrem Nordpol zur Sonne hin geneigt. Die Sonnenstrahlen fallen auf die Horizontebenen der Orte unter $23\frac{1}{2}^\circ$ nördlicher Breite mittags senkrecht auf. Für die Horizonte aller Orte eines nördlicheren Parallelkreises ist der Winkel, unter dem die Strahlen bei der Sonnenkulmination auf die Erdoberfläche fallen, größer als an irgendeinem anderen Tage des Jahres, und zwar ist er für alle Orte ein und desselben Parallelkreises im Laufe von 24 Stunden der gleiche. Die nördliche

Halbkugel hat Sommer, die südliche Winter. — Am 23. 9. ist weder die nördliche noch die südliche Halbkugel bevorzugt. Für die Bewohner am Äquator steht die Sonne mittags im Zenit. Für den Nordpol beginnt die halbjährige Polarnacht. Überall auf der Erdoberfläche ist Tag und Nacht gleichlang. — Abermals ein Vierteljahr später wendet die Erde ihren Nordpol von der Sonne ab (Abb. 133). Auf der nördlichen Halbkugel herrscht Winter; auf ihr liegt dann mehr als die Hälfte aller Parallelkreise in Dunkelheit; die Nacht ist länger als der Tag. — Am 21. 3. beginnt für uns der Frühling.

Wenn wir uns jetzt vorstellen, wie uns der Lauf der Sonne erscheinen muß, während sich die Erde und mit ihr unser Standort in einem Sterntag einmal um ihre Achse dreht und gleichzeitig auf ihrer Bahn um die Sonne, der Ekliptik, in dem gleichen Drehungssinn um ungefähr 1° weiterwandert, erkennen wir eine Windung der früheren Schraubenlinie wieder, und die scheinbare Bewegung der Sonne ist aus den wirklichen Bewegungen der Erde erklärt.

Wir haben bei den vorstehenden Überlegungen die Entstehung der Jahreszeiten auf die Größe des Winkels zurückgeführt, unter dem die Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche fallen. In Abb. 134 ist das gleiche Strahlenbündel (etwa mit quadratischem Querschnitt) zweimal dargestellt, in *a*, wie es in unserer geographischen Breite am 21. 3., und in *b*, wie es am 22. 6. einfällt. Man sieht, daß es sich in *a* auf eine etwa 1,4mal so große Fläche verteilt wie in *b*; deshalb ruft es am 21. 3. eine entsprechend geringere Erwärmung der Erdoberfläche hervor. Hinzu kommt, daß im ersten Fall der Weg durch die Erdatmosphäre länger ist und deshalb ein größerer Teil der Wärme auf diesem Wege verschluckt wird.

Zur Übung: Unter der Breite $52\frac{1}{2}^\circ$ (Berlin) bilden die Sonnenstrahlen am Mittag des 22. 6. mit dem Erdboden den Winkel $37\frac{1}{2}^\circ + 23\frac{1}{2}^\circ = 61^\circ$ und am 22. 12. den Winkel $37\frac{1}{2}^\circ - 23\frac{1}{2}^\circ = 14^\circ$. Stelle durch eine Zeichnung fest, wie sich die Flächen zueinander verhalten, die von Sonnenstrahlbündeln gleichen Querschnittes erwärmt werden (Antwort: 1 : 3,6)!

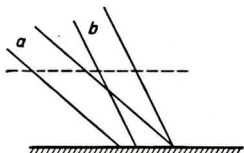


Abb. 134. Abhängigkeit der Erwärmung vom Einfall der Sonnenstrahlen

§ 36. Die scheinbare Mondbewegung

1. Die Mondphasen. Der Mond leuchtet nicht im eigenen Lichte, sondern er wirft nur das Licht zurück, das die Sonne ihm zustrahlt. Deshalb leuchtet immer nur die der Sonne zugewandte halbe Oberfläche, und wir sehen von dieser nur den Teil, der uns zugekehrt ist. Man unterscheidet vier Hauptphasen¹⁾: Erstes Viertel, Vollmond, letztes Viertel, Neumond. Wir fangen an, den Mond abends zu beobachten, wenn er noch „jung“ ist. Er steht dann als schmale Sichel im Westen am Himmel, die konvexe Seite der untergegangenen Sonne zugewandt. Bald nach der Sonne geht auch der Mond unter. Am folgenden Abend ist die Sichel breiter. Sie ist hinter der Sonne zurückgeblieben und zwar um 50 Minuten. Die Rektaszension der Sonne hat um 4 min, die des Mondes aber um 54 min zugenommen.

1) phásis (griech.) = das Erscheinen

Ein „Mondtag“ d.i. die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kulminationen des Mondes, ist also um 50 Minuten länger als ein mittlerer Sonnentag.

So vergrößert sich der Abstand des Mondes von der Sonne von Tag zu Tag, und nach einer Woche steht der Mond als erstes Viertel bei Sonnenuntergang über dem Südpunkte und geht um Mitternacht unter. Wieder eine Woche später geht der Mond als Vollmond im Osten auf, wenn die Sonne untergeht. Und wenn abermals eine Woche verflossen ist, erscheint er gegen Mitternacht als letztes Viertel über dem östlichen Horizont. Der leuchtende Teil seiner Scheibe wird dann von einem Halbkreis und einem Durchmesser begrenzt. In den folgenden Tagen wird die Sichel immer schmaler. Wieder wendet sie ihre konvexe Seite der Sonne zu. Man kann aus ihr jetzt den Buchstaben *Q* (abnehmend) formen, während sich die Sichel des zunehmenden Mondes zu *3* vervollständigen läßt. Denkt man sich die Sichel des zu- oder abnehmenden Mondes als Flitzbogen, so zielt ein aufgelegter Pfeil stets zur Sonne hin.

Rund vier Wochen nach unserer ersten Beobachtung geht der Mond als Neumond mit der Sonne auf und unter, aber wir sehen ihn nicht. Man bezeichnet die Zeit von einem Neumond bis zum nächsten als einen synodischen¹⁾ Monat. Er umfaßt

$$29\text{d } 12\text{h } 44\text{min} \approx 29\frac{1}{2} \text{ Tage.}$$

2. Siderischer Monat. Da der Mond bei seinem täglichen Umlauf gegen die Sonne zurückbleibt, verzögert er sich erst recht dem Fixsternhimmel gegenüber; mit anderen Worten: Am rotierenden Fixsternhimmel bewegt sich der Mond rechtläufig, also von West über Süd nach Ost, und zwar viel schneller als die Sonne, denn er legt nicht in einem Jahre, sondern in einem Monat einen vollen Kreis zurück. Der Mond durchläuft daher in vier Wochen den ganzen Tierkreisgürtel. Beobachten wir den jungen Mond als ganz schmale Sichel im Herbst im Zeichen der Waage, so steht er zwei bis drei Tage später im Zeichen des Skorpions, zwei Wochen später im Zeichen des Widders und nach weiteren zwei Wochen wieder bei demselben Fixstern wie am Anfang. Mittlerweile ist aber auch die Sonne um ein Sternbild auf der Ekliptik vorgerückt; deshalb dauert es noch zwei Tage, bis ein synodischer Umlauf vollendet ist, und die Dauer eines Mondumlaufs am Fixsternhimmel, der sog. siderische Monat, ist kürzer als der synodische. Er beträgt im Durchschnitt

$$27 \text{ d } 7 \text{ h } 43 \text{ min } 12 \text{ s} \approx 27\frac{1}{3} \text{ Tage.}$$

3. Die Mondbahn am rotierenden Fixsternhimmel. Beobachten wir, an welchen Stellen des östlichen und westlichen Horizontes der Mond auf- und untergeht und in welcher Höhe über dem Südpunkt er kulminiert, so stellen wir fest, daß er sich ähnlich verhält wie die Sonne. Wenn er heute im Ostpunkte aufgeht, so liegt sein Aufgangspunkt an den folgenden Tagen immer weiter nach

1) *synodos* (griech.) = Zusammentreffen, gleichzeitiges Eintreten

Norden oder nach Süden hin, und seine Höhe zur Zeit der Kulmination wird größer oder kleiner. Er beschreibt also am ruhenden Himmel wie die Sonne eine Schraubenlinie. Nur sind deren Windungen viel lockerer; schon eine Woche, nachdem er im Äquator stand, durchläuft der Mond ungefähr den nördlichen oder südlichen Wendekreis und kehrt dann zum Äquator zurück. Während bei der Sonne die Änderung der Deklination in einem Tage kaum merkbar ist, ist sie beim Monde gut zu beobachten. Dem rotierenden Fixsternhimmel gegenüber legt der Mond also in einem Monat einen Kreis zurück, dessen Ebene gegen den Äquator geneigt ist. Sie fällt fast, aber nicht genau, mit der Ebene der Ekliptik zusammen, indem sie mit ihr einen Winkel von $5^{\circ}9'$ bildet. Dort, wo der Mond über die Ekliptik emporsteigt, liegt der aufsteigende Knoten; einen halben Monat später geht er im absteigenden Knoten durch sie hindurch. Der (auf einem Stundenkreis gemessene) Winkel, um den sich der Mond höchstens vom Äquator entfernen kann, beträgt rund $23\frac{1}{2}^{\circ} + 5^{\circ} = 28\frac{1}{2}^{\circ}$.

Die Knoten weichen auf der Ekliptik in einem Jahre um etwa 19° zurück; ein ganzer Umlauf der Knoten beansprucht $\frac{360}{19} = 19$ Jahre. Diese Zeitspanne, die schon den Chaldäern bekannt war, nannten die Griechen Saros¹⁾. Sie diente ihnen zur Voraussage der Finsternisse.

Bei der Kleinheit des Winkels, den die Ebene der Mondbahn mit der Ebene der Ekliptik bildet, dürfen wir zur Erklärung einiger uns auffallender Erscheinungen näherungsweise annehmen, daß beide Ebenen zusammenfallen.

Zu diesen Erscheinungen gehört erstens die Beobachtung, daß der Vollmond im Winter etwa doppelt so lange den nächtlichen Himmel erhellt wie im Sommer. Da nämlich der Mond in der Phase des Vollmondes, von der Erde aus gesehen, der Sonne auf der Ekliptik gegenübersteht, befindet er sich ebensolange über dem Horizont wie die Sonne unter ihm.

Ferner: Eine Bauernregel sagt: „Liegt der Mond auf dem Rücken, läuft das Wasser über die Brücken.“ Das bedeutet: Zur Zeit der Frühlings-Schneeschmelze bietet die abends sichtbare zunehmende Mondsichel

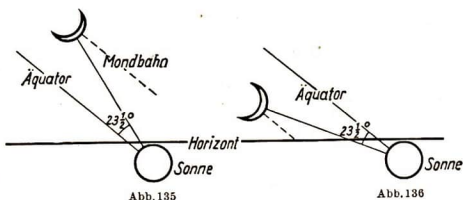


Abb. 135

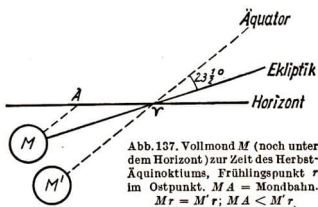
Abb. 136

Abendliche Stellung der Mondsichel
Abb. 135 z. Zt. des Frühlings-Äquinoktiums
Abb. 136 z. Zt. des Herbst-Äquinoktiums

den Anblick der Abb. 135, während sie im Herbst viel steiler steht (Abb. 136). Wir denken uns in den Mittelpunkt der in Abb. 128 dargestellten Himmelskugel versetzt. Es sei zur Zeit des Neumondes, der dem Frühlings-Äquinok-

1) saros (chaldäisch) = Periode, Zyklus

tium am nächsten liegt. Wir blicken abends nach Westen; die nahe am Widderpunkt stehende Sonne ist untergegangen, der in derselben Richtung stehende Neumond mit ihr. Einige Tage später hat sich die Sonne, auf der Ekliptik emporsteigend, ein wenig vom Widderpunkte entfernt, und der Mond hat in derselben Richtung, ebenfalls rechtläufig, einen wesentlich größeren Bogen zurückgelegt. Dieser Augenblick, bald nach Sonnenuntergang, ist in Abb. 135 festgehalten; die leuchtende Sichel ist der Sonne zugewandt. Zur Zeit der Herbst-Tagundnachtgleiche tritt der Mond ins Zeichen der Waage. Um die Lage der Ekliptik zur Zeit des Sonnenuntergangs zu erhalten, müssen wir sie um 180° um die Himmelsachse herum rotieren lassen. Dieselbe Überlegung wie vorhin zeigt, daß jetzt im Herbst einige Tage nach Neumond die Mondsichel abends den Anblick der Abb. 136 bietet.



Und drittens: Wir sagten oben, daß der Mond täglich 50 Minuten hinter der Sonne zurückbliebe. Müßte er dann nicht auch an jedem Tage fast eine Stunde später aufgehen als am Vortage? Die Angaben des Kalenders stimmen dazu nicht; aufmerksamen Beobachtern entgeht es auch nicht, daß besonders im September der Mond zur Vollmondzeit sich einige Abende hindurch in seiner Aufgangs-

zeit nur wenig verspätet. Die Folgerung, daß der Mond alltäglich 50 Minuten später aufgehen muß, würde richtig sein, wenn er seinen monatlichen Umlauf im Himmelsäquator ausföhrte; er würde dann immer im Ostpunkte aufgehen. In Abb. 137 bedeute die Strecke γM den Bogen, um den der Mond sich dann gegen den vorhergehenden Tag verspätet hätte. Ebenso lang ist der tatsächlich auf der Ekliptik liegende Bogen γM . Man sieht, daß jetzt der Weg MA bis zum Horizont wesentlich kürzer ist, als wenn der Mond auf dem Äquator um ebensoviel Grad zurückgeblieben wäre. Ein halbes Jahr später ist es zur Vollmondzeit umgekehrt.

§ 37. Der Mond im Kopernikanischen System

Wir wollen jetzt untersuchen, wie unsere Beobachtungen am Monde vom heliozentrischen Standpunkte aus zu erklären sind.

1. Erklärung der Mondphasen. Der Mond ist das einzige Gestirn, das auch nach der heliozentrischen Auffassung die Erde umkreist. Die Umlaufszeit, der siderische Monat, beträgt $27\frac{1}{3}$ Tage; sie ist auch die Zeit, die der Mond braucht, um, von der Erde aus gesehen, einen Umlauf am Himmel zu vollenden.

In Abb. 138 bedeuten die drei geraden Pfeile die Richtung der Sonnenstrahlen und die acht kleineren Kreise den Mond zu acht verschiedenen Zeiten seines Umlaufs um die Erde *E*. Je nach seiner Stellung zu Sonne und Erde kehrt uns der Mond mehr oder weniger von seiner beleuchteten Seite zu. In Stellung I (erstes Viertel) ist von der Erde aus gesehen die rechte Hälfte des Mondes beleuchtet. Eine Woche später, Stellung II, haben wir Vollmond, bei III letztes Viertel und bei IV Neumond. In der zwischen III und IV liegenden Phase kann aus der von uns gesehenen hellen Mondsichel ein *Q* gebildet werden. Wenn die Erde sich während eines Mondumlaufs nicht gleichzeitig um die Sonne bewegte, würden wir $27\frac{1}{2}$ Tage nach einem Vollmond (Stellung II) wieder Vollmond haben. Mittlerweile ist aber auch die Erde auf ihrer Bahn in der Richtung des schwach gekrümmten Pfeiles weitergewandert und hat dabei den Mond mitgenommen. Deshalb vergehen noch gut zwei Tage, bis der Mond wieder in der Verlängerung der Geraden Sonne–Erde steht, und die Zeit von Vollmond zu Vollmond, der synodische Monat, ist $29\frac{1}{2}$ Tage lang.

Das Bogenstück, das die Erde in einem synodischen Monat zurücklegt, ist gegen den Abstand des Mondes von der Erde sehr groß (rund 200 mal so groß). Deshalb ist die Mondbahn relativ zur Sonne nicht eine Schleifenlinie, sondern eine von der Ekliptik nur sehr wenig abweichende Schlangenlinie, die, auch wenn der Mond auf der Sonnenseite der Erde steht, also um die Zeit des Neumondes, zur Sonne hin konkav ist. Man erkennt dies, wenn man zu dem Bogen, den die Erde von Vollmond zu Vollmond um die Sonne herum zurücklegt, maßstabgerecht die Stellungen des Mondes in Abständen von je zwei Tagen einzeichnet.

Wir haben bis jetzt so getan, als ob die Ebene der Mondbahn mit der durch den Sonnenmittelpunkt gelegten Ebene der Erdbahn zusammenfielen; so ist auch Abb. 138 gezeichnet. Wäre das der Fall, so müßte bei jedem Vollmond eine Mondfinsternis und bei jedem Neumond eine Sonnenfinsternis stattfinden. In Wirklichkeit sind die beiden Ebenen um etwa 5° gegeneinander geneigt. Finsternisse können deshalb nur eintreten, wenn die Mondbahn gerade zur Zeit des Neu- oder Vollmondes die Ebene der Erdbahn (im auf- oder absteigenden Knoten, § 36, 3) schneidet. Aus diesem Grunde heißt die Erdbahn „Ekliptik“¹⁾.

Zur Übung: Erkläre an Hand der Abb. 138, zu welchen Tageszeiten und in welchen Stellungen gegen die Sonne die verschiedenen Mondphasen von der Erde aus sichtbar sind!

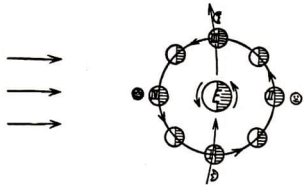


Abb. 138. Zur Erklärung der Mondphasen

1) éclipse (griech.) = das Verschwinden

2. Entfernung und Größe des Mondes. Wohl jeder hat schon beobachtet, daß der Vollmond beim Auf- oder Untergang bedeutend größer erscheint, als wenn er hoch am Himmel steht. Es ist dies eine optische Täuschung. Messungen lehren, daß in Wirklichkeit der Mond Durchmesser vom Horizont bis zum

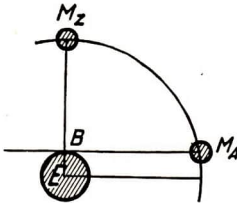


Abb. 139. Entfernung des Mondes

Zenit um $\frac{1}{60}$ zunimmt. Diese Tatsache kann zur Bestimmung der Entfernung des Mondes von der Erde dienen. In Abb. 139 bedeutet E die Erdkugel, M_A den Mond, wenn er für einen (in der heißen Zone gelegenen) Erdort B aufgeht, und M_Z den Mond im Zenit. Hier ist er dem Beobachter in B um den Erdradius näher als beim Aufgang. Deshalb erscheint sein Durchmesser um $\frac{1}{60}$ vergrößert, und wir schließen, daß er uns um $\frac{1}{60}$ nähergerückt ist. (Die Mathematik lehrt, daß dieser Schluß bei

der Kleinheit der Winkel, unter denen der Mond erscheint, berechtigt ist.) Die Mondentfernung beträgt also das 60fache des 6370 km langen Erdradius. Genauere Messungen ergeben:

Der Abstand des Mondmittelpunktes vom Erdmittelpunkt beträgt 384 000 km.

Jetzt läßt sich auch der Mond Durchmesser berechnen. Er erscheint uns unter einem Winkel von $31'$. Wir denken uns um den Erdmittelpunkt einen Kreis gelegt, der durch den Mondmittelpunkt geht, also den Radius $r = 384\,000$ km hat. Ist x der gesuchte Durchmesser, so besteht die Proportion: $x : 2\pi r = 31' : 360^\circ$. Hieraus folgt $x = 3463$ km. Genauer gilt:

Der Mond Durchmesser beträgt 3480 km.

Hieraus ergeben sich dann auch die Oberfläche und das Volumen des Mondes: $O = 38$ Millionen km^2 und $V = 22$ Milliarden km^3 .

3. Entfernung und Größe der Sonne. Um die Entfernung eines unzugänglichen Punktes zu finden, messen wir in den Endpunkten einer Strecke von be-



Abb. 140. Entfernung der Sonne.
(Sie ist fast 100 000 mal so groß wie der Mondhalbmesser.)

kannter Länge, der sog. Basis, die Winkel, die sie mit den nach dem Punkte zielenden Visierlinien bildet, und berechnen die Seiten des aus den genannten Strecken

gebildeten Dreiecks auf trigonometrischem Wege. Ohne Trigonometrie löst man die Aufgabe angenähert durch eine möglichst genaue Zeichnung. Nachdem wir den Mondabstand gefunden haben, wollen wir nach dieser Methode die Entfernung der Sonne bestimmen.

Wenn unser im Punkt B befindliches Auge den Mond genau im ersten Viertel sieht (Abb. 140), müssen die Sonnenstrahlen auf der Grenze zwischen be-

leuchteter und nichtbeleuchteter Mondhälfte senkrecht stehen. Sehr genaue Messungen lehren, daß dann der von der Basis Auge–Mond (*BM*) und dem Visierstrahl Auge–Sonne (*BS*) gebildete Winkel *MBS* nicht 90° beträgt – so wäre es nur, wenn die Entfernung der Sonne unmeßbar groß wäre – sondern nur $89^\circ 51'$. Berechnen wir ein Dreieck mit den Winkeln 90° und $89^\circ 51'$, so finden wir, daß seine längste Seite ungefähr 400mal so lang ist wie die kürzeste. Also ist die Sonne 400mal so weit von uns entfernt wie der Mond.

Die Sonnenentfernung beträgt rund 150 Millionen km.

Man veranschauliche sich die Länge dieser Strecke an der Zeit, die ein Schnellzug (100 km je Stunde) und der Schall (330 m je Sekunde) und das Licht (300 000 km je Sekunde) brauchen, um sie zu durchheilen.

Die Genauigkeit des Resultates hängt bei der Methode, nach der wir die Entfernung der Sonne bestimmt haben, ab von dem Verhältnis der Länge der Basis zu der zu messenden Entfernung. Hätten wir statt des Mondabstandes die größte uns auf der Erde zugängliche Strecke, den Erddurchmesser, zugrunde gelegt, so würde ein geringer Fehler in der Winkelmessung das Ergebnis in weit höherem Maße verfälscht haben, als bei der 60mal so großen Basis Erde–Mond.

Jetzt finden wir auch den Durchmesser der Sonne. Mond und Sonne erscheinen unter dem gleichen Winkel von $\frac{1}{2}^\circ$. Da die Sonne 400mal so weit entfernt ist wie der Mond, muß sie auch einen 400mal so großen Durchmesser haben.

Der Sonnendurchmesser beträgt 1 390 000 km.

Wir vergleichen noch die Dimensionen der Sonne mit denen der Erde und finden: Durchmesser, Oberfläche und Rauminhalt der Sonne sind 109 , 109^2 , 109^3 mal so groß wie die entsprechenden Größen des Erdkörpers.

§ 38. Die Planetenbahnen in geozentrischer Darstellung

Außer der Sonne und dem Monde ändern noch fünf mit freiem Auge sichtbare Gestirne ihre Lage den Fixsternen gegenüber: Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn. Man nennt sie deshalb **Wandelsterne** oder **Planeten**¹⁾. Wir verfahren bei ihrer Behandlung wie beim Monde, beschreiben ihre Bewegung also zunächst vom geozentrischen und dann vom heliozentrischen Standpunkt aus. Ebenso wie der Mond stehen auch die Planeten stets in der Nähe der Ekliptik. Außer an ihrer Lagenänderung sind sie an ihrem ruhigen Lichte zu erkennen im Gegensatz zu den funkelnden hellen Fixsternen. Wie der Mond, so leuchten auch sie nur in reflektiertem Lichte.

Die Planeten nehmen an der scheinbaren täglichen Drehung des Himmels teil. Außerdem bewegen sie sich am rotierenden Himmel, und zwar wie Sonne und Mond im allgemeinen rechtläufig, also im Sinne WSO, zu Zeiten jedoch auch

1) *planētēs* (griech.) = umherwandelnd

rückläufig, so daß Schleifen zustande kommen, wie Abb. 141 eine der Marsbahn zeigt. Die Zahlen oben und rechts an der Figur bedeuten die Rektaszension und Deklination des Mars; auf seiner Bahn sind seine Stellungen in Ab-

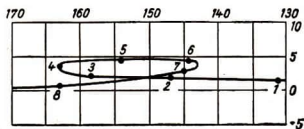


Abb. 141. Schleife der Marsbahn

ständen von je einem Monat markiert. Die Alten erklärten die Schleifenbahnen durch die Annahme, um die Erde drehe sich auf einer Kreisbahn der Mittelpunkt (1, 2, 3, ... in Abb. 142) eines kleineren Kreises, und dieser, der Epizykel¹⁾, sei die kreisförmige Bahn des Planeten. Wenn der Planet sich auf dem Epizykel nicht bewegte, würde

er mit ihm in gleichen aufeinanderfolgenden Zeitspannen nach I, II, III, ... gelangt sein. Von diesen Punkten ist der Planet aber auf dem Epizykel um immer gleiche Bogen weitergewandert und zu den durch ausgefüllte kleine Kreise markierten Stellen gelangt. Der Erdbewohner hat dann in der Tat den Eindruck, als ob der Planet bald vor-, bald rückwärts liefe.

Genaueren Beobachtungen am Himmel wurde die gegebene Erklärung nicht gerecht. Man nahm weitere Epizykel zur Hilfe; die Theorie wurde immer

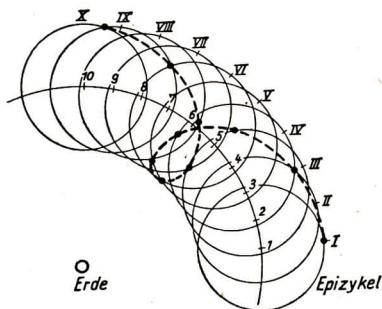


Abb. 142

Zur Epizykel-Theorie des Apollonius (265—190 v. u. Ztr.). (Die Ebenen der Epizykel sind gegen die Zeichenebene ein wenig geneigt zu denken.)

als Morgenstern; sie entfernt sich von der Sonne nie weiter als 48° . Merkur kehrt sogar schon, wenn er sich um 28° von der Sonne entfernt hat, zu ihr zurück; deshalb ist er nur schwer in der Abend- oder Morgendämmerung aufzufinden. Wie beim Monde nennt man auch bei den Planeten die Zeit zwischen dem Durchgang durch den rotierenden Stundenkreis eines Fixsterns bis zum

komplizierter. So wenig wir uns heute mit ihr befreunden können, weil wir, abgesehen von den Mängeln der Erklärung, nach den wirkenden Kräften fragen, so sehr lag für die Griechen die überzeugende Kraft der Vorstellung in der Harmonie der gleichförmigen Kreisbewegungen.

Alle Planeten können sowohl abends als auch morgens am Himmel stehen, Venus jedoch nur am abendlichen Westhimmel — dann heißt sie Abendstern — oder am morgendlichen Osthimmel

als Morgenstern; sie entfernt sich von der Sonne nie weiter als 48° . Merkur kehrt sogar schon, wenn er sich um 28° von der Sonne entfernt hat, zu ihr zurück; deshalb ist er nur schwer in der Abend- oder Morgendämmerung aufzufinden. Wie beim Monde nennt man auch bei den Planeten die Zeit zwischen dem Durchgang durch den rotierenden Stundenkreis eines Fixsterns bis zum

1) epi (griech.) = auf; kýklos (griech.) = Kreis

folgenden Durchgang durch denselben Stundenkreis die siderische Umlaufszeit. Die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Stellungen eines Planeten zur Sonne heißt seine synodische Umlaufszeit. Die siderische Umlaufszeit der Venus beträgt 225, die synodische 584 Tage. Bei Jupiter und Saturn sind umgekehrt die siderischen Umlaufzeiten sehr viel länger als die synodischen.

§ 39. Die Planetenbahnen in heliozentrischer Darstellung

1. Der dritte Hauptsatz des Kopernikanischen Systems.

Wie die Erde, so bewegen sich auch alle anderen Planeten in kreisförmigen Bahnen um die Sonne.

Um keinen Irrtum aufkommen zu lassen, sei daran erinnert, daß die Bahnen nicht genau kreisförmig sind.

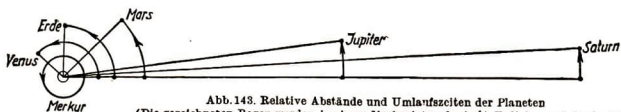


Abb. 143. Relative Abstände und Umlaufzeiten der Planeten
(Die gezeichneten Bogen werden in einem Merkurjahr oder in $\frac{1}{4}$ Erdjahr zurückgelegt.)

Kopernikus fügte also die Erde in die Reihe der Planeten ein. Daraus, daß Merkur und Venus nie in größerem Abstand als 28° bzw. 48° von der Sonne erscheinen, schloß er, daß ihre Bahnen innerhalb der Erdbahn liegen. Sie heißen die unteren Planeten. Die übrigen Planeten findet man in allen nur möglichen Winkelabständen von der Sonne. Sie stehen zu ihr in **Konjunktion**, wenn sie von der Erde aus gesehen in derselben Richtung stehen. Sie erscheinen in **Opposition**, wenn die Erde zwischen ihnen und der Sonne steht. Opposition ist nur für die sog. oberen Planeten möglich, die weiter von der Sonne entfernt sind als die Erde.

Die außerhalb der Saturnbahn die Sonne umkreisenden Planeten Uranus, Neptun und Pluto wurden erst nach Kopernikus mit Hilfe des Fernrohrs entdeckt, Pluto erst im Jahre 1930.

Nach ihrem Abstand von der Sonne folgen die Planeten also so aufeinander:

Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, Pluto.

Abb. 143 soll uns das Verhältnis der Abstände der Planeten von der Sonne und ihre Umlaufzeiten vor Augen führen. Man erkennt z. B., daß das Merkurjahr ein Viertel und das Marsjahr doppelt so lang wie ein Erdjahr ist.

Abb. 144 zeigt, daß Merkur, Venus, Erde und Mars mit Recht als die kleinen Planeten bezeichnet werden. Außerdem ist zum Vergleich ein Viertel eines durch den Sonnenmittelpunkt gelegten Schnittes in demselben Maßstab dargestellt.

	Mittlere Entfernung von der Sonne in km	Side- rische Umlaufs- zeit in Jahren	Syno- dische Umlaufs- zeit	Neigung der Bahn gegen die Ekliptik	Durch- messer in km	Masse in Erd- massen	Dichte- zahl	Anzahl der Monde
Merkur	$58 \cdot 10^6$	0,24	116 Tage	7°	4 800	0,04 (?)	3,7	0
Venus	$108 \cdot 10^6$	0,62	1 J. 219 T.	$3^\circ 24'$	12 200	0,82	5,2	0
Erde	$149,4 \cdot 10^6$	1,00	—	—	12 800	1,00	5,5	1
Mars	$228 \cdot 10^6$	1,88	2 J. 49 T.	$1^\circ 51'$	6 800	0,11	4,0	2
Jupiter	$778 \cdot 10^6$	11,86	1 J. 34 T.	$1^\circ 18'$	143 000	317,0	1,3	9
Saturn	$1430 \cdot 10^6$	29,46	1 J. 13 T.	$2^\circ 29'$	121 000	94,8	0,7	10
Uranus	$2870 \cdot 10^6$	84,02	1 J. 4 T.	$0^\circ 46'$	50 000	16,4	1,4	4
Neptun	$4490 \cdot 10^6$	164,78	1 J. 2 T.	$1^\circ 47'$	53 000	17,0	1,3	1
Pluto	$\sim 6000 \cdot 10^6$	~ 250		17°	5000 (?)	$\sim 0,8$		

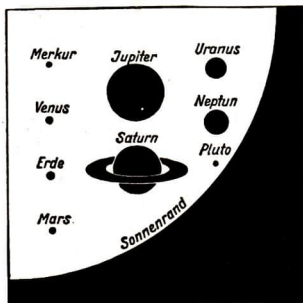


Abb. 144. Die relativen Größen der Planeten im Vergleich zur Sonne

Genauere Angaben bietet die vorstehende Tabelle. Aus ihr ist auch zu entnehmen, in welchen Entfernungen von der Sonne man Uranus, Neptun und Pluto in Abb. 143 zeichnen müßte.

Eine eigentümliche Beziehung besteht zwischen den Entfernungen der Planeten von der Sonne. Sie kommt in der sog. Bodeschen Reihe zum Ausdruck und lautet, wenn man die Planetoiden (s. § 42, 4) als einen Planeten zählt: Die Abstände der Planeten von der Sonne verhalten sich wie die um 4 vergrößerten Zahlen 0, 3, 6, 12, 24, ..., von denen jede mit Ausnahme der zweiten doppelt so groß ist wie die vorher-

gehende. In der folgenden Tabelle sind in der zweiten Spalte die Bodesche Reihe und in der dritten die wirklichen Entfernungen angegeben, wobei die Entfernung der Erde gleich 10 Längeneinheiten gesetzt wurde. Man sieht, daß außer bei den beiden äußersten Planeten die Übereinstimmung recht

Planet	Bodesche Reihe	Wirkliche Entfernung	Planet	Bodesche Reihe	Wirkliche Entfernung
Merkur	$0 + 4 = 4$	3,9	Jupiter	$48 + 4 = 52$	52,1
Venus	$3 + 4 = 7$	7,2	Saturn	$96 + 4 = 100$	95,7
Erde	$6 + 4 = 10$	10,0	Uranus	$192 + 4 = 196$	192
Mars	$12 + 4 = 16$	15,3	Neptun	$384 + 4 = 388$	301
Planetoiden .	$24 + 4 = 28$	15 bis 53	Pluto	$768 + 4 = 772$	402 (?)

gut ist. Schreibt man den Planeten Pluto die in der Reihe vorhergehende Zahl ($384 + 4 = 388$) zu – die Stelle für Neptun bleibt dann offen – so wird die Übereinstimmung noch vollkommener.

2. Die Planetenbewegung. Abb. 142 sollte dazu dienen, die merkwürdigen Schleifenbahnen der Planeten aus der Epizykelttheorie zu erklären. Das Gegenstück zu dieser Abbildung ist Abb. 145, an der wir erläutern wollen, wie die scheinbaren Schleifen in der Kopernikanischen Darstellung zustande kommen.

Die Erde umkreist die Sonne in der Ebene der Ekliptik vom Nordpol aus gesehen im entgegengesetzten Uhrzeigersinn, gleichsinnig mit ihrer Rotation. Zu Anfang der aufeinanderfolgenden Monate befindet sie sich in den Punkten I, II, III . . . Ein oberer Planet, z. B. Mars, steht gleichzeitig an den Stellen 1, 2, 3 . . . Die Ebene seiner Bahn ist gegen die der Ekliptik geneigt (die Neigung ist in der Abbildung übertrieben groß angenommen). Die scheinbare Bahn entsteht durch Projektion der wahren Planetenörter auf das ferne Himmelsgewölbe von den jeweiligen Erdörtern aus. So sind die Schleifen die Abbilder der Erdbahn, und die Zeit, die der Planet braucht, um seine Bahn von einem Punkte einer Schleife bis zum entsprechenden Punkte der nächsten Schleife zu durchlaufen, müßte mit der synodischen Periode übereinstimmen, also der Zeit, nach der Sonne, Erde und Planet wieder dieselbe Stellung zueinander haben. Dies ist tatsächlich so.

Eine weitere Bestätigung findet die Kopernikanische Lehre in der Aufdeckung des Zusammenhanges der synodischen mit der siderischen Periode der Planeten. In Abb. 146 sei SE_1P_1 die Oppositionsstellung eines oberen Planeten, SE_2P_2 die nächstfolgende. In dieser Zeit hat der Planet den zu dem Winkel α gehörigen Bogen P_1P_2 , die Erde einen vollen Kreis und den Bogen E_1E_2 zurückgelegt. Es sei nun T_1 ein Erdjahr, T_2 die siderische und T_2' die synodische Umlaufszeit des Planeten; dann gilt

$$\begin{aligned} \text{für die Erde: } (360 + \alpha) : 360 &= T_2' : T_1 \\ \text{und für den Planeten: } \alpha : 360 &= T_2' : T_2. \end{aligned}$$

Hieraus folgt, wenn wir die zweite Gleichung umformen in

$$\begin{aligned} (\alpha + 360) : 360 &= (T_2' + T_2) : T_2, \\ T_2' : T_1 &= (T_2' + T_2) : T_2. \end{aligned}$$

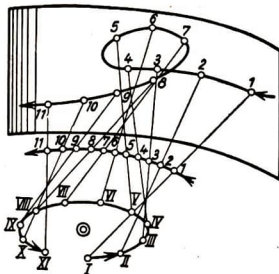


Abb. 145
Die scheinbare Bewegung eines oberen Planeten

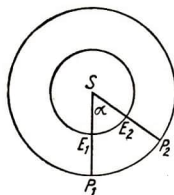


Abb. 146. Der Zusammenhang
von siderischer und synodischer
Umlaufzeit

Lösen wir die sich aus dieser Proportion ergebende Produktengleichung, nach T_2' auf, so ergibt sich

$$T_2' = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1}.$$

Für einen unteren Planeten erhält man

$$T_2' = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2}.$$

Wenn man nach dieser Gleichung aus der siderischen Umlaufzeit (s. Tab.) die synodische berechnet, erhält man angenähert die beobachteten Werte. Daß sie nicht genau stimmen, liegt daran, daß die Planetenbahnen Ellipsen sind und nicht Kreise, wie wir bei der Ableitung der Formel angenommen haben.

§ 40. Die Keplerschen Gesetze

Fast genau 100 Jahre später als Kopernikus wurde Johannes Kepler zu Weil in Württemberg geboren (1571). Aus langjährigen Beobachtungen Tycho de Brahes, die noch ohne Fernrohr ausgeführt waren, folgerte Kepler, daß die Planeten sich nicht auf Kreisen mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegen. Er versuchte, die Beobachtungen aus ungleichförmigen Be-

wegungen und anders gestalteten Bahnen zu erklären; sechs Jahre verwandte er allein auf die Erforschung der Marsbahn. Durch immer neue Annahmen suchte Kepler Rechnung und Beobachtung in Übereinstimmung zu bringen. Im Jahre 1619 endlich konnte er alle Ergebnisse in den „*Harmonices mundi*“ („Zusammenklänge der Welt“) in drei Gesetzen zusammenfassen:



Johannes Kepler
(1571–1630)

Das erste Keplersche Gesetz: Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

In Abb. 147 ist die Abweichung der elliptischen Planetenbahnen von einem Kreise außer für Pluto stark übertrieben gezeichnet. Wenn wir sie in richtiger Form darstellen, ist nur bei Pluto und Merkur die Abweichung vom Kreise ohne weiteres zu erkennen.

Das zweite Keplersche Gesetz: Ein von der Sonne zum Planeten gezogener Leitstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

Die in Abb. 147 schraffierten Flächen sind gleich groß. In ihrer Form unterscheiden sie sich in der Zeichnung infolge der Übertreibung viel stärker voneinander als in Wirklichkeit. Dadurch wird recht deutlich, daß die Geschwindigkeit in Sonnennähe, im Perihel¹⁾, größer ist als in Sonnenferne, im Aphel¹⁾. Hierin liegt der Grund dafür, daß das Winterhalbjahr kürzer ist als das Som-

1) *hēlios* (griech.) = Sonne; *perī* (griech.) = drum herum, in der Umgebung; *apō* (griech.) = fern. Sprich: Aph-hel

merhalbjahr (§ 29, 4), denn die Erde ist am 2. Januar der Sonne am nächsten. Man könnte hiernach glauben, daß der Januar der wärmste Monat wäre. Die Entfernung der Erde von der Sonne im Perihel verhält sich aber zu der im Aphel wie 29 : 30; der Unterschied der Entfernungen ist so gering, daß er als Ursache für die Entstehung der Jahreszeiten neben der eigentlichen Ursache (§ 35, 2) keine Rolle spielt.

Das dritte Keplersche Gesetz: Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer Bahnen.

Während das erste und zweite Gesetz für einen einzelnen Planeten gelten, bezieht sich das dritte Gesetz auf zwei gemeinsam. Kepler fand es 9 Jahre später als die beiden ersten. Bedeuten T_1 und T_2 die Umlaufzeiten, a_1 und a_2 die großen Halbachsen zweier Planetenbahnen, so ist

$$T_1^2 : T_2^2 = a_1^3 : a_2^3$$

oder $a_1^3/T_1^2 = a_2^3/T_2^2$. Also ist a^3/T^2 eine für alle Planeten konstante Größe. Aus der von Johannes Kepler beschriebenen Planetenbewegung erkannte Isaac Newton ihre Ursache und vollendete damit unsere Kenntnis vom Gebäude unseres Sonnensystems. Newton fand nämlich ein Gesetz (das Gravitationsgesetz), nach dem sich alle Himmelskörper, also auch die Sonne und ein Planet, gegenseitig mit einer Kraft anziehen, die in bestimmter Weise von ihren Massen und ihrer Entfernung voneinander abhängt. Aus diesem Gesetz konnte Newton dann die drei Keplerschen Gesetze auf mathematischem Wege ableiten (Genaueres in Bd. IB).

Kepler wirkte als Lehrer in Graz, Prag und Linz; doch mußte die Sterndeuterei zeitlebens seine Haupterwerbsquelle bleiben. Sein Leben war voller Entbehrungen. Im Jahre 1600 kam er nach Prag zu Tycho de Brahe und wurde im folgenden Jahre sein Nachfolger als Hofastronom. In den Wirren des Dreißigjährigen Krieges wurde ihm sein Gehalt nicht gezahlt. Um seine Forderungen geltend zu machen, reiste er zum Reichstag nach Regensburg. Infolge der Strapazen der zu Pferde ausgeführten Reise erkrankte Kepler und starb bald darauf im Jahre 1630. Sein Grab neben den Festungsmauern Regensburgs war nach dem Kriege nicht mehr aufzufinden.

Die Astrologie oder Sterndeuterei will aus der Stellung der Gestirne zu einander, besonders der Planeten im Tierkreisgürtel, Ereignisse voraussagen und aus ihrer Stellung bei der Geburt eines Menschen seinen Charakter und sein Schicksal erkunden. So prophezeite der Mathematiker Stöfler in Tübingen für das Jahr 1524, in dem die Planeten Mars, Jupiter und Saturn im Sternbild der Fische zusammentrafen, eine große Sintflut. Viele Menschen

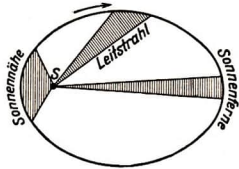


Abb. 147. Kepler-Ellipse
(Die Abweichung von einem Kreis ist sehr stark übertrieben gezeichnet).

ließen sich schwimmende Fahrzeuge bauen und ein gelehrter Doktor in Toulouse gar ein Schiff nach dem Muster der Arche Noahs. Die Sintflut traf natürlich nicht ein. Schon daraus, daß alle an demselben Tag geborenen Menschen den gleichen Charakter und das gleiche Schicksal haben müßten, was bekanntlich durchaus nicht der Fall ist, erhellt der völlige Unsinn der Astrologie. Außerdem sprechen viele astronomische Tatsachen gegen sie und keine für sie. Selbst Kepler glaubte zwar nicht an die großen Torheiten der Sterndeuterei, fälschlicherweise aber doch noch an einen wahren Kern.

Zur Übung: 1. Bestätige das dritte Keplersche Gesetz mit Hilfe der Tabelle in § 39, 1! — 2. Berechne die Entfernung des Jupiter von der Sonne aus seiner siderischen Umlaufzeit mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes! (Entfernung und Umlaufzeit der Erde seien bekannt.)

§ 41. Die physische Beschaffenheit der Sonne

1. Die Natur der Sonne. Die Sonne ist ein selbstleuchtender, glühender Gasball. Da ihr Durchmesser (1390 000 km) 109mal so groß ist wie der Erddurchmesser, beträgt ihr Rauminhalt das 1300 000fache des Erdinhaltes. Weil

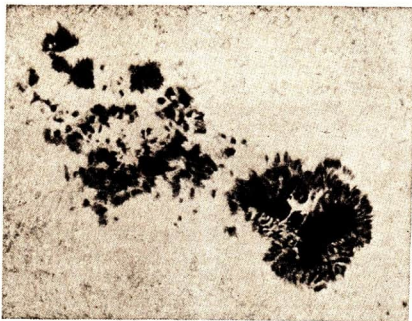


Abb. 148. Gruppe von Sonnenflecken

ihre Dichtezahl aber im Durchschnitt nur 1,4, die der Erde aber 5,5 ist, ist die Sonnenmasse nur gleich 332 000 Erdmassen.

Die eigentliche leuchtende Schicht des Sonnenkörpers ist die **Photosphäre**¹). Sie hat dunklere Stellen, sog. Sonnenflecken, von z. B. 100 000 km Durchmesser (Abb. 148). In Zeitabständen von je 11 Jahren treten die Sonnenflecken besonders verbreitet auf.

Aus ihrer Beobachtung erkennt man, daß sich die Sonne in etwa 27 Tagen einmal um eine Achse dreht, die mit der Achse der Ekliptik einen Winkel von 7° bildet. Dabei drehen sich die polaren Gegenden etwas langsamer als die äquatorialen; die Sonnenoberfläche ist also nicht starr.

Die Photosphäre wird von der nur 500 km dicken „Umkehrschicht“ umgeben. Auf diese folgt die rote **Chromosphäre**²), eine schwächer leuchtende Hülle leichter Gase (vor allem Wasserstoff und Helium) von 10 000 km Höhe.

1) phōs (griech.) = Licht; also „Lichtkugel“

2) chrōma (griech.) = Farbe

Den Übergang von der Chromosphäre zum leeren Raum bildet die **Sonnenatmosphäre oder Korona** (Abb. 149), deren Höhe etwa ein Viertel des Sonnenradius beträgt. (Bei Angaben der Dimensionen der Sonne sind die Chromosphäre und die Atmosphäre nicht einbezogen.) Die Korona besteht aus Sonnenmaterie von fast unmeßbar geringer Dichte. Bis vor einigen Jahren konnte sie nur bei Sonnenfinsternissen beobachtet werden.

Aus der Chromosphäre schießen oft gewaltige Eruptionen bis zu 600 000 km Höhe hervor, die sog. **Protuberanzen**¹⁾; sie bestehen ebenfalls im wesentlichen aus Wasserstoff.

Die Temperatur der Sonne beträgt an der Oberfläche etwa 6000°. Sicher ist, daß sie nach innen hin stark zunimmt. Welche Temperaturen man für den Sonnenkern errechnet, hängt ganz davon ab, welche Vorstellung man sich von seinem Aufbau macht. Man hat für die Sonnenmitte Tem-

peraturen von 50 000 000° angegeben. Auch die Dichte nimmt nach innen hin gewaltig zu; sie dürfte in der Mitte etwa 75mal so groß sein wie die Dichte des Wassers. Es ist anzunehmen, daß bei diesen ungeheuren Drucken und Temperaturen nicht nur die Moleküle in ihre Atome, sondern die Atome weiter in ihre Bestandteile zerfallen sind (Teil IIB). An der Sonnenoberfläche sind – das lehrt uns die Spektralanalyse – neben Wasserstoff Helium, Stickstoff, Natrium, Silizium, Magnesium, Kalium, Kalzium und Eisen am verbreitetsten. Diese Elemente wurden im Spektrum der Sonne durch die Fraunhoferschen Linien (§ 21) nachgewiesen, da ihre Linienspektren beim Durchgang der Strahlen durch die Umkehrschicht (daher der Name!) ausgelöscht werden.

2. Sonnenlicht und Sonnenwärme. Die Sonne leuchtet mit $3 \cdot 10^{27}$ oder 3000 Quadrillionen Kerzen (§ 25). Wenn sie im Zenit eines Erdortes steht, beträgt die Beleuchtungsstärke auf einer Fläche, auf die ihre Strahlen senkrecht auffallen, 135 000 Lux.

Wir sind uns kaum bewußt, wie ungeheuer groß die Wärme ist, die uns die Sonne fortwährend zustrahlt. Dabei erhält die Erdoberfläche weniger als ein

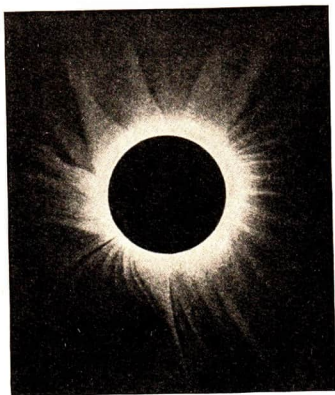


Abb. 149. Korona (Zeichnung nach fotogr. Aufnahme)

1) protuberäre (lat.) = hervorschwellen

Zweitausendmillionstel der gesamten von der Sonne ausgestrahlten Wärmemenge (s. u.). Um die von der Erde aufgenommene Sonnenwärme anzugeben, denken wir uns an der oberen Grenze der Erdatmosphäre, senkrecht zur Richtung der Sonnenstrahlen, eine Kreisfläche, deren Halbmesser gleich dem Erdradius ist; sie fängt die gesamte der Erde zugestrahlte Wärme auf. (Zur Größe dieser Wärmemenge vgl. Teil IB.) Die ungeheuren von der Sonne in den Weltraum ausgestrahlten Energiemengen werden durch inneratomare Vorgänge gedeckt.

Zur Übung: Denke dir um den Sonnenmittelpunkt eine Kugel gelegt, auf der der Mittelpunkt der Erde liegt; ihre Oberfläche ist gleich $4\pi \cdot (149,4 \cdot 10^6)^2 \text{ km}^2$. Sie schneidet aus der Erdkugel die Fläche $\pi \cdot 6370^2 \text{ km}^2$ aus. Berechne hieraus die oben angegebene Zahl 2000 Millionen!

§ 42. Die physische Beschaffenheit

der Planeten, Kometen, Meteoriten und des Mondes

Die Planeten empfangen als dunkle Weltkörper ihr Licht von der Sonne. Über ihre physische Beschaffenheit belehrt uns die Untersuchung des von ihnen reflektierten Lichtes.

1. Merkur ist der kleinste Planet. Wegen seiner Sonnennähe herrscht auf ihm eine hohe Temperatur, etwa 100° . Eine Atmosphäre scheint er nicht zu haben. Merkur zeigt eine Achsendrehung, deren Dauer wie bei unserem Monde (s. u.) gleich seiner Umlaufzeit ist, so daß er der Sonne stets dieselbe Seite zuwendet.

2. Venus ist von einer dichten Wolkenschicht umgeben, die den Blick auf die Oberfläche des Planeten verhindert. Sie hat die Eigentümlichkeit, das Sonnenlicht sehr stark zurückzustrahlen. Wenn Venus vor der Sonnenscheibe vorübergeht, spricht man von einem Venusdurchgang. Er kann dazu dienen, die **Sonnenparallaxe** zu bestimmen, d. h. den Winkel, unter dem der Erdradius von der Sonne aus gesehen erscheint. Die Parallaxe liefert dann die Entfernung Erde-Sonne. Venusdurchgänge finden nur selten statt, die letzten in den Jahren 1874 und 1882, die nächstfolgenden erst 2004 und 2012. Es war eine Stütze für das heliozentrische System, als Galilei (1610) beobachtete, daß Venus Phasen zeigt und daß ihr Durchmesser sich während eines Umlaufs scheinbar im Verhältnis 1:7 ändert, wie es ihrem Abstand von der Erde in ihrer sogenannten unteren und oberen Konjunktion entspricht.

3. Mars ist der unserer Erde ähnlichste Planet. Er hat eine Atmosphäre von etwa 200 km Höhe, dünner als die unsrige; er hat Jahreszeiten, wie wir sie haben, nur wegen des längeren Marsjahres von längerer Dauer; und auch die Temperaturen auf dem Mars unterscheiden sich nicht allzu sehr von denen auf der Erde. Ob die dunkleren Stellen, die man im Fernrohr sieht, wirklich Wasserflächen und die helleren, von denen die rötliche Farbe des Mars herrührt, Kontinente bedeuten, steht noch nicht ganz fest. Die berühmten

„Marskanäle“ sind höchstwahrscheinlich nur optische Täuschungen. Die neuere Marsforschung, besonders die der UdSSR, hat auf dem Mars das Chlorophyll-Spektrum und damit Pflanzenwuchs nachgewiesen. Daß sich auf dem Mars Organismen wie auf der Erde entwickeln können, läßt sich also nicht bestreiten. Der Planet hat zwei Monde, Phobos und Deimos (Furcht und Schrecken); ihre Durchmesser betragen kaum 10 km.

4. Die Planetoiden sind vielleicht Splitter eines größeren Planeten. Man hat bis jetzt weit über 1000 gezählt. Heute nehmen jedoch viele Astronomen an, daß sich umgekehrt die Planeten aus Körpern von der Größe der Planetoiden gebildet haben, daß diese also auf einer früheren Entwicklungsstufe stehengeblieben sind. Sie laufen im ganzen in einem Gürtel zwischen Mars und Jupiter; doch kommt z. B. Eros von außen her sehr nahe an die Erdbahn heran. Die Bahnen dieser Kleinstplaneten sind bis zu 37° gegen die Ekliptik geneigt und weichen z. T. stark von der Kreisform ab.

5. Jupiter ist der größte Planet. Seine Masse ist rund 300mal so groß wie die Erdmasse und beträgt $\frac{1}{1000}$ der Sonnenmasse. Seine Achse, um die er in 10 h rotiert, steht fast senkrecht auf seiner Bahnebene, deshalb macht sich der Wechsel der Jahreszeiten, deren jede drei Erdjahre dauert, kaum bemerkbar. Als mittlere Temperatur wird -150° und weniger angegeben. Parallel zum Äquator ziehen sich dunkle und hellere Streifen um den Planeten; die letzteren werden für dichte Eiswolken gehalten, die das Sonnenlicht gut zurückstrahlen. Nächst Saturn hat Jupiter die größte Anzahl von Monden, nämlich 9.

6. Saturn ist stark abgeplattet; sein Äquatordurchmesser ist um $\frac{1}{10}$ länger als sein Durchmesser von Pol zu Pol. Wie Jupiter ist auch Saturn in dichte Wolken gehüllt. Seine Äquatorebene ist gegen seine Bahnebene um 26° geneigt. Die Temperatur dürfte etwa -250° betragen; die der folgenden Planeten liegt noch tiefer.

In der Äquatorebene liegen die Bahnen der 10 Monde und, frei schwebend, das große Ringsystem. Sein äußerer Durchmesser ist doppelt so groß wie der Durchmesser des Plane-

ten; seine Dicke beträgt 400 km. Der Ringschein aus vielen kleinen Körpern zu bestehen, die selbständig um ihr Zen-

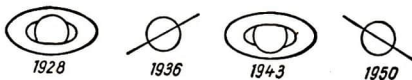


Abb. 150. Die vier Hauptphasen des Saturnrings

tralgestirn kreisen wie die Planeten um die Sonne. Da die Ringebene, zugleich die Äquatorebene des Saturn, sich selbst immer parallel bleibt, sehen wir, wenn der Nordpol des Saturn uns am meisten zugewandt ist, die nördliche Ringfläche und ein halbes Saturnjahr (14 Erdjahre) später die südliche; die Umgrenzungen erscheinen uns dann als Ellipsen (Abb. 150). In der Zwischen-



Abb. 151. Komet 1908c (Morehouse) am 16. November 1908

er ist oft größer als der Erdball, enthält einen sehr kleinen, blendend hellen Kern und ist von einer ausgedehnten Hülle umgeben. Im Sonnenlicht entsteht auf der von der Sonne abgewandten Seite ein Schweif, der länger sein kann als die Entfernung Erde–Sonne (Abb. 151). Diese Schweifbildung in Sonnennähe erklärt sich folgendermaßen: Licht, das senkrecht auf eine reflektierende Wand trifft, übt auf sie einen Druck aus, der als Strahlungsdruck bezeichnet wird. Wie Lebedew³⁾ zeigte, kann für

zeit nimmt die kleine Achse der Ellipse bis auf Null ab und dann wieder zu. Von Uranus, Neptun und Pluto wissen wir wenig mehr, als in der Tabelle (§ 39, 1) mitgeteilt ist.

7. Kometen¹⁾ sind Himmelskörper, die sich in langgestreckten Ellipsen um die Sonne bewegen. Ihre Umlaufzeiten sind sehr verschieden. Die engste Bahn beschreibt der Enckesche Komet²⁾ mit einer Umlaufdauer von $3\frac{1}{2}$ Jahren. Wahrscheinlich haben manche Kometen, die früher für nichtwiederkehrende gehalten wurden, Umlaufzeiten, die nach Hunderten und Tausenden von Jahren zählen. Den vordersten, leuchtenden Teil des Kometen nennt man Kopf;



P. A. Lebedew
(1866–1912)

1) kōmētēs (griech.) = Haarstern

2) Joh. Encke (1791–1865), Gründer der Berliner Sternwarte

3) P. A. Lebedew war Professor der Physik in Moskau.

Körperchen im Weltenraum, die eine gewisse Größe unterschreiten, dieser Lichtdruck größer sein als ihre Anziehung durch die Sonne, so daß sie von ihr abgestoßen werden. Nun wissen wir aber aus zwei Tatsachen, daß die Masse der Kometen in der Tat außerordentlich gering ist: Wenn Kometen an kleinen Himmelskörpern, z. B. den Jupitermonden, nahe vorbeiziehen, werden diese nie im geringsten gestört; ferner: das Licht der Fixsterne durchdringt Schweif und Kopf ohne starke Absorption. So wird der Kometenschweif durch den Strahlungsdruck der Sonne aus dem Kometenkopf gleichsam herausgeblasen. Durch die Spektralanalyse sind u. a. Kohlenstoff, Natrium, Eisen und Nickel in den Kometen nachgewiesen. Sie leuchten teils in eigenem, teils in reflektiertem Lichte.

Einer der berühmtesten Kometen ist der Halleysche.¹⁾ Seine Umlaufzeit um die Sonne beträgt 76,4 Jahre. Seit dem Jahre 87 v. u. Ztr. bis heute ist er 27 mal beobachtet worden. Erst 1682 erkannte man, daß es sich immer um ein und denselben Kometen gehandelt hatte. Sein nächstes Wiedererscheinen ist für 1986 vorausgesagt.

8. Meteoriten, meist ganz kleine Körper, selten über Kopfgröße, treten einzeln oder in Schwärmen auf. Wenn sie in die Erdatmosphäre geraten, kommen sie und die sie umgebende Luft infolge der Reibung ins Glühen, und sie werden in 150 und mehr Kilometer Höhe als **Sternschnuppen** oder **Meteore** sichtbar. Die kleineren Stücke verbrennen zu Asche; die Geschwindigkeit der größeren wird so weit abgebremst, daß sie zur Erde niederfallen; oft explodieren sie auch in der Luft. Schwächere Meteore kann man, wenn man darauf achtet, stündlich wahrnehmen; auf der ganzen Erde könnte man täglich Millionen von Sternschnuppen beobachten. Das Gewicht der größten niedergegangenen Meteore beträgt Zehntausende von Kilogramm. Besonders zahlreich ist der Laurentiusschwarm²⁾ in der Zeit vom 9. bis 14. August und der Schwarm der Leoniden³⁾ vom 12. bis 14. November, deren Bahn, fraglos nicht zufällig, mit der Bahn des Leonidenkometen identisch ist.

9. Der Erdmond. Himmelskörper, die um einen Planeten kreisen, heißen **Monde** oder **Trabanten**⁴⁾. Der Erdmond wendet uns stets dieselbe Seite zu; der „Mann im Monde“ blickt unverwandt zur Erde. Von uns aus beurteilt, hat der Mond also keine Achsendrehung; hingegen rotiert er von der Sonne aus gesehen während eines Monats einmal um eine zu seiner Bahnebene fast senkrechte Achse. Der Durchmesser des Mondes beträgt nicht ganz ein Viertel von dem der Erde. Sein Rauminhalt ist also etwa $\frac{1}{50}$ des Erdvolumens. Da seine Dichte aber wesentlich geringer ist als die durchschnittliche Erddichte, beträgt die Mondmasse nur $\frac{1}{81}$ der Erdmasse.

1) Edmund Halley (1656—1742), englischer Astronom

2) Der 10. August ist der Laurentiustag. Man nennt den Schwarm auch die Perseiden, weil es so aussieht, als ob er aus dem Sternbild des Perseus käme (Rekt. 45°, Dekl. + 57°).

3) Benannt nach dem Sternbild des Löwen, lateinisch leo, von dem der Schwarm auszugehen scheint (Rekt. 151°, Dekl. + 23°)

4) Entstanden aus darabant (ungar.)

Wenn der Mond vor einen Fixstern tritt, verschwindet dieser plötzlich ohne die geringste Strahlenbrechung. Hieraus geht hervor, daß der Mond keine Atmosphäre besitzt. Deshalb erscheinen auch die Schatten seiner Berge im

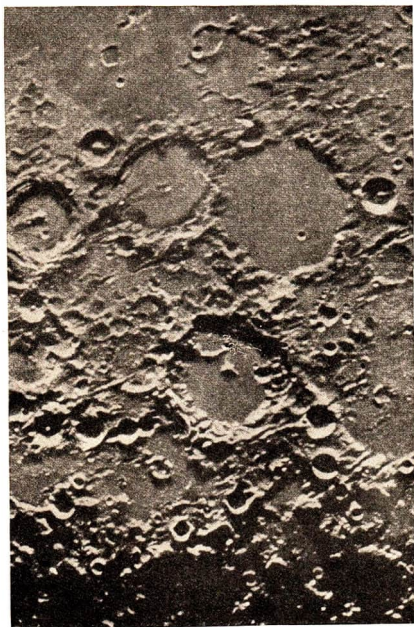


Abb. 152. Mitte der Mondscheibe im letzten Viertel, am 29. August 1907

tern zu vergleichen, denn sie haben Durchmesser bis zu 200 und mehr Kilometern.

Nach einer der vielen Hypothesen, die die Entstehung der Krater zu erklären suchen, hat sich in der Urzeit $\frac{1}{81}$ der Erdmasse als Mond von der Erde abgeschnürt, um selbständig in immer größer werdendem Abstand die Erde zu umkreisen. Damals hatte der Mond noch eine Achsendrehung, und das feurigflüssige Magma durchstieß unter dem Einfluß der von der Erde ausgeübten Anziehung immer wieder die noch dünne Kruste, um dann wieder zurückzufließen. So entstanden ringförmige Wälle, die im Laufe der Jahrmillionen allmählich zu den heutigen Kratern erstarrten.

Fernrohr vollkommen dunkel und scharf begrenzt. Und deshalb sind auch die Temperaturgegensätze zwischen dem 2 Wochen dauernden Tage und der ebenso langen Nacht sehr groß. Die Temperaturen schwanken zwischen $+100^{\circ}$ und -50° . Wenn eine Atmosphäre fehlt, kann auch kein Wasser vorhanden sein, denn es würde im luftleeren Raum sofort verdampfen. Trotzdem hat man die von alters her übliche Bezeichnung mare (lat. = Meer) für die dunklen, fast ebenen Flächen beibehalten. Die helleren Stellen sind die Ringgebirge und Krater des Mondes (Abb. 152). Die Ringgebirge erheben sich bis zu den Höhen der höchsten Gebirge auf der Erde. Die Krater sind nur der Form, nicht aber der Größe nach mit irdischen Kra-

C. Das Fixsternsystem

Wenn wir den Sternhimmel mit einem größeren Fernrohr durchforschen oder photographische Aufnahmen davon machen, dann finden wir neben einer großen Zahl von Sternen verschiedener Helligkeit Sternpaare und lockere Sterngruppen, Sternhaufen und Nebelflecke. Der weißliche Schimmer der Milchstraße löst sich fast überall in Sterne auf, wenn man nur hinreichend starke Vergrößerungen anwendet. Von den Nebelflecken erweist sich ein Teil bei spektroskopischer Untersuchung als echte Nebel, d. h. als diffuse leuchtende Gasmassen, wie z. B. der Orionnebel, während andere, wie der große Andromedanebel, mit den größten Spiegelteleskopen der neuesten Zeit als Sternsysteme erkannt wurden.

In der Milchstraße gibt es an zahlreichen Stellen dunkle Flecke, die man früher als „Sternleeren“ bezeichnet hat, von denen wir aber heute mit Sicherheit wissen, daß dort dunkle Nebel im Raum lagern, die das Licht der dahinterstehenden Sterne abfangen.

Die Frage, ob und wie sich diese verschiedenartigen Objekte stufenweise zu Systemen höherer Ordnung zusammenfügen, wurde schon im 17. Jahrhundert aufgeworfen; ihre Beantwortung konnte aber erst im 19. Jahrhundert mit einiger Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden. Die wirkliche Kenntnis vom Bau des Sternsystems ist eine Errungenschaft des 20. Jahrhunderts.

§ 43. Helligkeit und Zahl der Sterne

Die Helligkeiten der Sterne werden in **Sterngrößen** angegeben; die hellsten Sterne heißen 1. Größe, die schwächsten einem normalen Auge noch erkennbaren 6. Größe. Diese Skala der Größenklassen steht zu den Helligkeiten in einer einfachen Beziehung: einem Unterschied von 5 Größen entspricht genau ein Verhältnis der Helligkeiten von 1:100. Ein Stern 1. Größe hat also gerade die Helligkeit von 100 Sternen 6. Größe zusammengenommen, und die Sterne einer Größenklasse sind jeweils rund $2\frac{1}{2}$ mal so hell wie die der folgenden Größenklasse ($\sqrt[5]{100} = 2,512$).

Mit Hilfe dieser Definition kann man die Skala der Größenklassen nach oben und unten ausdehnen. Hellere Sterne haben die Größen 0, -1, -2, ..., schwächere die Größen +7, +8, Die Grenze der Beobachtbarkeit liegt heute etwa bei der 21. bis 22. Größe, d. h. bei Sternen, die scheinbar eine Million mal schwächer sind als die schwächsten mit bloßem Auge noch erkennbaren Sterne.

Die dem bloßen Auge sichtbaren Sterne lassen sich verhältnismäßig leicht zählen und einzeln in Sternkarten eintragen; es sind am ganzen Himmel nicht viel über 5000. Nimmt man Fernrohre zu Hilfe oder macht man photographische Aufnahmen, dann steigt die Zahl der beobachtbaren Sterne rasch

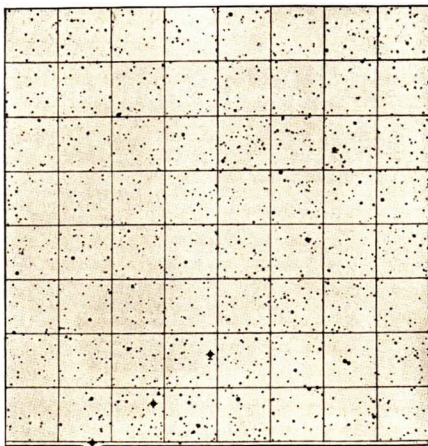


Abb. 153. Sternkarte mit Sternen bis zur 9. Größe

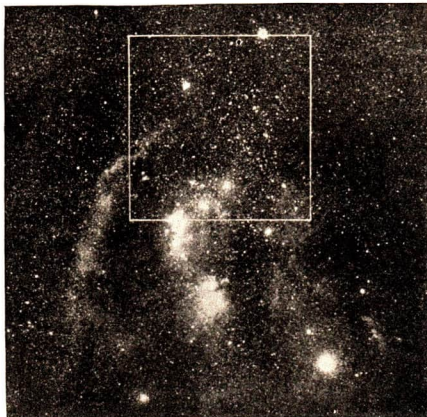


Abb. 154. Photographische Aufnahme des Sternbildes Orion
mit Sternen bis zur 16. Größe.
Das eingezeichnete Quadrat umrahmt das Feld der Abb. 153

an. Das zeigen die beiden Abb. 153 und 154. Abb. 153 ist ein Ausschnitt aus einer Sternkarte der berühmten „Bonner Durchmusterung“, die in einem Katalog von 3 Bänden und einem Atlas mit 39 Karten alle Sterne des nördlichen Himmels bis über die 9. Größe hinaus verzeichnet, im ganzen 324188. Die Quadrate des eingezeichneten Netzes haben Seitenlängen von 1° , so daß man gerade 4 Vollmondscheiben von $\frac{1}{2}^\circ$ Durchmesser darin unterbringen könnte. Im Durchschnitt zählt man in jedem Quadrat 22 Sterne, auf dem ganzen Ausschnitt 1442 Sterne.

Die gleiche Gegend des Himmels – es ist der nördliche Teil des Sternbildes Orion – zeigt Abb. 154 nach einer photographischen Aufnahme, die mit einer Linse von der gleichen Größe wie die der „Bonner Durchmusterung“ mit 5 Stunden Belichtungszeit gewonnen wurde. Auf einer Fläche, die

einem kleinen Teilquadrat der Abb. 153 entspricht, sind hier mehr Sterne zu zählen als in dem ganzen Feld der Bonner Karte. Die schwächsten Sterne sind 16. Größe. Die Aufnahme zeigt außerdem die ausgedehnten leuchtenden Nebelmassen, in die die Orionsterne eingebettet scheinen, und die dunklen Wolken, die die hellen Nebel begleiten.

Man kommt also rasch zu sehr großen Sternzahlen, wenn man immer schwächere Sterne in den Kreis der Betrachtung einbezieht, und es ist klar,

daß man bei Untersuchungen über den Bau des Sternsystems im allgemeinen nicht mehr die Sterne einzeln vornehmen und beschreiben kann wie die Mitglieder des Planetensystems, sondern daß man statistische Methoden anwenden muß. Die Beobachtung einzelner Sterne, vor allem der helleren, hat aber daneben ihre große Bedeutung; denn sie liefert die Grundlagen für die Anwendung der Statistik.

Die nebenstehende Tabelle vermittelt einen Überblick über die vorliegenden Verhältnisse. Darin ist die scheinbare Helligkeit eines Sternes 5. Größe, die wir als Vergleichshelligkeit wählen, gleich 1 gesetzt.

Sterngröße <i>m</i>	Scheinbare Helligkeit	Sternanzahl
0	100	3
1	40	14
2	16	48
3	6,3	164
4	2,5	530
5	1,0	1 620
6	0,40	4 850
7	0,16	14 300
8	0,063	41 000
9	0,025	117 000
10	0,010	324 000
11	0,004 0	870 000
12	0,001 6	2 270 000
13	0,000 63	5 700 000
14	0,000 25	13 800 000
15	0,000 10	32 000 000

Unter „Sternanzahl“ ist stets die Zahl aller Sterne gemeint von den hellsten bis zu der in der ersten Spalte stehenden Grenzgröße.

Man sieht, daß sich beim Fortschreiten um 1 Größenklasse die Sternzahlen am Anfang etwas mehr als verdreifachen. Bei den schwächeren Sternen erfolgt das Anwachsen langsamer; zuletzt ist der Faktor nur noch knapp $2\frac{1}{2}$. Aus dem Gesetz, nach dem die Sternzahlen anwachsen, lassen sich Schlüsse auf die Anordnung der Sterne im Raum ziehen.

§ 44. Farbe, Spektrum, Temperatur

Die Sterne haben verschiedene **Farben**: Sirius ist weiß, Kapella gelb, Arkturrot. Auf photographischen Himmelsaufnahmen zeigen die Sterne daher oft andere Helligkeiten, als sie das Auge empfindet, da gewöhnliche photographische Platten vor allem für blaues und ultraviolettes Licht empfindlich sind, wenn sie nicht für die vom menschlichen Auge wahrgenommene Strahlung besonders „sensibilisiert“ werden (orthochromatische oder panchromatische Platten). Man erkennt das sehr deutlich an der Abb. 154. Der rote Stern Beteigeuze, der die linke obere Ecke des Orion bildet, ist auf der

photographischen Aufnahme (links oberhalb der linken oberen Ecke des eingezeichneten Quadrates in Abb. 154) viel schwächer als der weiße Rigel in der rechten unteren Ecke (am inneren Rand der großen Nebelmasse), während dem Auge beide Sterne gleich hell erscheinen. Das so charakteristische Sternbild ist auf der photographischen Aufnahme daher im ersten Augenblick kaum zu erkennen.

Dieser Unterschied zwischen der „visuellen“ Sterngröße und der „photographischen“ kann als Maß für die Farbe der Sterne benutzt werden; man

bezeichnet ihn als **Farbenindex**.

Da die Farbe eines glühenden Körpers mit wachsender Temperatur von Rot über Gelb nach Weiß fortschreitet, wird der Farbenindex, der das Verhältnis des Rotanteils zum Blauanteil der Sternstrahlung mißt, zu einem Maß für die Temperatur der Sterne. Man hat dazu nur die Farbenindizes der Sterne zu vergleichen mit denen irdischer Lichtquellen bekannter Temperatur.

Weitergehende Aufschlüsse über die Natur der Sterne erhält

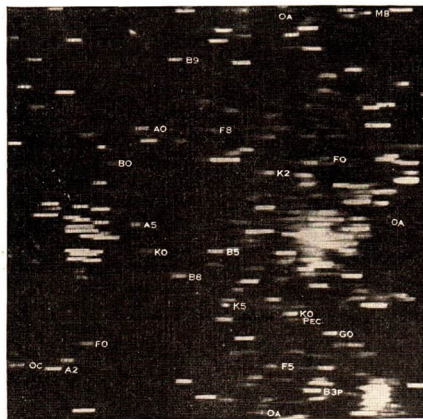


Abb. 155. Himmelsaufnahme mit einer Prismenkamera

man, wenn man vor das Objektiv des Fernrohres ein Prisma setzt. In einer solchen „Prismenkamera“ wird das Licht der Sterne spektral zerlegt, das Bild jedes einzelnen Sternes ist nicht mehr ein Punkt, sondern ein farbiges Band, das **Spektrum**. Wie eine solche Himmelsaufnahme aussieht, zeigt die Abb. 155.

Man kann die Sternspektren in eine Reihe einordnen, die von den Sternen höchster Temperatur zu denen niedrigster Temperatur fortschreitet. Diese Spektralreihe wird in Klassen unterteilt, die mit Buchstaben des Alphabets bezeichnet worden sind. 99% aller Sterne fallen in die 6 Hauptklassen B, A, F, G, K, M, die, mit dezimaler Unterteilung der Übergangsstufen, in Abb. 156 in vergrößerten Aufnahmen dargestellt sind. Der Rest sind die selteneren Typen P, O (planetarische Nebel und heiße Sterne mit Emissionslinien) und N, R, S (Seitenzweige am Ende der Reihe).

Die wesentlichen Merkmale der Sternspektren sind die auf dem kontinuierlichen Untergrund vorhandenen Linien. Aus ihrer Lage (Wellenlänge) kann man durch Vergleich mit irdischen Lichtquellen auf die Stoffe schließen, die in den Sternen vorhanden sind (chemische Spektralanalyse). So rühren z. B. die Linien H_β , H_γ , H_δ vom Wasserstoff her, H und K vom Kalzium. Man findet in den Sternen die gleichen Elemente, die wir von der Erde her kennen. Die Stärke der verschiedenen Linien ermöglicht die Berechnung der Temperatur und der Dichte der Sternatmosphären.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Hauptmerkmale der Sterne zusammengestellt. Die Temperaturen, die stets vom absoluten Nullpunkt aus gezählt werden, sind runde Mittelwerte für die einzelnen Klassen.

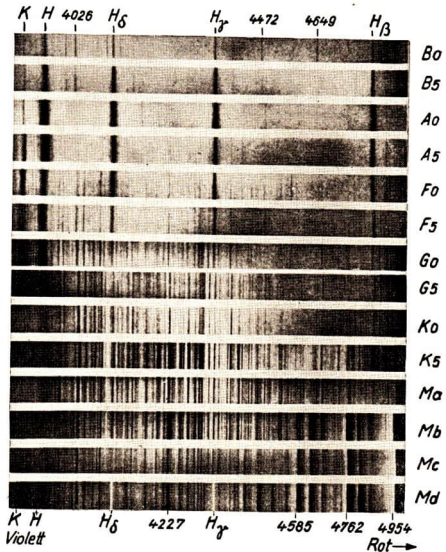


Abb. 156. Sternspektren der verschiedenen Spektralklassen

Spektral- klasse	Farbe	Oberflächen- temperatur	Beispiel
B	bläulich-weiß	15 000°	Spica, Rigel
A	weiß	9 000°	Sirius, Wega
F	gelblich	7 000°	δ Aquilae, Polaris
G	gelb	5 000°	Sonne, Kapella
K	orange	4 000°	Arktur, Aldebaran
M	rot	3 000°	Beteigeuze, Antares

§ 45. Parallaxe und Entfernung

In Abb. 157 bedeutet der Kreis 1 2 3 4 die Erdbahn mit der Sonne als Mittelpunkt. Infolge des jährlichen Umlaufes der Erde um die Sonne sehen wir einen Stern S zu 4 verschiedenen Zeiten des Jahres, an denen sich die Erde in den Punkten 1, 2, 3, 4 ihrer Bahn befindet, in den Richtungen

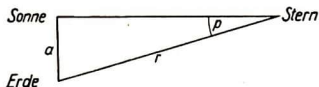
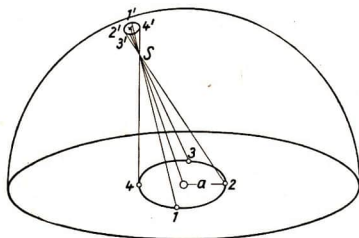


Abb. 157. Jährliche Parallaxe

1 S , 2 S , 3 S , 4 S ; der Stern beschreibt, von der Erde aus gesehen, scheinbar eine kleine Ellipse 1' 2' 3' 4' um den „mittleren Ort“, an dem er von der Sonne aus gesehen würde. Der in Bogensekunden ausgedrückte Winkel, unter dem vom Stern aus der Erdbahnhälfte a erscheint, wird als jährliche Parallaxe bezeichnet.

Dieser Winkel an der Spitze des Dreiecks Sonne–Stern–Erde (s. die untere Figur in Abb. 157) ist wegen der außerordentlich großen Entfernung r der Sterne im Ver-

hältnis zur Basis a sehr klein. Man kann daher das Dreieck praktisch als Kreisausschnitt betrachten und schreiben

$$a : 2\pi r = p : 360 \cdot 60 \cdot 60''.$$

Daraus erhält man für den Zusammenhang zwischen Parallaxe und Entfernung die Beziehung

$$r = \frac{206265''}{p} \text{ Erdbahnradien.}$$

Für die Entfernungen im Sternsystem wird als neue Einheit der Entfernungen die Strecke von 206265 Erdbahnradien eingeführt; sie heißt „parsec“ (Abkürzung aus Parallaxe – Sekunde, weil ein Stern in dieser Entfernung gerade die Parallaxe von einer Bogensekunde hat).

$$1 \text{ parsec} = 206\,265 \text{ Erdbahnradien.}$$

Werden die Entfernungen in dieser Einheit ausgedrückt, dann gilt die einfache Gleichung

$$r = \frac{1}{p}$$

$$\text{Entfernung in parsec} = \frac{1}{\text{Parallaxe in Sekunden}}.$$

Vielfach werden die Entfernungen auch heute noch in Lichtjahren (L. J.) angegeben, so wie wir auf der Erde etwa Entfernungen in Wegstunden angeben. Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht mit seiner Geschwindigkeit von 300 000 km/s in einem Jahr (= 32 Millionen Sekunden) zurücklegt. Für die Umrechnung der nebeneinander gebräuchlichen Entfernungseinheiten gelten die Beziehungen:

$$1 \text{ Lichtjahr} = 0,31 \text{ parsec} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km};$$

$$1 \text{ parsec} = 3,26 \text{ Lichtjahre} = 31 \cdot 10^{12} \text{ km}.$$

Der uns nächste Stern hat eine Parallaxe von nur $\frac{3}{4}''$, ist also $\frac{4}{3}$ parsec oder rund 4 L. J. entfernt.

Mit den größten Instrumenten kann man noch Verschiebungen von etwa $0,01''$ messen, d. h. man kann mit dieser geometrischen Methode der Entfernungsbestimmung bis in Entfernungen von 100 parsec vordringen. Der solcherweise erfaßbare Raum ist verschwindend klein gegenüber den Dimensionen des Sternsystems, und ebenso erscheint die Zahl 5000 der bisher bekannten Parallaxen unbedeutend im Vergleich mit der Zahl der Sterne überhaupt. Aber dennoch kommt gerade diesen Sternen mit geometrisch bestimmten Entfernungen eine große Bedeutung zu. Sie sind die Stützpunkte im Raum, von denen aus mit anderen Methoden die Brücken zu größeren Entfernungen geschlagen werden können. Sie sichern das Fundament, auf dem wir unser Weltgebäude aufrichten.

§ 46. Helligkeit und Entfernung

Würde man die Sonne in eine Entfernung von 10 parsec versetzen, dann erschiene sie uns als ein Stern 5. Größe. Ebenso kann man für alle Sterne mit

bekannter Entfernung ausrechnen, welche scheinbare Größe sie hätten, wenn man sie in die gleiche Entfernung von 10 parsec versetzte. Diese Größe nennt man im Gegensatz zur scheinbaren Größe m die absolute Größe M der Sterne.

Wie wir die Helligkeiten irdischer Lichtquellen in „Kerzenstärken“ angeben, indem wir sie vergleichen mit der Helligkeit einer Normalkerze, so benutzen wir als Einheit für die Leuchtkräfte der Sterne die Sonne. Die in eine Entfernung von 10 parsec versetzte Sonne ist das astronomische Gegenstück zu

Entfernungs- modul $m - M$	Entfernung parsec	Parallaxe Bogen- sekunden
— 5	1	1,0
— 4	1,6	0,63
— 3	2,5	0,40
— 2	4,0	0,25
— 1	6,3	0,16
0	10	0,10
+ 1	16	0,063
+ 2	25	0,040
+ 3	40	0,025
+ 4	63	0,016
+ 5	100	0,010
+ 10	1 000	0,001
+ 15	10 000	0,000 1
+ 20	100 000	0.000 01

der in 1 m Abstand aufgestellten Normalkerze. Kennt man die absolute Größe M eines Sternes, dann kann man aus der Tabelle S. 131 sofort seine Leuchtkraft entnehmen, denn in dieser Tabelle ist ja gerade die Helligkeit für die 5. Größe als Einheit gewählt.

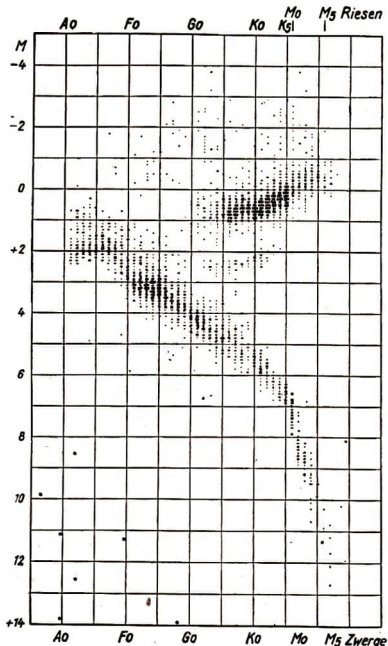


Abb. 158. Zusammenhang zwischen Spektralklasse und absoluter Größe (Hertzsprung-Russell-Diagramm)

anzusehen. Die Differenz $m - M$ heißt daher „Entfernungsmodul“¹⁾.

Daß es in der Tat Möglichkeiten gibt, die absolute Größe unabhängig von der Entfernung zu bestimmen, wurde erkannt, als man daran ging, die Sterne mit bekannter Parallaxe nach ihren verschiedenen Eigenschaften zu gruppieren. Dabei entstanden Diagramm-Darstellungen von der Art der Abb. 158,

Da die scheinbare Helligkeit einer Lichtquelle bekanntlich mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, hängt der Unterschied zwischen der scheinbaren Größe m und der absoluten Größe M eines Sternes nur von der Entfernung r ab. Die Beziehung zwischen der Differenz $m - M$ und der Entfernung bzw. Parallaxe gibt die Tabelle auf S. 135 an.

Während diese Beziehung zunächst benutzt wurde, um für Sterne mit bekannter Parallaxe die absolute Größe M zu berechnen, kann man nun aber auch umgekehrt, wenn der Unterschied zwischen scheinbarer und absoluter Größe auf irgendeine Weise bekannt ist, daraus die Entfernung berechnen. Die vorstehende Tabelle wird so zur Grundlage der photometrischen Entfernungsbestimmung unter der Voraussetzung, daß es Möglichkeiten gibt, einem Stern seine absolute Größe (seine „Ker-

1) *m*öddulus (lat.) = (kleines) Maß

wo in waagerechter Richtung die Spektralklassen (oder Farben), in dazu senkrechter Richtung die absoluten Größen (oder Leuchtkräfte) aufgetragen sind. Das Bemerkenswerte an diesem Diagramm ist, daß die Sterne in zwei deutlich voneinander unterschiedene Gruppen zerfallen, für die man die Bezeichnung Riesen und Zwerge geprägt hat. Der Unterschied ist am größten bei den roten Sternen (Spektralklasse M), wo die Riesen etwa die 200fache Leuchtkraft der Sonne haben, die Zwerge dagegen nur etwa $\frac{1}{5000}$. Bei den gelben Sternen (Klasse G) ist das Verhältnis zwischen Riesen und Zwergen 100 : 1. Bei den weißen Sternen fällt der Unterschied ganz weg; sie haben alle die gleiche absolute Größe. Eine dritte Gruppe von Sternen, in dem Diagramm durch die 7 verstreuten Punkte in der linken unteren Ecke vertreten, sind die „weißen Zwerge“, die sich durch besondere Eigenschaften auszeichnen. Sie spielen in unserem Zusammenhang keine Rolle.

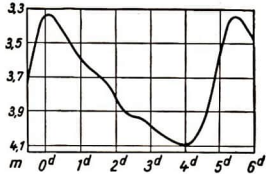


Abb. 159. Lichtschwankungskurve des veränderlichen Sternes δ Cephei

Kennt man den Spektraltypus (oder auch nur den Farbenindex) eines Sternes, dann braucht man also nur noch zu wissen, ob er zur Gruppe der Riesen oder der Zwerge gehört, um sofort aus dem Diagramm seine absolute Größe M entnehmen zu können. Die Entscheidung Riese oder Zwerg aber läßt sich fallen auf Grund gewisser Unterschiede in den Stärken der Linien im Spektrum. Da hier das Spektrum auf dem Weg über die Leuchtkraft zu einer Bestimmung der Entfernung führt, spricht man oft auch von „spektroskopischen Parallaxen“.

Eine ganz andere Möglichkeit zur photometrischen Entfernungsbestimmung bietet eine Klasse von Sternen, deren Helligkeit in gesetzmäßigem Rhythmus schwankt. Nach dem bekanntesten Vertreter dieser Klasse von Veränderlichen, δ Cephei, dessen Lichtkurve Abb. 159 zeigt, nennt man sie δ -Cephei-Sterne. Bei diesen Sternen hat man einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Periode der Lichtschwankung und der absoluten Größe feststellen können, den die vorstehende Tabelle zeigt.

Absolute Größe M	Periode
0	0,5 Tage
— 1	1,8 „
— 2	5,0 „
— 3	10 „
— 4	17 „
— 5	30 „
— 6	60 „

Die δ -Cephei-Sterne sind ausnahmslos Riesen von mindestens hundertfacher Sonnenhelligkeit und haben um so größere Leuchtkraft, je größer die Periode ist. Durch die Länge der Periode ist die absolute Größe eindeutig festgelegt. Man braucht also nur die Lichtkurve eines solchen δ -Cephei-Veränderlichen aufzunehmen, um aus der Periode sofort die absolute Größe und daraus dann die Entfernung abzuleiten.

Die Bedeutung der photometrischen Entfernungsbestimmungen besteht ganz allgemein darin, daß hier keine Winkelmessungen nötig sind, sondern nur Helligkeitsbeobachtungen. Die Grenze, bis zu der man in den Raum vordringen kann, ist nicht mehr bestimmt durch die Genauigkeit, mit der parallaktische Verschiebungen gemessen werden können, sondern nur durch die Lichtstärke der Fernrohre, mit denen die Helligkeitsbeobachtungen angestellt oder Spektren aufgenommen werden. Beobachten wir z.B. an einem Stern der 18. Größe den typischen δ -Cephei-Lichtwechsel mit einer Periode von 5 Tagen, dann wissen wir, daß dieser Stern die absolute Größe -2 , also den Entfernungsmodul $m - M = 20$, hat. Nach Tabelle S. 135 befindet sich der Stern also in einer Entfernung von 100 000 parsec.

Die Messung der Entfernungen von kugelförmigen Sternhaufen und von Spiralnebeln ist erst dadurch möglich geworden, daß man in diesen Sternsystemen solche typische Veränderliche gefunden hat.

§ 47. Bewegungen der Sterne

Der Vergleich von Sternkatalogen aus verschiedenen Zeiten hat gezeigt, daß auch die „Fix“-Sterne ihren Ort am Himmel verändern. Diese Veränderungen erfolgen allerdings im Gegensatz zu den Bewegungen der Planeten so langsam, daß sie im allgemeinen erst nach vielen Jahren bemerkbar werden. Die größte bisher bekannte „Eigenbewegung“ (EB) von $10''$ im Jahr hat ein schwacher Stern 10. Größe („Barnards Schnellläufer“ im Ophiuchus); er rückt in 100 Jahren erst um eine halbe Vollmondbreite unter den Sternen weiter. Jährliche EB größer als $0,1''$, d.h. $10''$ im Jahrhundert, haben nur etwa 100 Sterne.

Die EB ist nur die eine Komponente der Bewegung der Sterne, die quer zur Gesichtslinie verläuft. Der Dopplereffekt, der für das Licht ebenso gilt wie für den Schall, gestattet auch die Messung der Bewegung in der Gesichtslinie, der Radialgeschwindigkeit (RG). Bewegt sich ein Stern auf uns zu, dann sind die Linien in seinem Spektrum gegenüber denen des irdischen Vergleichsspektrums nach Violett verschoben, im umgekehrten Fall einer von uns weggerichteten Bewegung nach Rot (vgl. Teil IIB, § 9). Diese Linienverschiebungen, deren Größe von dem Verhältnis der Geschwindigkeit des Sternes zur Geschwindigkeit des Lichtes abhängt, sind recht klein, wie aus Abb. 160 zu ersehen ist. (Geschwindigkeiten, die auf uns zu gerichtet sind, also die Entfernung des Sternes von uns verringern, werden negativ gerechnet.) Die Genauigkeit der Ausmessung der Sternspektren ist aber heute so groß, daß man noch RG von 1 km/s und darunter feststellen kann. Die größten RG betragen mehrere 100 km/s ; im Durchschnitt aber beobachtet man bei Sternen nur RG um 20 km/s herum.

Aus EB und RG kann man die Größe und Richtung der wahren Bewegung im Raum ableiten, wenn die Entfernung des Sternes bekannt ist. Im Gegen-

satz zu den über 250 000 Sternen der Eigenbewegungskataloge enthalten die letzten Verzeichnisse der Radialgeschwindigkeiten erst rund 7000 Sterne. Nur für diese kleine Zahl von Sternen, deren photometrische Entfernungen bekannt sind, konnte also die wirkliche Bewegung im Raum berechnet werden.

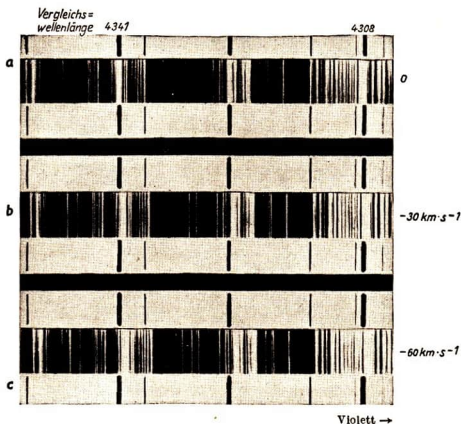


Abb. 160. Verschiebung der Spektrallinien infolge der Radialgeschwindigkeit. a, b, c Sternspektren (mit Absorptionslinien, im Negativ hell), ober- und unterhalb Eisen-Vergleichsspektrum (Emissionslinien, im Negativ schwarz). Über der Abbildung sind die Wellenlängen in Ängströmeinheiten ($\text{\AA}$) angegeben; $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$. Die den Violettverschiebungen entsprechenden Radialgeschwindigkeiten sind rechts neben die Spektren geschrieben.

§ 48. Die Bewegung des Sonnensystems

Wenn alle Sterne sich bewegen, dann ist anzunehmen, daß sich auch unsere Sonne mit dem ganzen Planetensystem als Stern unter Sternen bewegt. Diese Bewegung der Sonne, die unsere Erde ja mitmacht, muß sich dann ebenso in scheinbaren Bewegungen der Sterne widerspiegeln wie die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne. Denken wir uns für den Augenblick einmal alle Sterne stillstehend, nur die Sonne bewegt, dann müßte am Sternhimmel die gleiche Erscheinung auftreten, wie wir sie beobachten, wenn wir uns etwa durch einen Wald bewegen, der sich scheinbar vor uns öffnet und in unserem Rücken wieder schließt. Die Sterne in der Zielrichtung der Bewegung kommen scheinbar auf uns zu und rücken zugleich am Himmel nach allen Richtungen von diesem Zielpunkt weg; im entgegengesetzten Punkt rücken sie scheinbar zusammen und laufen zugleich von uns weg.

Da die Sterne selbst auch eigene Bewegungen haben und nicht wie die Bäume des Waldes in unveränderlicher Lage gegeneinander verharren, ist das Bild, das die scheinbaren Bewegungen der Sterne zeigen, nicht so einfach. Aber im Mittel läßt sich aus den beobachteten zusammengesetzten Bewegungen der Teil, der nur Spiegelung der Sonnenbewegung ist, herauschälen. Das ist ein typisches Beispiel für die Anwendung statistischer Methoden.

Im Mittel sind die EB aller Sterne von dem Zielpunkt der Sonnenbewegung, dem Apex¹⁾, weg und nach dem Gegenpunkt, dem Antapex¹⁾ hin gerichtet (Abb.161). Im Apex und Antapex selbst sind sie Null, ihre größten Werte erreichen sie für Sterne auf dem größten Kreis, dessen Pole

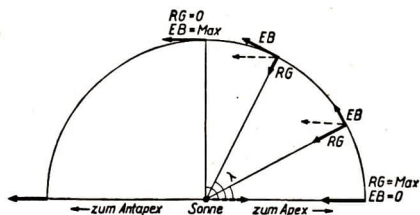


Abb.161. Zur Eigenbewegung der Sonne

Apex und Antapex sind. Umgekehrt sind für Sterne auf diesem Kreis die RG Null und erreichen ihre größten Werte auf uns zu bzw. von uns weg im Apex und Antapex.

Das Studium der Gesetzmäßigkeiten der EB und RG führt zu einer Bestimmung der Richtung und Größe

der Sonnenbewegung. Apex und Antapex sind die Punkte, in denen im Mittel die Eigenbewegungen verschwinden und die Radialgeschwindigkeiten ihre größten und kleinsten Werte erreichen. Der Maximalwert der in der Umgebung des Apex beobachteten RG gibt direkt die Geschwindigkeit der Sonne in km/s.

Die Sonne bewegt sich relativ zu den Sternen ihrer Umgebung mit einer Geschwindigkeit von rund 20 km/s scheinbar auf einen Punkt im Sternbild des Herkules zu, der die Koordinaten $AR = 270^\circ$, $Dekl. = +30^\circ$ hat.²⁾

Diese Bewegung der Sonne eröffnet eine neue Möglichkeit zur geometrischen Entfernungsbestimmung der Sterne. Bei einer Geschwindigkeit von 20 km/s legt die Sonne in einem Jahr einen Weg gleich dem doppelten Erdbahndurchmesser zurück. In hundert Jahren schafft sie daher, wenn die Bewegung geradlinig gleichförmig erfolgt, für die Parallaxenmessung bereits eine Basis, die 200mal so groß ist wie die Basis für die jährlichen Parallaxen. Aus den hundertjährigen EB kann man daher noch sog. „mittlere Parallaxen“ ableiten für Sterne, die in Entfernungen von einigen tausend parsec stehen. Damit wird der Bereich der rein geometrischen Entfernungsbestimmung ganz außerordentlich erweitert, und das ist wichtig für die Sicherung der Grundlagen der photometrischen Entfernungsbestimmungen.

1) apex (lat.) = Spitze; anti (griech.) = gegen

2) AR = ascensio recta = Rektaszension; Dekl. = Deklination

Benutzt man bei der Apexbestimmung nicht die helleren Sterne der nächsten Sonnenumgebung, sondern schwache Sterne oder Sterngruppen in größeren Entfernungen, dann erhält man andere scheinbare Zielrichtungen und Geschwindigkeiten. Daraus lassen sich Schlüsse ziehen auf die wahren Bewegungen im Sternsystem (s. S. 144).

§ 49 Die Milchstraße und das System der Fixsterne

Die auffallendste Erscheinung am nächtlichen Himmel ist die Milchstraße, die als schwach leuchtendes Band von wechselnder Breite, mit helleren und dunkleren Stellen, ungefähr längs eines größten Kreises sich über den Himmel spannt. Dieses Band löst sich im Fernrohr in eine Unzahl schwacher und schwächster Sterne auf. Die Abzählungen der Sterne verschiedener Größe am ganzen Himmel ergeben, daß die Sterne nicht nur in der eigentlichen Milchstraße dichter stehen, sondern daß ganz allgemein die Sternzahl zunimmt beim Fortschreiten vom Pol der Milchstraße gegen die Milchstraße hin. Nur ist dieses Anwachsen um so ausgeprägter, je schwächere Sterne man betrachtet, so daß der Gesamteindruck der Milchstraße vor allem durch das Heer der schwachen und schwächsten Sterne hervorgerufen wird.

Es unterliegt keinem Zweifel, daß die Milchstraße im Sternsystem eine ähnliche Rolle spielt wie die Ekliptik im Planetensystem. Man führt daher bei Untersuchungen über das Sternsystem die Ebene der Milchstraße als Fundamentalebene ein und bezieht die galaktischen¹⁾ Koordinaten (galaktische Länge und Breite) auf den größten Kreis, der durch die Milchstraße gelegt werden kann. Der Pol dieses Kreises hat im rotierenden Äquatorsystem die Koordinaten

$$AR = 12 \text{ h } 40 \text{ min} \quad \text{Dekl.} = 28^\circ 0'.$$

Der bei 18 h 40 min gelegene Schnittpunkt der Milchstraßenebene mit dem Äquator ist Ausgangspunkt für die Zählung der galaktischen Längen.

Aus der scheinbaren Verteilung der Sterne an der Himmelskugel kann man ihre räumliche Verteilung berechnen, kann also angeben, wieviel Sterne etwa in der Raumeinheit an einer bestimmten Stelle vorhanden sind. Dazu bedarf es allerdings noch gewisser Kenntnisse über die Häufigkeit der Leuchtkräfte und der Farben der Sterne, die auf statistischem Wege erhalten werden; hier spielen z. B. die mittleren Parallaxen eine wichtige Rolle.

Gehen wir aus von der nächsten Umgebung der Sonne, indem wir den Raum betrachten, der von einer Kugel mit dem Radius 5 parsec umschlossen wird, so finden wir innerhalb dieser Kugel mit dem Rauminhalt 520 parsec³ insgesamt 51 Sterne; es kommt also ein Stern auf einen Raum von 10 Kubikparsec. Diese Sterndichte nimmt mit der Entfernung von der Sonne nach

1) *gála* (griech.) = Milch

allen Seiten hin ab, am raschesten in der Richtung nach den Polen der Milchstraße zu, sehr viel langsamer in der Milchstraßenebene. Man kommt so zu der Vorstellung, daß das Sternsystem ein flach-linsenförmiges Gebilde ist mit der größten Ausdehnung in Richtung der Milchstraße und daß die Sonne



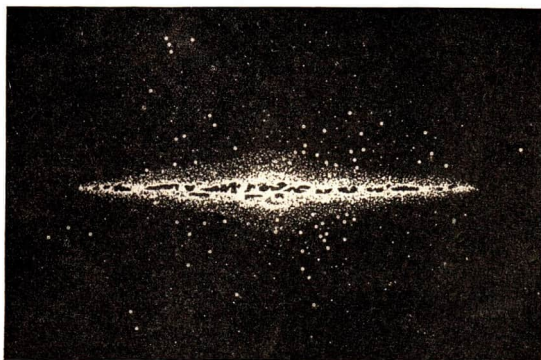
Abb. 162. Kugelförmiger Sternhaufen im Herkules.
Der waagerechte Bilddurchmesser entspricht etwa 75 parsec.

nicht sehr weit ab vom Mittelpunkt des Systems steht.

Die Ergründung der wahren Anordnung des Milchstraßensystems gelang aber erst, als man mit den photometrischen Entfernungsbestimmungen in größere Tiefen des Raumes vordrang, als es die geometrischen und statistischen Methoden ermöglichten, die, wie wir heute wissen, nur einen Ausschnitt, das „lokale Sternsystem“, erfaßten. Der entscheidende Schritt war die Messung der Entfernungen der kugelförmigen Sternhaufen (Abb. 162) mit Hilfe der in ihnen gefundenen δ -Cephei-Sterne. Die etwa 100

bekannten Sternhaufen (in Abb. 163 als dicke Punkte eingezeichnet) bilden das Grundgerüst eines riesigen Sternsystems, dessen Mittelpunkt in einer Entfernung von 10 000 parsec in Richtung der großen Sternwolke im Sternbild des Schützen in 327° galaktischer Länge liegt.

Die Abb. 163 zeigt, wie sich dieses System einem weit außerhalb befindlichen Beobachter in der Ebene der Milchstraße darstellt. Es gleicht wahrscheinlich einem der bekannten großen Spiralnebel, die in Abb. 164 und 165 abgebildet sind. Unser Sonnensystem hat seinen Platz weit ab vom Mittelpunkt, nahe dem Rand, in einem der Spiralarme, und steht 15 parsec nördlich der Symmetrieebene. Der größte Durchmesser in der Milchstraßenebene beträgt etwa 30 000 parsec.



↑
Sonne

Abb. 163. Anblick des Milchstraßensystems für einen weit außerhalb stehenden Beobachter (schematisch). Die dicken Punkte stellen Kugelhaufen dar. Waagerechter Durchmesser des Systems etwa 30 000 parsec



Abb. 164. Der große Andromedanebel mit seinen beiden Begleitern. Die Bilddiagonale (größter Durchmesser des Systems) entspricht etwa 15 000 parsec

Während bei der Apexbestimmung aus den Radialgeschwindigkeiten der Sterne eine Sonnengeschwindigkeit von 20 km/s gefunden wurde, erhält man aus den RG der Kugelhaufen eine Geschwindigkeit von fast 300 km/s. Die

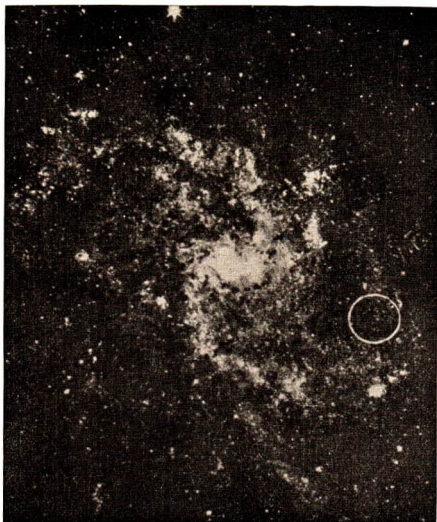


Abb. 165. Spiralnebel M 33 im Triangulus.
Der eingezeichnete Kreis entspricht, auf unser Milchstraßensystem übertragen, etwa dem Bereich des „lokalen“ Sternsystems in der Umgebung der Sonne.

20 km/s charakterisieren nur die Bewegung der Sonne relativ zu den Sternen ihrer näheren Umgebung, d. h. die lokale Bewegung innerhalb des Spiralarmes, dem die Sonne angehört. Die große Geschwindigkeit von 300 km/s dagegen kennzeichnet offenbar die mittlere Bewegung des Sternstromes, dem die Sonne angehört, relativ zum Gesamtsystem. Das Milchstraßensystem rotiert mit einer vom Zentrum nach außen abnehmenden Geschwindigkeit um eine Achse senkrecht zur Milchstraßenebene. In der Gegend, in der die Sonne sich befindet, beträgt die Rotationsgeschwindigkeit

285 km/s und ist nach einem Punkt in 55° galaktischer Länge (senkrecht zur Richtung nach dem bei 327° liegenden Zentrum) hin gerichtet. Die Umlaufzeit der Sonne beträgt 220 Millionen Jahre. Das ganze System enthält einige hundert Milliarden Sterne, im Durchschnitt einen Stern auf 10 Kubikparsec.

§ 50. Das Universum

Daß unser Milchstraßensystem selbst wieder nur Teil eines größeren Systems ist und daß die Spiralnebel von der Art des Andromedanebels oder des Nebels im Triangulus Glieder dieses Systems höherer Ordnung sind, hat man zwar schon im 18. Jahrhundert vermutet, den Beweis dafür hat aber erst unser Jahrhundert erbracht.

Nachdem mit dem 150-cm-Spiegel des Mt.-Wilson-Observatoriums in Kalifornien der Sprung zu den Kugelhaufen und bis an die Grenzen des Milchstraßensystems gelungen war, konnte der 250-cm-Spiegel weit darüber hinausgreifen und sich an die Spiralnebel wagen. Er löste den Andromedanebel in Sterne auf wie die kleineren Instrumente die Milchstraße, zuerst die Spiralarme, später auch den Kern und sogar die beiden „elliptischen Nebel“, die als Begleiter in Abb. 164 zu sehen sind. Die hellsten dieser Sterne sind kaum 18. Größe. Unter ihnen fanden sich δ -Cephei-Sterne mit Perioden von 40 Tagen und mehr, also mit absoluten Leuchtkräften von etwa -5 . Damit berechnete sich die Entfernung dieses fernen Sternsystems zu 250 000 parsec.

In eine Entfernung von 100 Millionen parsec versetzt, würde der Andromedanebel für uns zusammenschrumpfen zu einem winzigen Nebelfleckchen, das einem Stern 18. Größe gliche und von einem solchen gerade noch durch seine elliptische Gestalt unterscheidbar wäre. Es gibt am Himmel viele Millionen solcher Nebelflecke in allen scheinbaren Größen, vom Andromedanebel angefangen bis zu den winzigen, fast sternartigen elliptischen Nebeln. Wir zweifeln heute nicht mehr daran, daß alle diese Nebel in Wahrheit „außer-galaktische“ Sternsysteme von der Art unseres Milchstraßensystems sind. Wenn dem so ist, dann können die Entfernungen aus den scheinbaren Helligkeiten berechnet werden; sie bewegen sich zwischen einigen Millionen und über 100 Millionen Lichtjahren. Das Megaparsec (1 Million parsec) ist die dieser größeren Welt angemessene Entfernungseinheit.

Die Nebel ordnen sich vielfach ebenso zu Haufen an wie innerhalb des Sternsystems die Sterne. Auch unser Milchstraßensystem ist Mitglied einer

Die „lokale Gruppe“ von Sternsystemen

Name	Form	Entfernung	Durchmesser	Totalhelligkeit
Milchstraße	Spirale	—	25	4000
Andromeda	Spirale	230	15	1600
Gr. Magellan-Wolke	Wolke	22	4,6	250
Triangulus	Spirale	240	4,3	100
Kl. Magellan-Wolke	Wolke	25	3,6	60
Kl. Begl. Andr.	Kugel	230	0,5	17
Fornax	Elliptisch	140	2,1	6
Gr. Begl. Andr.	Elliptisch	230	1,1	4
NGC 6822	Wolke	160	0,9	2
IC 1613	Wolke	225	1,1	2
Skulptor	Elliptisch	70	0,9	1,8
NGC 185	Elliptisch	200	0,9	1,8
NGC 147	Elliptisch	200	0,8	1,3

Entfernungen und Durchmesser in Kiloparsec; Helligkeiten in Millionen Sonnen
 NGC = New General Catalogue of Nebulae; IC = Index Catalogue

lockeren Gruppe von 13 Systemen, zu der außer dem Andromedanebel mit seinen beiden Begleitern und dem großen Triangulusnebel auch die beiden Magellanwolken am südlichen Sternhimmel gehören. Wenn wir diese „lokale Gruppe“ von Sternsystemen als System höherer Ordnung in Parallele setzen wollen zum Sonnensystem, dessen Mitglied die Erde ist, dann können wir den in der Tabelle auf S. 118 aufgeführten Abständen und Durchmessern

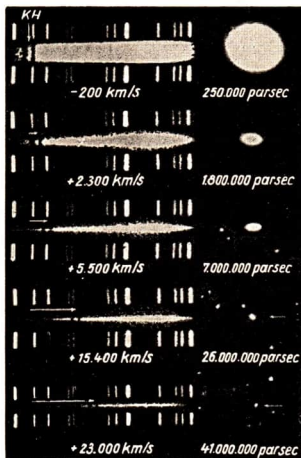


Abb. 166. Allgemeine Rotverschiebung der Spiralnebel. Rechts im Bilde jeweils eine direkte Aufnahme des Nebels, darunter seine Entfernung in parsec; links jeweils das Spektrum zwischen Vergleichsspektren, darunter die Radialgeschwindigkeiten, die den durch Pfeile markierten Linienverschiebungen entsprechen

dieser Verschiebungen als vielmehr die Tatsache, daß sie mit ganz wenigen Ausnahmen nur nach Rot erfolgen und daß sie um so größer sind, je weiter die Nebel von uns entfernt sind (Abb. 166). Bei einer Auffassung der Rotverschiebung als Dopplereffekt würde man zu der Vorstellung gelangen, daß sich die entfernten Nebel vom lokalen Sternsystem fortbewegen. Die Radialgeschwindigkeit der sich scheinbar von uns fortbewegenden Nebel wäre dann um so größer, je weiter die Nebel von uns entfernt sind. Sie wäre der Entfernung der Nebel vom Beobachter proportional und würde sich bei der Zunahme der Entfernung um 1 Megaparsec um 580 km/s vergrößern. Der größten bisher gemessenen Rotverschiebung würde dann

der Planeten nun die in entsprechend größeren Einheiten ausgedrückten Entfernungen und Dimensionen der spiralförmigen, elliptischen und wolkenartigen Sternensysteme gegenüberstellen. Unser Milchstraßensystem steht als größtes an der Spitze der Tabelle (s. S. 145); es unterscheidet sich aber vom Andromedasystem nicht so sehr, daß man ihm eine Ausnahmestellung unter den Sternsystemen zuschreiben müßte.

Wenn es noch eines Beweises bedurfte, daß wir mit der Welt der Nebel eine größere Welt jenseits des Milchstraßensystems erschlossen haben, dann wurde dieser erbracht durch die Entdeckung eines neuen Gesetzes, das für das Universum eine ähnliche Rolle spielt wie die Keplerschen Gesetze für das Planetensystem. Die Spektren der Nebel zeigen Linienverschiebungen, die auf Radialgeschwindigkeiten von Tausenden von Kilometern in der Sekunde führen, wenn man sie nach dem Dopplereffekt deutet. Bemerkenswert ist indessen weniger die Größe

eine Geschwindigkeit von 42000 km/s, d.h. fast $\frac{1}{2}$ der Lichtgeschwindigkeit, entsprechen (Abb. 167).

Man könnte sich darüber wundern, daß gerade die Erde im Mittelpunkt dieser scheinbaren Radialbewegung der Spiralnebel steht. Setzt man voraus, daß sich sämtliche Entfernungen zwischen den Nebeln im gleichen Verhältnis vergrößern, so kann man sich leicht an Hand der Abb. 168 klarmachen, daß jeder beliebige Beobachter in irgendeinem der Sternsysteme den gleichen Eindruck hat, als ob gerade er Mittelpunkt der allgemeinen Fluchtbewegung sei. Nicht anders ist es z. B. auch mit den Punkten auf der Oberfläche eines Gummiballons, der aufgeblasen wird: bei der Vergrößerung des Ballons rückt jeder Punkt von jedem andern ab, und zwar um so stärker, je weiter die Punkte voneinander auf der Oberfläche entfernt sind. Jeder Punkt kann als Mittelpunkt allgemeiner Expansion aufgefaßt werden.

Bei der Deutung der Rotverschiebung als Dopplereffekt würde man zu der Vorstellung gelangen, daß der uns bisher bekannte Teil des Universums nicht stationär ist. Doch sind die

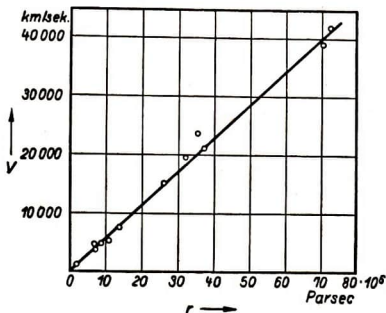


Abb. 167. Radialgeschwindigkeit v und Entfernung r bei außergalaktischen Nebeln. Die kleinen Kreise geben die beobachteten Werte für 12 Objekte. Die Gerade entspricht einer Zunahme der Radialgeschwindigkeit um je 580 km/s pro Megaparsec

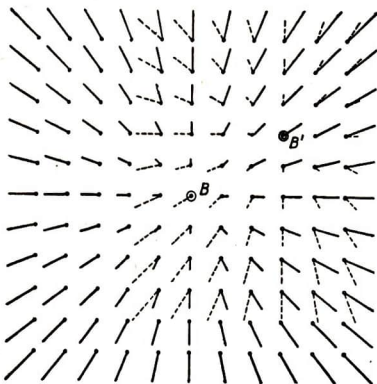


Abb. 168. Der Beobachter in B mißt die durch ausgezogene Striche dargestellten Geschwindigkeiten, der Beobachter B' die gestrichelt dargestellten. Diese kommen dadurch zustande, daß man an jedem Punkt des Beobachtungsfeldes dem (ausgezogen gezeichneten) Geschwindigkeitspfeil einen zweiten überlagert, der ebenso groß, aber entgegengesetzt gerichtet ist wie der Geschwindigkeitspfeil durch B' . Die gestrichelten Pfeile ordnen sich um B' genau so wie die ausgezogenen um B ; das Bild ist für beide Beobachter das gleiche

Forschungen über die Bedeutung der Rotverschiebung noch keineswegs abgeschlossen. Es ist durchaus denkbar, daß sie zu Ergebnissen führen, die nicht auf eine Expansionsbewegung der Nebel hindeuten. Die Ergebnisse dieser Forschungen müssen abgewartet werden.

Wie die Erde nur ein unbedeutendes Mitglied des Planetensystems, die Sonne ein Stern unter Milliarden anderer irgendwo am Rande des großen Milchstraßensystems, so ist das Milchstraßensystem selbst nur eines unter einigen hundert Millionen, das mit seinen nächsten Nachbarn eine kleine Gruppe irgendwo im Universum bildet.

Sachverzeichnis

Aberration, chromatische 56
 —, sphärische 55
 Absorption des Lichtes 73
 Absorptionsspektrum 73
 Adaptation 62
 Additive Farbenmischung 74
 Akkommodation 63
 Amplitude 7. 8
 Antapex 140
 Apex 140
 Aphel 120
 Äquatorkulm 87
 Äquinoktium 89
 Astigmatismus 57
 Astronomisches Fernrohr 69
 Atmosphärische
 Strahlenbrechung 47
 Auge 61
 Augenmodell 63
 Azimut 87

 Beleuchtung 32
 Beleuchtungsstärke 78
 Bild, reelles 37
 —, virtuelles 34. 38. 40
 Bildfeldwölbung 57
 Bildwerfer 60
 Blinder Fleck 62
 Bodesche Reihe 118
 Bogenlampe 76
 Brechungsgesetz 42
 Brechkraft 64
 Brechungswinkel 41
 Brechungszahl 42
 Brennfläche 36
 Brennpunkt
 des Hohlspiegels 35
 — der Linse 48
 Brennweite des Hohlspiegels
 36
 — der Linse 48
 Brillen 64

 Chemolumineszenz 77
 Chromosphäre der Sonne
 122

Dämmerungssehen 62. 81
 Deklination 88
 Diaskop 60
 Dioptrie 64
 Dissonanz 14
 Dopplereffekt 138. 146
 Dreiklang 14

 Echo 12
 Eigenschwingung 21
 Einfallswinkel 32. 41
 Ekliptik 99
 Emission des Lichtes 71
 Emissionsspektrum 72
 Entfernungsgesetz,
 photometrisches 78
 Episkop 60
 Epizykel 116
 Erde, Dichte 122
 —, Drehung
 um die Erdachse 105
 —, Drehung um die Sonne
 108
 —, Gestalt 103
 Erdfernrohr 70
 Ergänzungsfarbe 54

 Farbempfindung 62
 Farbenkreise 74
 Farbenmischung 74. 75
 Fernpunkt 63
 Fernrohr 68. 95
 Fixsterne 85
 —, Eigenbewegung 138
 —, Entfernungsbestimmung
 135. 136
 —, Farbenindex 132
 —, Größenklasse 129
 —, Radialbewegung 138
 —, Spektralklasse 132
 Flageoletton 17
 Flimmern 47
 Flöte 21
 Fortpflanzungsgeschwindig-
 keit des Lichtes 29
 — des Schalles 12

Foucaultscher Pendel-
 versuch 106
 Frequenz 6. 8
 Frequenzempfindlichkeit 25
 Fraunhofersche Linien 74
 Frühlingspunkt 94

 Galileisches Fernrohr 69
 Geradstichtiges Prisma 54.
 72
 Geräusch 5. 9
 Gesichtswinkel 65
 Glühlampe 75
 Gnomon 84. 89
 Grammophon 9
 Grenzwinkel der totalen
 Reflexion 43
 Grundsichwingung 17
 Grundton 13. 16

 Harmonische Tonreihe
 13 u. ff.
 Hefnerkerze (HK) 78
 Hertz (Hz) 6
 Himmel, Koordinaten-
 system 87. 95. 100
 Himmelsachse 86
 Hohlspiegel 35
 Hohlspiegelformel 38
 Holländisches Fernrohr 69
 Hörgrenzen 25
 Hörschwelle 25
 Horizont 83

 Intervall 13

 Jahr, siderisches 101. 119
 —, tropisches 101. 119

 Kalender, Julianischer 101
 —, Gregorianischer 101
 Kaleidoskop 34
 Kammerton 14
 Kehlkopf 23
 Keplersches Fernrohr 69
 Keplersche Gesetze 120 u. f.
 Kinematograph 61

Klangfarbe 6. 8. 18
 Klangfiguren, Chladnische 19
 Klavier 15
 Kollimator 71
 Kolorstern 94
 Koma 58
 Komet 126
 Komplementärfarben 54
 Konjunktion 117
 Konkavlinse 48. 51
 Konkavspiegel 35
 Konsonanz 14
 Konvexlinse 48
 Konvexspiegel 39
 Koppelung 22
 Korona 123
 Körperfarbe 74
 Kulmination 84
 Kurzsichtigkeit 63

 Längsschwingung 18
 Lautstärke 25
 Leuchtdichte 80
 Leuchtfarbe 77
 Leuchtröhre 76
 Leuchtstofflampe 80
 Lichtgeschwindigkeit 29
 Lichtjahr 135
 Lichtquelle 27
 Lichtmenge 79
 Lichtstärke 78
 Lichtstrahlenbündel,
 divergentes 28
 —, paralleles 28
 —, konvergentes 35
 Lichtstrom 28. 78
 Linienspektrum 72
 Linse 47
 —, achromatische 57
 Linsenfehler 55
 Linsenformel 51
 Linsensystem 58
 Lippenpfeife 20
 Lochkamera 29
 Longitudinalschwingung 18
 Luftschwingung 8
 Lumen (lm) 78
 Luminophore 77
 Lupe 66
 Lux (lx) 79

 Medium 10. 41
 Membran 23
 Membrankapsel 8

Meridian 84
 Meridianinstrument 98
 Meteorit 127
 Mikroskop 67
 Milchstraße 141
 Minimum der Ablenkung 46
 Mittel 10. 41
 Mischfarbe 54
 Monat, siderischer 110
 —, synodischer 110
 Mond 109 u. ff. 127
 Mondbewegung 109. 112
 Mondphasen 109. 113
 Monochord 7. 16
 Musikinstrumente 16. 20. 21

 Nachhall 12
 Nadir 83
 Nahpunkt 63
 Neue Kerze (NK) 78

Oberschwingung 17
 Oberton 17
 —, harmonischer 17
 Objektiv 59. 67. 68
 Ohr 9. 24
 Okular 67. 68
 Opposition 117
 Optische Achse 35
 — Scheibe 31
 Orgel 20

Parabolspiegel 36
 Parallaxe 134
 Parallel 88
 Parsec 134
 Pendelversuch,
 Foucaultscher 106
 Perihel 120
 Pfeife 20
 Phon 25
 Phonograph 9
 Phosphore 77
 Photographische Kamera 59
 Photometer 79
 Photometrie 77
 Photosphäre der Sonne 122
 Pigmentfarbe 74
 Planet 115 u. ff.
 —, Bewegung 115. 117
 Planparallele Platte 45
 P.J.höhe 86. 107
 Präzession 99
 Prisma, achromatisches 54

Prisma, geradsichtiges 54
 —, optisches 45
 —, total reflektierendes 44
 Prismenfernrohr 70
 Projektionsapparat 60
 Protuberanzen 123

Querschwingung 18

Radialgeschwindigkeit 138
 Reflektor 70
 Reflexion des Lichtes 30. 32
 — des Schalles 12
 —, totale 44
 Reflexionsgesetz 32
 Reflexionswinkel 32
 Refraktor 70
 Rektaszension 96
 Resonanz 21
 Rotverschiebung 138. 139.
 146

Saitenschwingung 7. 16
 Sammellinse 48
 Schall 5
 Schallausbreitung 9
 Schallgeschwindigkeit 12
 Schallquelle 5
 Schallreflexion 12
 Schallstärke 25
 Schallwelle 11
 Schwingung,
 Eigenschwingung 21
 —, erzwungene 23
 —, freie 21
 —, gedämpfte 21
 Schwingungsbauch 17
 Schwingungsform 8
 Schwingungsknoten 17
 Schwingungsweite 7. 8
 Schwingungszahl 6. 8
 Sehstärke 62. 66
 Schinkel 65
 Sirene 6
 Sonne 88. 115
 —, Atmosphäre 123
 —, Bewegung 140
 Sonnenfleck 122
 Sonnensystem 102 u. ff.
 Sonnenuhr 92
 Sonnenwende 90
 Sonnenzeit, mittlere 91
 —, wahre 91
 Spektralanalyse 72

Spektralapparat 71
 Spektralfarbe 53
 Spektroskop 72
 Spektrum 53
 Spiegel, ebener 31
 —, sphärischer 35
 Spiegelfernrohr 70
 Spiralnebel 142. 145
 Stereoskop 64
 Sternbild 85
 Sternkarte 94
 Sterntag 94
 Sternzeit 97
 Stilb (sb) 80
 Stimme 23
 Stimmgabel 5. 6. 18
 Stimmung 15
 Stundenkreis 88. 95
 Stundenwinkel 88. 97
 Subtraktive
 Farbenmischung 75

Tag, mittlerer Sonnentag
 91
 Tageslicht, künstliches 75
 Tagessehen 62
 Tagundnachtgleiche 89
 Tiefenschärfe 59
 Tierkreis 99
 Tonhöhe 5. 6. 8
 Tonleiter 13
 —, chromatische 15
 —, diatonische 15
 —, Dur- 13
 Tonstärke 5. 7. 8
 Totale Reflexion 43
 Transversalschwingung 18
 Ultraschall 25
 Universum 144 u. ff.
 Vergrößerung des Fernrohrs
 68

Vergrößerung der Lupe
 67
 — des Mikroskops 67
 Vergrößerungsglas 66
 Vokal 8. 24
 Weitsichtigkeit 63
 Wellenbewegung 11
 Wendekreis 89
 Widderpunkt 94
 Winkelspiegel 34
 Zeitgleichung 91. 100
 Zeitlupe 61
 Zeitraffer 61
 Zenit 83
 Zenitdistanz 87
 Zerlegung des Lichtes 52
 Zerstreuungskreis 59
 Zerstreuungslinse 51
 Zungenpfeife 20

