

Bewegungen), so dass ein Grundton je nach den ihn begleitenden Obertönen verschiedene Wellenform besitzt.

Der Nachweis der in den verschiedenen Klängen enthaltenen Obertöne lässt sich mit Hilfe der v. Helmholtz'schen Resonatoren erbringen.

**Mittönen und Resonanz.** Wird eine von zwei denselben Ton gebenden Stimmgabeln (Saiten u. dergl.) zum Tönen gebracht und gleich darauf durch Berührung mit der Hand in ihren Schwingungen unterbrochen, so hört man, dass die andere leise nachtönt. Dies beweist, dass die Schwingungen der ersten Stimmgabel sich durch die Luft auf die zweite übertragen und ein Mitschwingen und Mittönen der letzteren hervorriefen.

Stemmt man eine angeschlagene Stimmgabel auf Holz, so schwingen die Holztheilchen mit, und der Ton der Stimmgabel wird verstärkt. Die gleiche Verstärkung wird durch die Resonanzböden oder Resonanzkästen der verschiedenen musikalischen Instrumente erreicht, in denen sowohl die Luft wie das Holz zum Mittönen veranlasst wird.

**Phonograph und Grammophon.** Der Phonograph (Edison, 1877) und das Grammophon dienen dazu, Tonreihen zu konserviren und nach Verlauf beliebiger Zeit wieder zum Vorschein kommen zu lassen. Der Phonograph besteht aus einer dünnen Glasmembran, gegen die gesprochen, gesungen, geblasen u. s. w. wird, so dass sie in Schwingungen geräth. Diesen Schwingungen entsprechend macht ein auf der Rückseite der Membran befestigter Stift Eindrücke auf einen Wachscylinder, der sich an ihm, gleichzeitig seitlich vorrückend, vorbeidreht. Wird späterhin der Wachscylinder, der beliebig aufgehoben werden kann, genau so wieder eingestellt wie zu Anfang des Versuchs, an dem Stift vorbeigedreht und dieser leicht gegen den Wachscylinder gedrückt, so vollführt die Membran dieselben Schwingungen wie bei der Erzeugung der Eindrücke auf dem Wachscylinder und sendet daher dieselben Tonwellen und damit dieselben Töne nach aussen in die Luft, die vorher auf sie übertragen worden waren.

## 10. Die Lehre vom Licht.

(Optik.)

**Natur des Lichtes.** Das Licht beruht ebenso wie der Schall auf einer Wellenbewegung, aber nicht der uns umgebenden Körper, sondern des alle Zwischenräume zwischen den Körpertheilen erfüllenden Aethers (Weltäthers oder Lichtäthers). Die Schwingungen sind transversale.

Dass der Aether der Träger der Lichtschwingungen ist, erkennt man daraus, dass das Licht durch luftleere Räume ungeschwächt hindurchgeht (dass

es insbesondere von den Himmelskörpern aus durch den luftleeren Weltraum zu uns gelangt), während andererseits viele Körper das Licht nicht hindurchlassen.

Die Lehre von der Wellenbewegung des Lichts, die sogenannte Undulationstheorie, hat Huyghens (1690) begründet. Vor ihm hatte die Newtonsche Emissions- (oder Emanations-)Theorie (1672) Anerkennung gefunden, wonach das Licht ein äusserst feiner, unwägbarer (imponderabler) Stoff sein sollte, der von den leuchtenden Körpern ausströmte. Der letzteren Theorie widersprechen mancherlei Erscheinungen, z. B. im Gebiete der Farbenlehre; streng widerlegt wurde sie durch die Thatsachen der Interferenz des Lichtes.

**Ausbreitung des Lichtes.** Trotzdem das Licht in einer Wellenbewegung besteht, breitet es sich doch geradlinig aus, indem von einem Licht aussendenden Mittelpunkte aus die Wellenbewegung sich bis zu einem bestimmten Punkte nur auf dem kürzesten Wege des Radius fortpflanzt, während sie auf allen hiervon abweichenden Wegen durch Interferenz vernichtet wird.

Das von dem Licht aussendenden Mittelpunkte (dem Strahlenpunkte) bis zu einem anderen Punkte sich fortbewegende Licht heisst ein Lichtstrahl; mehrere Lichtstrahlen bilden zusammen ein Strahlenbündel oder Lichtbündel (eigentlich Lichtstrahlenbündel).

Der geradlinige Verlauf der Lichtstrahlen lässt sich an einem Lichtbündel erkennen, das durch eine kleine Oeffnung in ein staub- oder raucherfülltes, finsternes Zimmer eintritt; ferner an Form und Grösse des Schattens, den ein von einem Lichtbündel getroffener Gegenstand wirft.

Die Lichtaussendung wird Leuchten genannt.

Als Schatten bezeichnet man den wenig oder gar nicht beleuchteten Raum hinter einem beleuchteten Körper, der kein Licht hindurchlässt. Man unterscheidet zwei Arten des Schattens: Kernschatten und Halbschatten. Der Kernschatten ist der Raum, dem gar kein Licht zu Theil wird, während der den Kernschatten umgebende Raum, der von einigen Punkten des leuchtenden Körpers Licht empfängt, Halbschatten genannt wird. Beide haben kegelförmige Gestalt. (Fig. 58.) Unter dem Ausdruck „Schatten“ wird häufig auch nur das dunkle Flächenstück verstanden, das auf einer den (bezw. die) Schattenkegel schneidenden Fläche entsteht.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes (aus den Verfinsterungen der Jupitermonde — 1675 durch Olaf Römer —, der Aberration des Lichtes der Fixsterne, sowie durch sinnreich gebaute Apparate auch für irdische Entfernungen ermittelt) beträgt ungefähr 289 000 km oder rund 40 000 Meilen in der Sekunde (ist also nahezu 1 Million Mal so gross als die des Schalles).

Hinsichtlich der Stärke erfolgt die Ausbreitung des Lichtes

nach demselben Gesetze wie die des Schalles: die Lichtintensität ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung.

**Selbstleuchtende Körper.** Ein Körper, der das Licht, welches er aussendet, selbständig hervorbringt, heisst ein selbstleuchtender Körper. Zu

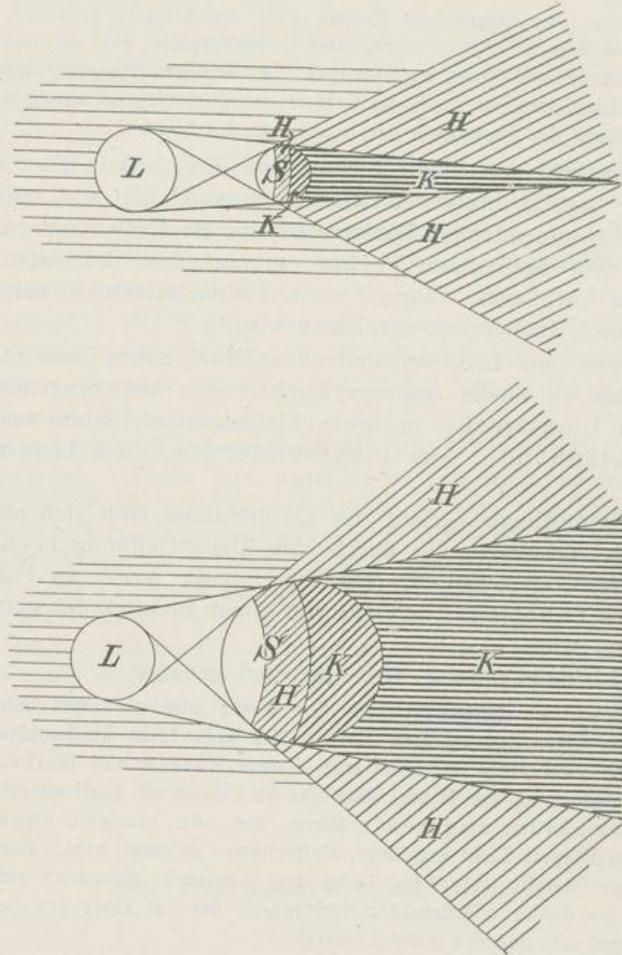


Fig. 58. Kern- und Halbschatten.

(*L* = leuchtender Körper, *S* = Schatten werfender Körper, *K* = Kernschatten, *H* = Halbschatten.)

den selbstleuchtenden Körpern gehören: die Sonne und die Fixsterne; verbrennende und glühende Körper; phosphorescirende Körper, welche im Unterschied von den vorgenannten schon bei gewöhnlicher Temperatur leuchten, und zwar entweder durch Oxydation (chemische Verbindung mit Sauerstoff) oder in Folge vorausgegangener Insolation (Bestrahlung durch Sonnen- oder zerstreutes

Tagesl  
infusio

auf e  
Art:  
derse  
oder  
absol  
dure  
schaf  
tirte

sicht  
Dure  
die I  
ständ  
dure  
hind  
werd

fallen  
tiren  
werf  
zers  
sicht  
die

Pho  
besta  
schei  
stark  
tend  
den  
leuch  
befes  
unbe  
sche  
her  
fern  
sche  
bei  
glei  
such

Tageslicht) zum Leuchten gelangen; leuchtende Organismen (Leuchtkäfer, Leuchtinfusorien u. s. w., welch' letztere das Meeresleuchten hervorrufen).

**Licht empfangende Körper.** Wenn eine gewisse Menge Licht auf einen Körper fällt, so verhält es sich in dreifach verschiedener Art: ein Theil wird unmittelbar an der Oberfläche oder von den derselben nahe gelegenen Schichten des Körpers zurückgeworfen oder reflektirt; ein Theil dringt in den Körper ein und wird absorbirt; ein dritter geht durch den Körper hindurch, wird hindurchgelassen. Dieser dritte Theil kommt bei gewisser Beschaffenheit der Körper in Wegfall: es wird dann alles nicht reflektirte Licht von dem Körper absorbirt.

Körper, welche kein Licht hindurchlassen, heissen undurchsichtig; die übrigen theils durchsichtig, theils durchscheinend. Durchsichtig werden diejenigen Körper genannt, durch welche die Lichtstrahlen derartig ungehindert hindurchgehen, dass Gegenstände, von denen sie ausgehen, vollkommen erkennbar sind; durchscheinende Körper lassen das Licht nur als hellen Schein hindurch, ohne dass Gegenstände durch sie erblickt oder erkannt werden könnten.

Körper mit glatten, polirten Oberflächen, welche die auf sie fallenden Lichtstrahlen regelmässig, in bestimmter Richtung reflektiren, heissen spiegelnde Körper. Körper mit rauher Oberfläche werfen die Lichtstrahlen unregelmässig nach allen Richtungen zurück: zerstreute Reflexion. Diese ist es, wodurch uns die Körper sichtbar werden. Körper, welche fast kein Licht reflektiren, wie die Luft, sind unsichtbar.

**Photometrie.** Die Lichtstärke eines leuchtenden Körpers wird mit dem Photometer gemessen. Das Bunsen'sche Photometer (1847) besitzt als Hauptbestandtheil einen Papierschirm, der an einer Stelle durch einen Oelfleck durchscheinend gemacht ist. Erfährt dieser Schirm von beiden Seiten her ungleich starke Beleuchtung — auf der einen Seite durch den zu untersuchenden leuchtenden Körper, auf der andern durch eine sogenannte Normalkerze —, so sieht der Fleck auf der stärker beleuchteten Seite dunkler, auf der schwächer beleuchteten Seite heller aus als seine Umgebung; was seinen Grund darin hat, dass befettetes Papier mehr Licht hindurchlässt und weniger reflektirt als unbefettetes Papier. Soll der Fleck sich von dem übrigen Papier nicht unterscheiden, also scheinbar verschwinden, so muss der Schirm von beiden Seiten her gleich stark beleuchtet werden. Dies kann durch Veränderung der Entfernung der einen Lichtquelle — z. B. der Normalkerze — vom Schirm geschehen. Aus dem Vergleich der Entfernungen beider Lichtquellen vom Schirm bei der jetzt herrschenden gleichen Leuchtstärke lässt sich dann das für die gleiche Entfernung herrschende Verhältniss der Leuchtstärke des zu untersuchenden Körpers zu dem der Normalkerze — auf Grund des Gesetzes über die

Ausbreitung des Lichtes, S. 93—94 — berechnen. Dieses Verhältniss ist dann die Lichtstärke des Körpers, da die Leuchtstärke der Normalkerze = 1 gesetzt wird.

**Reflexion des Lichtes (Katoptrik).** Die Lehre von der regelmässigen Reflexion (oder Spiegelung) des Lichtes — die Katoptrik — beschäftigt sich hauptsächlich mit der Reflexion an ebenen oder Planspiegeln und an kugelförmigen (sphärischen) Konkav- und Konvexspiegeln.

Für die Richtung eines reflektirten Lichtstrahls gilt dasselbe Gesetz wie für die Zurückwerfung einer elastischen Kugel von einer festen Wand (S. 85): Der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel (oder Reflexionswinkel). Hervorzuheben ist, dass der reflektirte Strahl in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot bestimmten Ebene liegt.

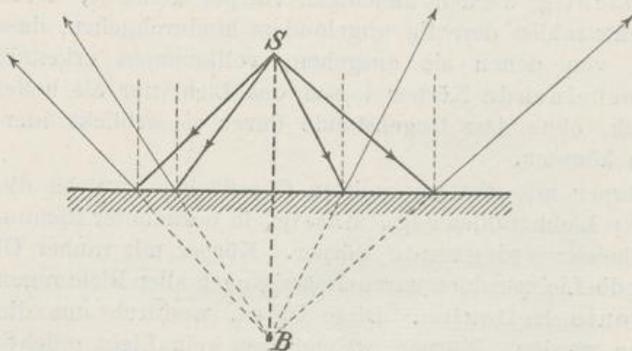


Fig. 59. Reflexion an ebenen Spiegeln.

Auf Grund dieses Gesetzes kommen die von einem Strahlenpunkte ausgehenden Lichtstrahlen, die auf einen ebenen Spiegel fallen, von demselben in derartigen Richtungen zurück, als wären sie von einem Punkte ausgegangen, der ebenso weit hinter der Spiegelebene liegt, wie der Strahlenpunkt vor derselben, und dessen Verbindungslinie mit dem Strahlenpunkte die Spiegelebene rechtwinklig schneidet. Dieser Punkt heisst Bildpunkt (Fig. 59, B).

Von einem Gegenstande, der aus zahlreichen Strahlenpunkten besteht, giebt ein ebener Spiegel ein — scheinbares oder virtuelles — optisches Bild.

Ein kugelförmiger Konkavspiegel (auch Hohlspiegel genannt, Fig. 60) ist ein Stück einer Kugelfläche; die Verbindungslinie des (vor dem Spiegel liegenden) Mittelpunktes der Kugel — des Krümmungsmittelpunktes ( $M$ ) — mit der Mitte ( $A$ ) der Spiegelfläche heisst die Achse des Spiegels ( $MA$ ). Der in der

Mitte  
Spieg  
die B  
I  
Achse  
werde  
parall  
(  
fallen  
Fig. 6  
I  
reell  
zwise

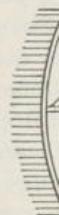


Fig. 60

punk  
punk  
punk  
Krüm  
Strah  
hinte  
refle  
ständ  
verkl

Bren  
punk  
fläche  
tuell,

Licht  
Sch

Mitte dieser Achse liegende Punkt ( $B$ ) heisst der Brennpunkt des Spiegels (oder Focus), seine Entfernung von der Spiegelfläche ( $AB$ ) die Brennweite des Spiegels.

Im Brennpunkte vereinigen sich (annähernd) alle parallel der Achse einfallenden Strahlen nach erfolgter Reflexion. Umgekehrt werden alle vom Brennpunkt aus auf den Spiegel fallenden Strahlen parallel der Achse zurückgeworfen. (Leuchtfeuer).

(Einfallslotth ist ein nach dem Punkte, in welchem der einfallende Strahl die Spiegelfläche trifft, gezogener Radius — Fig. 60,  $MC$ .)

Der Bildpunkt eines in der Achse gelegenen Strahlenpunktes ist reell (lässt sich daher z. B. auf einem Schirm auffangen) und liegt zwischen Krümmungsmittelpunkt und Brennpunkt, wenn der Strahlen-

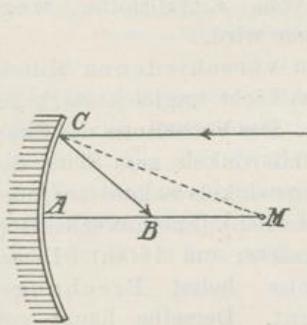


Fig. 60. Reflexion an Hohlspiegeln.

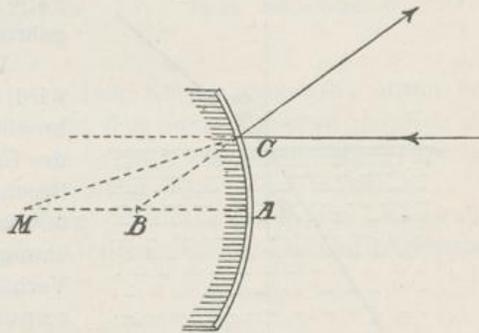


Fig. 61. Reflexion an Konvexspiegeln.

punkt weiter vom Spiegel entfernt ist als der Krümmungsmittelpunkt; umgekehrt liegt der Bildpunkt vom Krümmungsmittelpunkt gerechnet nach aussen, wenn der Strahlenpunkt zwischen Krümmungsmittelpunkt und Brennpunkt liegt; liegt endlich der Strahlenpunkt zwischen Brennpunkt und Spiegelfläche, so entsteht hinter der letzteren ein virtueller Bildpunkt, von dem aus die reflektirten Strahlen auseinandergehen. — Die Bilder von Gegenständen sind theils reell und dann umgekehrt und vergrössert oder verkleinert, theils virtuell, aufrecht und vergrössert.

Bei dem kugelförmigen Konvexspiegel (Fig. 61) ist der Brennpunkt ( $B$ ) virtuell und liegt hinter dem Spiegel. Der Bildpunkt jedes Strahlenpunktes ist virtuell und liegt zwischen Spiegelfläche und Brennpunkt. — Die Bilder von Gegenständen sind virtuell, aufrecht und verkleinert.

**Brechung oder Refraktion des Lichtes (Dioptrik).** Wenn ein Lichtstrahl aus einem in ein anderes, Licht durchlassendes Mittel,

z. B. aus Luft in Wasser oder Glas, eintritt (Fig. 62), so wird er aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt oder gebrochen; nur senkrecht zur Grenzfläche zwischen beiden Mitteln verlaufende Strahlen werden nicht gebrochen. Die Winkel, welche der Lichtstrahl mit dem Einfallslot bildet, heissen Einfallswinkel ( $\alpha$ ) und Brechungswinkel ( $\beta$ ). In den genannten Beispielen (Luft — Wasser, Luft — Glas) ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel.

Die Lehre von der Brechung oder Refraktion des Lichtes heisst Dioptrik.

Allgemein gilt, dass der Lichtstrahl, wenn er aus einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Mittel übergeht, dem Einfallslothe zugebrochen, im umgekehrten Falle vom Einfallslothe weggebrochen wird.

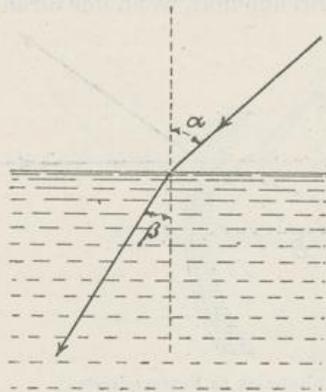


Fig. 62. Brechung des Lichtes.

Von verschiedenen Mitteln wird das Licht ungleich stark gebrochen. Das Verhältniss des Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels ist konstant (oder unabänderlich). (Snellius'sches Brechungsgesetz; um 1600.) Dieses Verhältniss heisst Brechungsexponent. Derselbe hängt von der Natur des brechenden Mittels ab, insbesondere von dessen spezifischem Gewicht; ferner von

der Temperatur. Er ist für (Luft und) Wasser  $= \frac{4}{3}$ , für (Luft und) Glas  $= \frac{3}{2}$ .

In Folge der Lichtbrechung erscheinen unter Wasser befindliche Gegenstände gehoben, wie Fig. 63 veranschaulicht, wo die von  $A$  und  $B$  kommenden Lichtstrahlen  $AC$  und  $BD$  bei ihrem Austritt aus dem Wasser derartig gebrochen werden, dass sie die Richtungen  $CO$  und  $DO$  einschlagen; befindet sich nun in  $O$  das Auge eines Beobachters, so versetzt es den Gegenstand in Richtung der geraden Linien  $OCA'$  und  $ODB'$  nach  $A'B'$ .

Wenn ein Lichtstrahl aus einem optisch dichteren Mittel an die Grenze eines optisch dünneren Mittels herantritt, so wird er nur dann in letzteres eintreten können, wenn der Einfallswinkel sich noch so weit von  $90^\circ$  unterscheidet, dass der Brechungswinkel nicht  $90^\circ$  oder mehr beträgt. Ist der Einfallswinkel so gross — d. h. fällt der Lichtstrahl so schräg oder flach auf die Grenzfläche beider Mittel —, dass der Brechungswinkel über  $90^\circ$  beträgt, so wird der Lichtstrahl nicht in das dünnere Mittel hineingebrochen, sondern wieder in das

lichtere Mittel reflektirt — totale Reflexion. Die totale Reflexion hat ihren Namen daher, weil sie vollkommener ist als jede Reflexion an Spiegelflächen. Sie lässt sich z. B. beobachten, wenn man von unten her schräg gegen die Oberfläche des Wassers in einem Glase blickt. (Siehe Fig. 64.)

Wenn Licht durch planparallele Platten, d. h. durch einen von zwei parallelen Ebenen begrenzten Körper, hindurchtritt, so

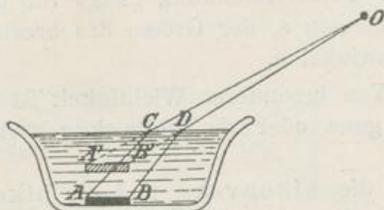


Fig. 63. Scheinbare Ortsveränderung unter Wasser befindlicher Gegenstände.

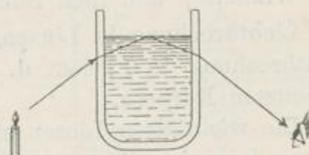


Fig. 64. Totale Reflexion.

ist, wenn sich vor und hinter dem Körper dasselbe Mittel befindet, der austretende Lichtstrahl dem ursprünglichen parallel; da nämlich (Fig. 65) Winkel  $\beta = \gamma$  ist, so muss auch wegen der an beiden Ebenen gleichartigen Brechung Winkel  $\alpha = \delta$  sein.

Eine bleibende Ablenkung erleidet dagegen ein Lichtstrahl, der durch ein von zwei nicht parallelen ebenen Flächen begrenztes

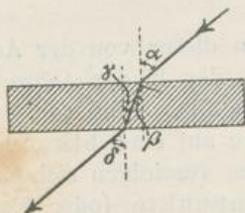


Fig. 65. Lichtbrechung in planparallelen Platten.

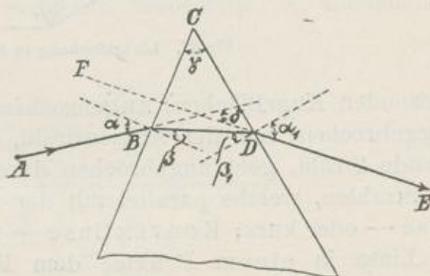


Fig. 66. Lichtbrechung in Prismen.

Mittel — ein Prisma — hindurchtritt. (Fig. 66.) Die Durchschnittskante (C) der lichtbrechenden Flächen heisst die brechende Kante, der Neigungswinkel der Flächen ( $\gamma$ ) heisst der brechende Winkel des Prismas. Der von dem Strahlenpunkte A kommende Lichtstrahl AB verläuft in der Richtung BD durch das Prisma und gelangt auf dem Wege DE in ein bei E befindliches Auge. Das Auge sieht den Strahlenpunkt in der Richtung EDF, also nach der brechenden Kante hin verschoben. Ist  $n$  der Brechungs-

exponent des Stoffes, aus dem das Prisma besteht, so ist  $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ . Die gesammte Ablenkung des Lichtstrahls wird durch den Winkel  $\delta$  angegeben, den die Richtungen des Lichtstrahls vor dem Eintritt in das Prisma und nach dem Austritt aus demselben mit einander bilden. Die Grösse dieser Ablenkung hängt von drei Grössen ab: dem Brechungsexponenten  $n$ , der Grösse des brechenden Winkels  $\gamma$  und dem Einfallswinkel  $\alpha$ .

**Lichtbrechung in Linsen.** Von besonderer Wichtigkeit ist die Lichtbrechung in Linsen, d. h. ganz oder theilweise kugelförmig begrenzten Körpern.

Die wichtigsten Linsen sind die bikonvexe und die bikonkave; jene ist eine Sammel-, diese eine Zerstreulinse; von jenen werden die Lichtstrahlen der Achse (der Verbindungslinie der Krümmungsmittelpunkte der beiden die Linse be-

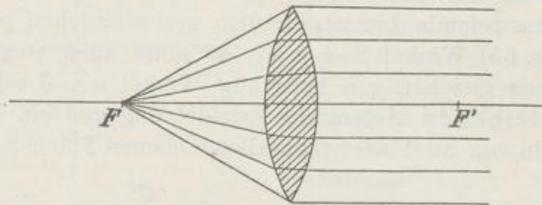


Fig. 67. Lichtbrechung in Konvexlinsen.

grenzenden Kugelflächen) zugebrochen, von diesen von der Achse weggebrochen; nur der Achsenstrahl, d. h. der in der Achse einfallende Strahl, geht ungebrochen durch die Linse hindurch.

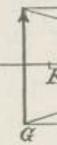
Strahlen, welche parallel mit der Achse auf eine bikonvexe Linse — oder kurz: Konvexlinse — fallen, vereinigen sich hinter der Linse in einem Punkte, dem Brennpunkte (oder Focus, Fig. 67,  $F'$ ). Derselbe liegt in der Achse; seine Entfernung von der brechenden Fläche der Linse — bzw., wenn die Linse dünn genug ist, von dem Mittelpunkt derselben: dem optischen Mittelpunkt — heisst die Brennweite.

Ein Lichtstrahl, welcher durch den optischen Mittelpunkt geht, erleidet an beiden Flächen der Linse gleiche und entgegengesetzte Brechungen; es wird daher seine Richtung, wenn die Dicke der Linse als verschwindend klein betrachtet wird, durch die Brechung nicht geändert.

Mit Hilfe von der Achse parallelen und durch den optischen Mittelpunkt gehenden Strahlen kann man, wenn die Brennweite der

Linse  
erzet

Linse  
ande  
Bild



Durch  
Mit

weit  
Geg  
aber  
so is  
die

Fig.

Bild  
eins  
(G  
in v  
ein

eine  
man

Linse bekannt ist, die Bilder von Gegenständen, welche die Linse erzeugt, konstruieren, wie Fig. 68 und 69 zeigen.

Ist die Entfernung des Gegenstandes ( $G$  in Fig. 68) von der Linse grösser als die doppelte Brennweite, so entsteht auf der andern Seite von der Linse ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild ( $B$ , Fig. 68); ist die Entfernung gleich der doppelten Brenn-

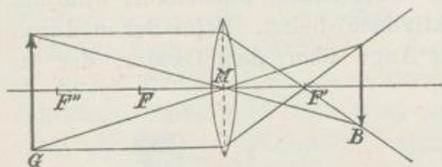


Fig. 68.

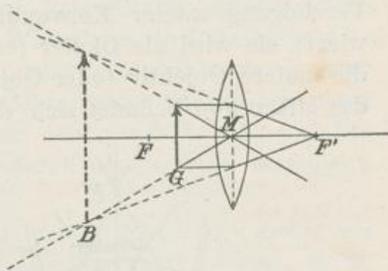


Fig. 69.

Durch Konvexlinsen erzeugte Bilder von Gegenständen. ( $G$  = Gegenstand;  $B$  = Bild;  $M$  = optischer Mittelpunkt;  $F$  und  $F'$  = Brennpunkte;  $MF = MF'$  = einfache,  $MF'' = MF'$  = doppelte Brennweite.)

weite, so ist das Bild reell, umgekehrt und eben so gross wie der Gegenstand; ist die Entfernung kleiner als die doppelte Brennweite, aber noch grösser als die einfache Brennweite ( $B$  in Fig. 68), so ist das Bild reell, umgekehrt und vergrössert ( $G$ , Fig. 68); ist die Entfernung gleich der einfachen Brennweite, so entsteht kein

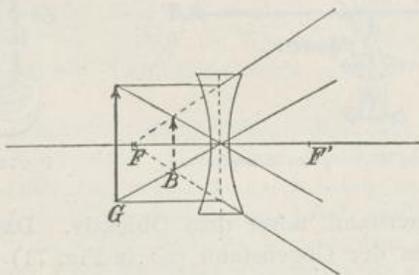
Fig. 70. Durch Konkavlinsen erzeugte Bilder von Gegenständen. ( $G$  = Gegenstand;  $B$  = Bild.)

Bild: die gebrochenen Strahlen verlassen die Linse parallel zu einander; ist die Entfernung kleiner als die einfache Brennweite ( $G$  in Fig. 69), so entsteht auf derselben Seite von der Linse, aber in weiterer Entfernung, als sie der Gegenstand von der Linse besitzt, ein virtuelles, aufrechtes, vergrössertes Bild ( $B$ , Fig. 69).

Auf letzterer Thatsache beruht die Anwendung der Lupe, einer mit einer Einfassung versehenen Konvexlinse, durch welche man innerhalb der Brennweite gelegene Gegenstände betrachtet, die

dann vergrößert erscheinen. Eine Konvexlinse wirkt um so stärker vergrößernd oder verkleinernd, je stärker gewölbt sie ist.

Die Bilder, welche eine bikonkave Linse — oder kurz: Konkavlinse — von Gegenständen liefert, sind, wie Fig. 70 zeigt, virtuell, aufrecht und verkleinert.

**Mikroskop.** Die Einrichtung des Mikroskops beruht auf der Vereinigung zweier Konvexlinsen, von denen die eine als Lupe wirkt; sie wird als Okular (oder Okularlinse) bezeichnet, während die andere Objektiv (oder Objektivlinse) heisst. Beim Sehen durch das Mikroskop befindet sich das Auge über dem Okular, der zu

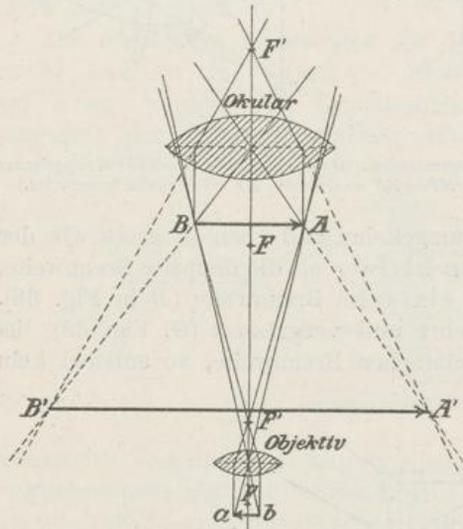


Fig. 71. Vergrößernde Wirkung des Mikroskops.

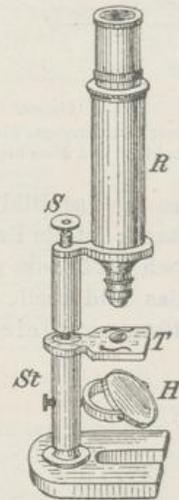


Fig. 72. Mikroskop.

betrachtende Gegenstand unter dem Objektiv. Das Objektiv wird so eingestellt, dass der Gegenstand ( $ab$  in Fig. 71) etwas über den Brennpunkt hinaus (zwischen einfache und doppelte Brennweite) zu liegen kommt; dann entsteht auf der andern Seite vom Objektiv aus (also oberhalb desselben) ein reelles, umgekehrtes, vergrößertes Bild ( $AB$ ) des Gegenstandes. Objektiv und Okular sind nun derart beschaffen und in solcher Entfernung von einander angebracht, dass das genannte Bild innerhalb der Brennweite des Okulars auftritt. Wird dasselbe daher durch das Okular betrachtet, so entsteht von ihm nach dem Objektiv zu ein abermals vergrößertes virtuelles Bild ( $A'B'$ ), das im Verhältniss zum Gegenstande gleichfalls umgekehrt erscheint.

Objektiv und Okular sind durch innen geschwärzte Röhren mit einander verbunden. Die Schwärzung soll die Abhaltung fremder Lichtstrahlen bewirken. Das Hauptrohr (Fig. 72, *R*) lässt sich mittels einer feinen Schraube (*S*) behufs genauer Einstellung des Gegenstandes heben und senken. Unter dem Objektiv befindet sich der zur Aufnahme des Gegenstandes bestimmte, mit einer kreisrunden Oeffnung versehene Objektisch (*T*). Zur Beleuchtung durchsichtiger Gegenstände ist am Ständer (*St*) des Mikroskops ein Hohlspiegel (*H*) derartig angebracht, dass er sich — um zwei rechtwinklig zu einander stehende horizontale Achsen — nach allen Seiten frei drehen lässt; er sammelt die von einem Fenster oder einer Lampe auf ihn fallenden Lichtstrahlen und wirft sie durch die Oeffnung im Objektisch nach dem Gegenstande empor.

Als Okular dient statt einer einfachen Linse gewöhnlich ein System von zwei Linsen, von denen die untere, nach dem Objektiv zu gelegene, die sogenannte Kollektivlinse, die im Objektiv gebrochenen Strahlen konvergenter (stärker zusammenlaufend) macht, das Bild näher bringt und dadurch die Entfernung des Okulars verringert und, wenn auch ein etwas kleineres Bild, so doch ein grösseres Gesichtsfeld schafft.

Das Objektiv besteht stets aus mehreren achromatischen, d. h. ungefärbte Bilder gebenden Doppellinsen. Farbige gesäumte Bilder würden undeutlich sein. — Ueber die Entstehung der Farben siehe später!

Der unter dem Mikroskop zu betrachtende Gegenstand wird, möglichst fein und durchsichtig, auf einen Objektträger von Glas gebracht, mit etwas Wasser befeuchtet und mit einem sehr dünnen Deckgläschen bedeckt. Wird zwischen Deckgläschen und Objektiv ein Wasser- oder Oeltropfen eingeschaltet — ein Verfahren, das man Immersion nennt — so wird die Vergrößerung erheblich gesteigert.

Zur Messung mikroskopischer Objekte bedient man sich entweder eines auf Glas geritzten Mikrometers, das man auf das Okular legen kann; oder es ist am Mikroskop selbst eine feine Mikrometerschraube angebracht, durch die sich der Objektisch seitlich verschieben lässt; behufs Ausführung einer Messung dreht man die Schraube derart, dass erst der eine, dann der andere Rand des Gegenstandes sich mit einem der Fäden eines im Okular angebrachten Fadenzweizes deckt. Dann giebt die am Schraubenkopf abzulesende Verschiebung die Grösse des Gegenstandes an.

Die Leistungsfähigkeit eines Mikroskops wird durch sogenannte Testobjekte (Diatomeen, Nobert'sche Gitter) festgestellt.

Erfunden wurde das Mikroskop um 1600 von Zacharias Jansen in Holland.

**Fernrohr.** Zur deutlichen Sichtbarmachung weit entfernter Gegenstände dienen die Fernrohre. Man unterscheidet zwei Arten derselben: dioptrische Fernrohre (Refraktoren) und katoptrische Fernrohre (Spiegelteleskope, Reflektoren); bei ersteren wird das reelle Bild des entfernten Gegenstandes durch eine Konvexlinse, bei letzteren durch einen Hohlspiegel hervorgebracht; die diop-

trischen Fernrohre theilt man wiederum ein in das astronomische oder Kepler'sche, das terrestrische oder Erdfernrohr und das holländische oder Galilei'sche Fernrohr.

Das astronomische Fernrohr hat Objektiv und Okular wie ein Mikroskop, beide sind Konvexlinsen. Das Objektiv, das eine grosse Brennweite besitzt, erzeugt von dem weit hinter dem Brennpunkt liegenden Gegenstand ein verkleinertes, umgekehrtes Bild, welches durch das Okular zur Vergrösserung und näheren Betrachtung gelangt; das Okular ist — je nach der Entfernung des Gegenstandes — verstellbar. Die Gegenstände erscheinen verkehrt. Im Erdfernrohr werden sie durch eine oder zwei zwischen Objektiv und Okular angebrachte Linsen aufrecht gemacht. Das holländische Fernrohr (Krimstecher, Opernglas) enthält ein bikonvexes Objektiv und ein bikonkaves Okular; letzteres ist innerhalb der Brennweite der Objektivlinse angebracht, fängt die Strahlen, ehe sie zu einem umgekehrten, verkleinerten Bilde gesammelt werden, auf und macht sie divergent und erzeugt so ein aufrechtes, vergrössertes Bild.

**Das Sehen.** Im menschlichen Auge wirken die im vorderen Theile des Augapfels befindliche Krystalllinse, sowie die vor der Regenbogenhaut ausgespannte und nach aussen gewölbte Hornhaut als Sammellinsen und lassen verkleinerte, umgekehrte Bilder der Gegenstände, von denen Lichtstrahlen ins Auge fallen, auf der die hintere innere Wand des Augapfels überziehenden Netzhaut entstehen. Dass wir die Gegenstände trotzdem aufrecht sehen, rührt von dem Sinn der Bewegungen her, die wir machen müssen, um bestimmte Theile eines Gegenstandes zu sehen; dieser Sinn der Bewegungen entspricht der Lage der betreffenden Theile: wollen wir den oberen Theil eines Gegenstandes sehen, so müssen wir das Auge oder den ganzen Kopf nach oben drehen u. s. w.

Damit ein Gegenstand deutlich gesehen werden könne, muss sich derselbe in einer solchen Entfernung vom Auge befinden, dass sein Bild genau auf die Netzhaut fällt (nicht davor noch dahinter). Diese Entfernung heisst die Sehweite und ist für gesunde Augen im Mittel etwa = 24 cm. Augen mit geringerer Sehweite sind kurzsichtig; die lichtbrechenden Mittel solcher Augen bewirken, dass die Bilder der Gegenstände vor die Netzhaut fallen. Augen mit grösserer Sehweite sind weitsichtig; die Bilder fallen hinter die Netzhaut. Gegen jenes Uebel (zu starke Brechung) helfen konkave, gegen dieses (zu schwache Brechung) konvexe Brillengläser.

Das Maass für die scheinbare Grösse eines Gegenstandes liefert der Sehwinkel; derselbe wird von den Linien gebildet, die man vom Auge nach den Endpunkten des Gegenstandes ziehen kann. Zur Beurtheilung der wahren Grösse des Gegenstandes muss ausser dem Sehwinkel noch die Entfernung bekannt sein, welche der Gegenstand vom Auge hat.

**Zerstreuung oder Dispersion des Lichtes.** Beim Durchgange eines Lichtbündels durch ein Prisma findet nicht nur, wie auf S. 99 erörtert wurde, eine Brechung, sondern auch eine Zerstreuung oder Dispersion des Lichtes statt. Lässt man z. B. in ein verfinstertes Zimmer durch einen im Fensterladen angebrachten schmalen Spalt Licht eintreten und fängt es, nachdem es durch ein Glasprisma

hindurchgegangen ist, auf einem weissen Papierschirm auf, so erscheint das Bild des Spaltes einmal gegen die ursprüngliche Richtung der Lichtstrahlen verschoben, sodann aber auch beträchtlich verbreitert. Mit dieser Verbreiterung ist das Auftreten einer Reihe von Farben verbunden, deren Gesamtheit man als Spektrum bezeichnet. Die Hauptfarben unter ihnen sind, von der brechenden Kante des Prismas aus angeführt: roth, orange, gelb, grün, blau, (indigo), violett.

Mit Hilfe einer Sammellinse oder eines in passender Lage aufgestellten zweiten Prismas können die Farben des Spektrums wieder zu weissem Licht vereinigt werden.

Somit ist das weisse Licht als zusammengesetzt zu betrachten. Durch die Brechung im Prisma tritt aus dem Grunde eine Zerlegung in die einzelnen, farbigen Bestandtheile ein, weil dieselben ungleiche Brechbarkeit besitzen. Das rothe Licht ist das am wenigsten brechbare, das violette ist am brechbarsten, grün hat mittlere Brechbarkeit. Je grösser die Brechbarkeit eines Lichtstrahls ist, um so kleiner ist seine Schwingungsdauer, um so grösser also seine Schwingungszahl und um so kleiner seine Wellenlänge.

Die Farben des Spektrums (Spektralfarben) werden auch Regenbogenfarben genannt, weil sie der Regenbogen, der durch Brechung, Reflexion und mit ersterer verbundene Dispersion des Sonnenlichtes in Regentropfen entsteht, gleichfalls aufweist.

**Komplementärfarben; natürliche Farben.** Zur Bildung weissen Lichtes sind nicht alle Farben des Spektrums erforderlich, sondern es genügen je zwei in nachfolgender Uebersicht unter einander stehende:

roth,	orange,	gelb,	grünelb,	grün,
blaugrün,	cyanblau,	indigo,	violett,	(purpur),

worin die Purpurfarbe zwar nicht im Spektrum vorhanden ist, aber durch Mischung von roth und violett (z. B. mittels Prismas) erhalten werden kann.

Je zwei Farben, die zusammen weisses Licht ergeben, heissen komplementär. Sie liegen derartig im Spektrum vertheilt, dass ihre mittlere Schwingungszahl, bezw. Wellenlänge gleich derjenigen des ganzen Spektrums ist; daher ist der Eindruck, den sie zusammen hervorrufen, gleich dem Gesamteindruck des Spektrums, d. h. gleich dem des weissen Lichtes.

Blickt man einige Zeit anhaltend auf einen farbigen Gegenstand und danach schnell auf eine weisse Fläche, so nimmt man darauf ein Nachbild des Gegenstandes wahr, und zwar in der komplementären Farbe desselben.

Die natürlichen Farben der Körper (insbesondere der als Farbstoffe dienenden) kommen dadurch zu Stande, dass die Körper Licht von verschiedener Brechbarkeit einerseits reflektiren und hindurchlassen, andererseits absorbiren (vergl. S. 95), so dass von dem gesammten weissen Licht, das auf die Körper fällt,

ein Theil — mit anderer mittlerer Brechbarkeit, als sie dem weissen Licht zukommt — reflektirt bezw. hindurchgelassen wird. In der Farbe dieses reflektirten bezw. hindurchgelassenen Lichtes wird der Körper von uns geschaut.

Dass Farbstoffe, die komplementär sind, bei ihrer Mischung keine weisse Mischfarbe geben — sondern z. B. gelber und blauer Farbstoff Grün — rührt daher, dass keine natürliche Farbe rein ist; eine gelbe Flüssigkeit lässt daher ausser Gelb auch einen Theil des im Spektrum benachbarten Grün hindurch, und desgleichen eine blaue Flüssigkeit; in einer Mischung beider ist daher Grün die einzige Farbe, die beide durchlassen, während Gelb durch die blaue Flüssigkeit, Blau durch die gelbe absorbiert wird; die Mischung muss daher grün erscheinen.

**Achromatische Linsen.** Verschiedene Stoffe können, trotzdem sie für die mittleren Strahlen des Spektrums nahezu dasselbe Brechungsvermögen besitzen, doch ein sehr ungleiches Farbenzerstreuungsvermögen haben, so dass sie Spektren von sehr verschiedener Länge geben. Hohes Farbenzerstreuungsvermögen besitzen z. B. das (bleihaltige) Flintglas und der Schwefelkohlenstoff.

Wenn zwei Prismen oder Linsen, deren Stoffe bei nahezu gleichem mittlerem Brechungsvermögen ein sehr ungleiches Farbenzerstreuungsvermögen besitzen (z. B. Flintglas und Crownnglas) mit einander vereinigt werden, so lässt es sich erreichen, dass die durchgehenden Strahlen bezw. die erzeugten Bilder keine chromatische Abweichung (farbige Säume) und damit Undeutlichkeit aufweisen. (Vergl. S. 103: achromatische Doppellinsen.)

**Fluorescenz.** Die meisten Körper reflektiren dieselbe Lichtsorte, welche sie hindurchlassen, so dass sie bei auffallendem und durchgehendem Lichte (beim Daraufsehen wie beim Hindurchsehen) gleich gefärbt erscheinen. Ist jenes bei einem Körper nicht der Fall, so nennt man ihn schillernd oder fluorescirend. Eine Lösung von schwefelsaurem Chinin ist, gegen das Licht gehalten, farblos durchsichtig, in auffallendem Lichte erscheint sie blau. Fluorescenz zeigt sich weiter am Steinöl oder Petroleum, an der Curcumatinktur, dem (gelben) Uranglas, gewissen Spielarten des Flussspaths u. s. w.

Von der Fluorescenz zu unterscheiden, wenngleich ihr in gewissem Grade ähnlich, ist die Erscheinung der Phosphorescenz (vgl. S. 94).

**Arten der Spektren; Spektralanalyse.** Werden von dem Lichte verschiedener — himmlischer oder irdischer — Lichtquellen Spektren erzeugt, so stellen sich die folgenden Unterschiede heraus:

1. Feste und flüssige Körper liefern in glühendem Zustande ein kontinuierliches (oder zusammenhängendes) Spektrum, das keinerlei Unterbrechung durch dunkle Linien zeigt.
2. Das Sonnenspektrum ist zwar auch ein kontinuierliches, aber von zahlreichen dünnen, dunklen Linien — den Fraunhofer'schen Linien — der Quere nach durchzogen.
3. Das Spektrum glühender Gase oder Dämpfe besteht aus farbigen hellen

Linien oder Streifen, die durch dunkle Zwischenräume von einander getrennt sind (Linien- und Bandenspektren).

Lässt man

4. das Licht eines glühenden festen Körpers (z. B. eines weissglühenden Platindrahtes) durch einen beliebigen Körper hindurchgehen, ehe es in ein Prisma eintritt, um so ein Spektrum zu liefern, so erhält man ein verschieden geartetes Absorptionsspektrum, das bei glühenden Gasen und Dämpfen an denselben Stellen dunkle Linien und Streifen zeigt, wo das unter 3. genannte Emissionsspektrum helle farbige Linien und Streifen aufweist.

Aus dem Letztgesagten ergibt sich der Kirchhoff'sche Satz (1860), dass ein glühendes Gas (oder Dampf) die Lichtstrahlen absorbiert, die es selber ausstrahlt. (Gleichheit des Emissions- und Absorptionsvermögens für Strahlen derselben Gattung.)

Hieraus ist zu folgern, dass die Fraunhofer'schen Linien des Sonnenspektrums auf die Weise zu Stande kommen, dass das von dem festen oder flüssigen, leuchtenden Sonnenkern ausgehende Licht durch eine aus verschiedenen Gasarten zusammengesetzte Dampfatmosphäre hindurch muss, welche den Sonnenkern einhüllt.

Die unter 3. genannte Thatsache wird zur Feststellung der Natur eines Stoffes benutzt: Spektralanalyse. Es geben nämlich selbst Spuren eines Salzes, durch welches eine Flamme gefärbt ist, ein genaues Linienspektrum des Dampfes des in ihnen enthaltenen Metalls, so dass an diesem Spektrum das betreffende Metall erkennbar ist.

**Unsichtbare Strahlen des Spektrums.** Ausser den sichtbaren Strahlen des Spektrums giebt es noch andere, die sich theils durch eine erwärmende, theils durch eine chemische Wirkung bemerkbar machen. Sie liegen ausserhalb des sichtbaren Spektrums, und zwar die sogenannten dunklen Wärmestrahlen jenseits des rothen Endes, die chemischen Strahlen jenseits des violetten Endes. Die letzteren bewirken z. B. die im Lichte erfolgende Vereinigung von Chlor und Wasserstoff zu Chlorwasserstoff sowie die chemische Zerlegung von Chlor-, Brom- und Jodsilber unter Ausscheidung metallischen Silbers. Diese Zerlegung findet Anwendung in der Photographie.

**Interferenz des Lichtes; Beugung oder Diffraktion.** Interferenz des Lichtes entsteht (vergl. S. 87), wenn die Strahlen zweier benachbarter Lichtquellen zusammentreffen. Geschieht die Begegnung in einem Punkte, dessen Entfernungen von den beiden Lichtquellen (Strahlenpunkten) sich um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge, oder anders gesprochen: um ein gerades Vielfaches einer halben Wellenlänge unterscheiden, so tritt eine Verstärkung des Lichtes ein; geschieht die Begegnung in einem Punkte, dessen Entfernungen von den beiden Lichtquellen sich um ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge unterscheiden, so tritt eine

Auslöschung des Lichtes ein. Es entsteht dadurch auf einem das Licht auffangenden Schirm ein System paralleler, abwechselnd heller und dunkler Streifen: Interferenzfransen. (Entdeckt wurde die Interferenz des Lichtes durch Thomas Young, 1800).

Besitzen die Lichtquellen einfarbiges (oder homogenes), d. h. solches Licht, das bei dem Durchtritt durch ein Prisma sich nicht weiter zerlegen lässt, sondern ungeändert bleibt, so ist ausser dem Unterschied von Hell und Dunkel kein weiterer zu bemerken; dagegen erscheinen Interferenzfransen, die durch weisses, also zusammengesetztes Licht hervorgerufen werden, nicht allein hell und dunkel, sondern sie sind — ausgenommen der mittelste helle Streifen — farbig gesäumt (ausser roth, innen violett), was sich aus der Verschiedenheit der Wellenlängen der verschiedenen Spektralfarben erklärt.

Geht Licht durch einen schmalen Spalt, so breiten sich die Aetherwellen seitlich aus und veranlassen das Auftreten zweier neuer, Licht aussendender Mittelpunkte an den Seiten des Spaltes (vgl. S. 88). Zwischen den beiden von ihnen ausgehenden Wellensystemen findet Interferenz statt, so dass das auf einem Schirm aufgefangene Bild des Spaltes nicht nur verbreitert erscheint, sondern zugleich von Interferenzfransen durchsetzt ist. Diese Erscheinung heisst Beugung oder Diffraktion des Lichtes. (Grimaldi, 1663.)

Eine kreisförmige Oeffnung ruft Interferenzringe hervor.

Auf Beugung beruhen z. B. die farbigen Erscheinungen, die man beim Betrachten einer Flamme durch die Fahne einer Vogelfeder oder durch eine behauchte Glasscheibe wahrnimmt. (Gitterspektren — Nobert'sche Gitter, vgl. S. 103.)

Die Farben dünner Blättchen (Seifenblasen, auf Wasser ausgebreitetes Terpentinöl, Petroleum u. s. w.) sind gleichfalls auf Interferenz zurückzuführen, welche durch die doppelte Reflexion des Lichtes von der oberen und der unteren Begrenzungsfläche der Blättchen hervorgerufen wird.

**Polarisation des Lichtes.** Wenn man auf einen Spiegel von schwarzem Glase (Fig. 73,  $S_1$ ) einen Lichtstrahl ( $AB$ ) unter einem Einfallswinkel von  $55^\circ$  ( $ABE$ ) fallen lässt, so hat der reflektirte Strahl ( $BC$ ) andere Eigenschaften als der einfallende sowie jeder gewöhnliche Lichtstrahl. Fängt man ihn nämlich auf einem zweiten Spiegel ( $S_2$ ) auf, so wird er von diesem nicht in allen Lagen des Spiegels weiter reflektirt. Sind beide Spiegel einander parallel, wie in der Figur, so erfolgt Reflexion (in der Richtung  $CD$ ); wird der Spiegel  $S_2$  aber um die Richtung des Strahls  $BC$  als Achse gedreht, so dass der Einfallswinkel ( $BCF$ ) stets derselbe bleibt, so unterbleibt die Reflexion, wenn der Spiegel  $S_2$  um  $90^\circ$  gedreht worden ist; bei  $180^\circ$  Drehung ist wieder Reflexion vorhanden; bei  $270^\circ$  Drehung ist sie wieder aufgehoben.

Diesen Sachverhalt erkennt man, wenn man in der Richtung  $DC$  auf den Spiegel  $S_2$  blickt, während auf  $S_1$  in der Richtung  $AB$  ein Lichtschein fällt; bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  Drehung erscheint dann

der Spiegel  $S_2$  dunkel; bei langsamem Drehen tritt die Verdunklung allmählich ein.

Man nennt einen Lichtstrahl von der geschilderten Beschaffenheit des reflektirten Strahls  $BC$  polarisirt, die geschilderte Erscheinung die Polarisation des Lichtes. (Malus, 1808.)

Dieselbe findet in folgender Annahme ihre Erklärung: Die Aetherschwingungen, welche das gewöhnliche Licht ausmachen, erfolgen — transversal (vgl. S. 87) — nach allen Richtungen, während im polarisirten Lichtstrahl die Aethertheilchen — gleichfalls transversal — nur in einer (den Lichtstrahl enthaltenden) Ebene schwingen.<sup>1)</sup> Wir nehmen ferner an, dass diese Ebene die von dem polarisirten und dem ihn erzeugenden Lichtstrahl gebildete,

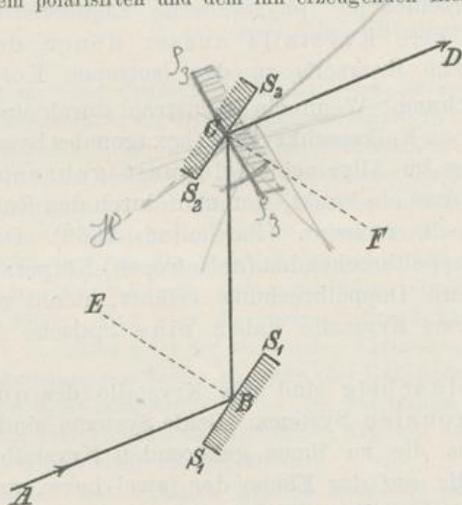


Fig. 73. Polarisation eines Lichtstrahls.

sogenannte Polarisationsebene ist (innerhalb welcher der Strahl weiter reflektirt zu werden vermag). Wenn nun der Spiegel  $S_2$  (Fig. 73) um  $90^\circ$  gedreht ist, so steht die Reflexionsebene  $BCF$  zur Polarisationsebene  $(ABC)$  senkrecht. Da die Aethertheilchen des Strahls  $BC$  nur in dieser schwingen, in jener es nicht können, so kann der Strahl  $BC$  auch nicht in jener Ebene  $(BCF)$  reflektirt werden — er wird ausgelöscht.

Eine Polarisation erfolgt bei der Reflexion an Glas auch unter anderen Winkeln als dem angegebenen (von  $55^\circ$ ), aber nur unvollständig, d. h. es tritt bei Drehung des Spiegels  $S_2$  um  $90^\circ$

<sup>1)</sup> Bei der Annahme, dass das Licht in longitudinalen Aetherschwingungen bestehe, würden die Polarisationerscheinungen vollkommen unerklärlich sein. Ein Lichtstrahl müsste sich dann nach jeder Richtung hin gleich verhalten. Die Thatsache der Polarisation zwingt also zu der Annahme, dass das Licht transversal schwingt.

$$\neq \text{BGF} = \neq \text{HGB}$$

*(Stellung  $S_3$ )*

nur eine Verminderung der Helligkeit, keine völlige Verdunkelung ein. Bei einer Reflexion unter einem Winkel von  $90^\circ$  erfolgt keine Polarisation. Der Winkel der vollständigen Polarisation oder Polarisationswinkel ist bei verschiedenen Stoffen verschieden.

Wie durch Reflexion, so lässt sich auch durch Brechung polarisirtes Licht gewinnen, und zwar theilweise polarisirtes durch Brechung in isotropen Körpern, d. h. Körpern, die nach allen Richtungen hin dieselben physikalischen Eigenschaften besitzen; vollständig polarisirtes Licht wird durch Brechung in anisotropen Körpern erhalten, d. h. in solchen Körpern, die in verschiedenen Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften aufweisen. Anisotrop sind alle Krystalle ausser denen des regulären Systems, welche ihrerseits zu den isotropen Körpern gehören.

**Doppelbrechung.** Wenn ein Lichtstrahl durch einen anisotropen Körper, z. B. einen Kalkspathkrystall (hexagonales System), hindurchgeht, so wird er im Allgemeinen doppelt gebrochen, was man daran erkennt, dass ein Punkt, den man durch den Kalkspathkrystall betrachtet, doppelt erscheint. (Bartholinus, 1669). Diejenigen Richtungen eines doppelbrechenden (anisotropen) Körpers, in denen der Lichtstrahl keine Doppelbrechung erfährt, nennt man optische Achsen. Gewisse Krystalle haben eine optische Achse, andere haben zwei.

Optisch einachsig sind alle Krystalle des quadratischen und des hexagonalen Systems. Beide Systeme sind dadurch ausgezeichnet, dass die zu ihnen gehörenden Krystalle eine Hauptachse haben, die auf der Ebene der (zwei bzw. drei) gleichen und mit einander gleiche Winkel bildenden Nebenachsen senkrecht steht; mit dieser Hauptachse fällt die optische Achse zusammen.

Optisch zweiachsige Krystalle sind alle diejenigen, deren drei krystallographische Achsen verschiedene Länge besitzen, nämlich die Krystalle des rhombischen, des monoklinen und des triklinen Systems; und hier fällt mit keiner der krystallographischen Achsen eine optische Achse zusammen.

Die beiden Strahlen, in welche ein Lichtstrahl beim Durchtritt durch einen Krystall in Folge von Doppelbrechung zerlegt wird, sind stets vollständig polarisirt. Dies erkennt man daran, dass jeder der Strahlen, wenn er in ein zweites doppelbrechendes Mittel eintritt, nicht immer eine abermalige Doppelbrechung erfährt. Folgender Versuch macht dies und die Art der Polarisirung klar:

Man legt ein Kalkspath-Rhomboëder auf ein Blatt Papier, auf welchem ein schwarzer Punkt gezeichnet ist. Dreht man den Krystall, so bleibt von den

zwei  
das  
sprich  
das z  
Strahl

zweite  
stall  
vor, s  
Kryst  
selnd  
d. h.  
l. zu  
ein

der E  
rech  
zusam  
Zerle  
orden  
schne  
Kryst  
wiede  
einan  
— da  
senk  
Stral  
recht

Licht  
optis  
ist.  
wert  
und  
hin  
schl  
zerle

orde  
optis  
Bred  
optis  
sche  
Kall  
sch  
den

zwei Bildern des Punktes, welche man durch ihn sieht, eins stehen, während das andere sich um jenes herumbewegt. Den Strahl, dem das erste Bild entspricht, nennt man den ordentlichen (oder ordinären), denjenigen, dem das zweite Bild entspricht, den ausserordentlichen (oder extraordinären) Strahl.

Man legt nun auf den auf dem Papier befindlichen Krystall noch einen zweiten Krystall; derselbe nimmt mit jedem der beiden durch den ersten Krystall erzeugten Bilder im allgemeinen abermals eine Zerlegung in zwei Bilder vor, so dass jetzt im ganzen vier Bilder zu sehen sind. Wird aber der obere Krystall gedreht, während man den unteren festhält, so verschwinden abwechselnd zwei von den vier Bildern, so oft die Hauptschnitte beider Krystalle, d. h. die Hauptachse enthaltenden oder ihr parallel liegenden Ebenen, 1. zusammenfallen oder 2. rechtwinklige Stellung zu einander einnehmen.

Der Grund für diese Erscheinung ist der, dass der ordentliche Strahl in der Ebene des Hauptschnitts, der ausserordentliche Strahl in einer darauf senkrechten Ebene polarisirt ist. Fallen nun die Hauptschnitte der beiden Krystalle zusammen, so wird der ordentliche Strahl des unteren Krystalls, ohne weitere Zerlegung zu erfahren, als ordentlicher, der ausserordentliche Strahl als ausserordentlicher im oberen Krystall fortgepflanzt: zwei Bilder. Stehen die Hauptschnitte rechtwinklig zu einander, so wird der ordentliche Strahl des unteren Krystalls im oberen Krystall zum ausserordentlichen Strahl und umgekehrt: wiederum zwei Bilder. Sind aber die Hauptschnitte schiefwinklig gegen einander geneigt, so erfährt jeder der den unteren Krystall verlassenden Strahlen — da die Polarisations Ebenen beider Krystalle (der Hauptschnitt und die darauf senkrechte Ebene) nicht zusammenfallen — eine abermalige Zerlegung in zwei Strahlen, die nach dem Hauptschnitt des oberen Krystalls und der darauf senkrechten Ebene polarisirt sind: vier Bilder.

Dass in einem nicht regulären Krystall überhaupt eine Zerlegung eines Lichtstrahls in zwei, also eine Doppelbrechung stattfindet, liegt daran, dass die optische Dichte eines solchen Krystalls in verschiedenen Richtungen verschieden ist. In einer Achsenebene (sowie jeder dazu parallelen Ebene), welche nur gleichwerthige (in erster Linie: gleich lange) Achsen enthält, ist — bei regulären und optisch einachsigen Krystallen — die optische Dichte nach allen Richtungen hin die gleiche, und ein Lichtstrahl, der senkrecht zu ihr verläuft, dessen Aetherschwingungen also in irgend einer Richtung in sie hinein erfolgen, geht unzerlegt oder einfach weiter.

Nach dem Gesagten ist die Brechung für den ordentlichen und den ausserordentlichen Strahl eine verschiedenartige; für jenen erfolgt sie bei den optisch einachsigen Krystallen nach dem auf S. 98 angeführten Snellius'schen Brechungsgesetz, für diesen nach einem weniger einfachen Gesetz; bei den optisch zweiachsigen Krystallen befolgt keiner der beiden Strahlen das Snellius'sche Brechungsgesetz. Die Brechung des ausserordentlichen Strahls ist — beim Kalkspath wie bei einer Reihe anderer optisch einachsiger Krystalle — eine schwächere als die des ordentlichen Strahls; man nennt die Krystalle, bei denen dies der Fall ist, negativ. Dagegen heissen diejenigen optisch einachsigen

Krystalle positiv, bei denen der ausserordentliche Strahl stärker gebrochen wird als der ordentliche (Beispiel: Bergkrystall).

**Polarisations-Apparate.** Um die Eigenschaften des polarisirten Lichtes genauer zu studiren, bedient man sich der Polarisationsapparate. Dieselben sind aus zwei Haupttheilen zusammengesetzt: der polarisirenden und der analysirenden Vorrichtung; durch jene wird der polarisirte Lichtstrahl hervorgebracht, mittels dieser wird seine nähere Beschaffenheit festgestellt.

Da das Vorhandensein zweier polarisirter Strahlen Verwirrung anrichten würde, so muss, wenn die Polarisation durch Brechung bewirkt wird, einer der Strahlen beseitigt werden.

Dies geschieht z. B. durch Anwendung zweier, der Säulenachse parallel geschnittener Turmalin-Platten, die gegeneinander drehbar sind (Turmalinzange); der Turmalin absorbiert den ordentlichen Strahl fast vollständig, so dass nur der ausserordentliche Strahl hindurchgelassen wird. Hält man nun zwei gleichgeschnittene Turmalin-Platten über oder vor einander und dreht sie so lange, bis die Richtungen der Säulenachsen rechtwinklig zu einander stehen, so geht gar kein Licht hindurch: die Turmalin-Platten erscheinen schwarz.

Auf andere Weise wird der ordentliche Strahl im Nicol'schen Prisma (1828) beseitigt. Ein länglicher Kalkspathkrystall (Fig. 74), dessen Endflächen so zugeschliffen werden, dass sie mit den Seitenflächen Winkel von  $68^{\circ}$  bilden, wird rechtwinklig zu den

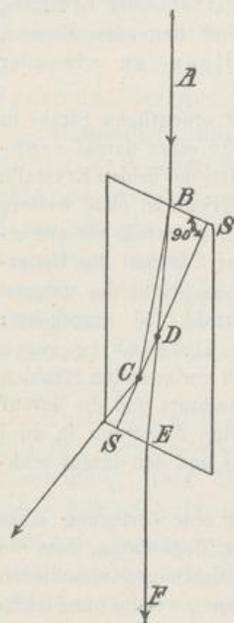


Fig. 74. Nicol'sches Prisma.

neuen Endflächen (in der Richtung *SS*) durchschnitten, und die beiden Stücke des Krystalls werden längs der Schnittflächen durch eine Schicht von Kanadabalsam wieder zusammengekittet. Trifft nun ein Lichtstrahl (*AB*) parallel der Längsrichtung des so entstandenen vierseitigen Prismas auf eine der Endflächen, so wird er durch Doppelbrechung in den ordentlichen Strahl *BC* und den ausserordentlichen Strahl *BD* zerlegt. In Folge der eigenartigen Wahl der Schnittfläche (*SS*) wird der erstere (*BC*) von der Balsamschicht total reflektirt und tritt aus dem Krystall bzw. Prisma seitlich aus, während der ausserordentliche Strahl (*BD*), der senkrecht zum Hauptschnitt polarisirt ist, durch die Balsamschicht hindurchgeht

und in der Richtung  $EF$ , parallel zu  $AB$ , austritt. Der letztere Strahl wird als polarisirtes Licht benutzt.

Durch Verbindung zweier Nicol'scher Prismen (zweier „Nicol's“) erhält man einen Polarisationsapparat, der ähnlich einer Turmalinzange wirkt. Hat der zweite Nicol dieselbe Richtung wie der erste, so durchdringt das aus dem ersten kommende Licht den zweiten, und der letztere erscheint hell; wird aber der zweite Nicol um  $90^\circ$  gedreht, so dass die Hauptschnitte beider rechtwinklig zu einander stehen, so geht das Licht durch den zweiten Nicol nicht hindurch, und der letztere erscheint dunkel.

Der erste — vordere — Nicol heisst der Polarisator, der zweite — hintere — der Analysator.

**Polarisations-Erscheinungen.** Bringt man eine sehr dünne Platte eines optisch einachsigen oder auch zweiachsigen Krystalls, welche so geschnitten oder gespalten ist, dass die optische Achse, bezw. die beiden optischen Achsen in der Schnittebene liegen, zwischen Polarisator und Analysator eines Polarisationsapparats, so dass also polarisirtes Licht (vom Polarisator erzeugt) durch die Krystallplatte hindurchgeht und danach durch den Analysator betrachtet wird, so erscheint die Krystallplatte im Allgemeinen gefärbt. Die Farbe hängt von der Dicke der Platte ab und ändert sich, je nachdem die Krystallplatte selbst oder der Analysator gedreht wird. — Besonders geeignet zu dem genannten Versuche ist der Gips.

Wendet man eine keilförmig geschnittene Gipsplatte an, so treten parallele Streifen auf, die verschieden gefärbt sind — nach der Art der Farben dünner Blättchen (S. 108). Dieser Umstand deutet darauf hin, dass die Erscheinung auf Interferenz zurückzuführen ist, welche sich zwischen zwei Strahlen einstellt, in die der polarisirte Lichtstrahl beim Eintritt in den Krystall zerlegt wird. Ist das Licht, welches durch den Gipskeil geht, nicht das gewöhnliche weisse, sondern einfarbiges Licht, so zeigen die parallelen Streifen nur einen Unterschied zwischen hell und dunkel.

Wird aus einem optisch einachsigen Krystall, z. B. Kalkspath, eine Platte senkrecht zur optischen Achse (die zugleich krystallographische Hauptachse ist) geschnitten, so gehen parallel zu dieser Achse verlaufende Lichtstrahlen durch die Platte im Allgemeinen wie durch ein unkrystallisirtes (isotropes) Mittel hindurch.

Konvergent gemachte polarisirte Lichtstrahlen (z. B. solche, die durch eine Sammellinse hindurchgegangen sind) verhalten sich anders: sie erzeugen in der durch ein analysirendes Nicol'sches Prisma betrachteten Krystallplatte ein System concentrischer Farbenringe, welche von einem hellen oder schwarzen Kreuz durchschnitten sind; von jenem, wenn die Polarisations Ebenen von Polarisator und Analysator zusammenfallen, von diesem, wenn beide sich rechtwinklig schneiden. Dieses Kreuz entspricht den — in der Mitte des Lichtbündels — parallel verlaufenden Strahlen. Die Farbenringe entstehen durch Interferenz.

Wird der Analysator um  $90^\circ$  gedreht, so geht jede Farbe in ihre Komplementärfarbe über, und das Kreuz erscheint statt hell dunkel oder umgekehrt.

Bei Anwendung einfarbigen Lichtes fehlen die Farben, in dem Ringsystem nebst Kreuz treten bloss Unterschiede von hell und dunkel auf.

Optisch zweiachsige Krystalle liefern, senkrecht zur Halbirungslinie des von den optischen Achsen gebildeten Winkels zurechtgeschnitten, ein doppeltes, den beiden optischen Achsen entsprechendes Ringsystem.

**Drehung der Polarisations-Ebene.** Eine besondere Erscheinung beobachtet man am Bergkrystall, wenn man aus demselben eine Platte senkrecht zur optischen Achse geschnitten hat und durch dieselbe, nachdem man sie zwischen Polarisator und Analysator eines Polarisationsapparats gebracht hat, entweder parallele oder konvergente Lichtstrahlen hindurchgehen lässt.

Nehmen wir den Fall des konvergenten Lichtes. Die Polarisations-ebenen von Polarisator und Analysator seien vor der Benutzung der Krystallplatte rechtwinklig gekreuzt. Dann erscheint die Mitte des Gesichtsfeldes, das sonst eine ähnliche Farbenercheinung nebst schwarzem Kreuz wie beim Kalkspath darbietet, nicht völlig dunkel, sondern farbig.

Bei Anwendung einfarbigen Lichtes erscheint die Mitte des Gesichtsfeldes gleichfalls nicht völlig dunkel, sondern erst dann tritt gänzliche Auslöschung des Lichtes ein, wenn der Analysator um eine gewisse Winkelgrösse — nach rechts oder nach links — gedreht wird. Da nun erst die Polarisations-ebenen von Polarisator und Analysator rechtwinklig gekreuzt sind, so waren sie es vor der Drehung nicht. Sie waren es aber ursprünglich, ehe die Krystallplatte sich zwischen beiden Nicols befand. Demnach ist die Polarisations-ebene des vom Polarisator kommenden polarisirten Lichtes beim Durchgange desselben durch die Krystallplatte in ihrer Richtung verändert, aus ihrer ursprünglichen Richtung herausgedreht worden, oder kurz: der Bergkrystall hat die Polarisations-ebene gedreht. Manche Bergkrystall-Sorten drehen die Polarisations-ebenen nach rechts, manche nach links.

Die rechtsdrehenden erfordern bei Anwendung weissen Lichtes, dass der Analysator nach rechts — wie der Zeiger der Uhr — gedreht werde, wenn die farbige Mitte des Gesichtsfeldes aus Roth in Gelb, Gelb in Grün, Grün in Blau und Blau in Violett sich verändern soll; die linksdrehenden erfordern für den gleichen Zweck die entgegengesetzte Drehung.

Wie der Bergkrystall verhalten sich auch die Lösungen der weinsauren und traubensauren Salze. Die Weinsäure und ihre Salze sind rechtsdrehend, die Traubensäure und ihre Salze linksdrehend. Durch Zusammenkrystallisiren der Salze beider Säuren erhält man neutraltraubensaure Salze, deren Lösungen die Polarisations-ebene nicht drehen. Ihre Krystalle haben keine hemiädrische Beschaffenheit, während das bei den weinsauren und traubensauren Salzen und ebenso

bei  
und  
oder  
verha  
mory  
Ersch  
Anna  
asym  
Gesta  
befin

der  
links

der  
Kry

Dab  
cen  
Bes  
find

(Fig

dur  
gel  
und  
wir  
zwe  
ein  
arti  
Aus  
lich  
ver  
Qu

bei den verschiedenen Bergkrystall-Sorten der Fall ist. Die Hemiëdrie bei rechts- und linksdrehenden Krystallen (gleicher Zusammensetzung) ist eine unsymmetrische oder asymmetrische, d. h. ein rechtsdrehender und ein linksdrehender Krystall verhalten sich zu einander wie ein Gegenstand und sein Spiegelbild (enantiomorphe Formen). van't Hoff und Le Bel erklärten dementsprechend die Erscheinung des Rechts- und Linksdrehens der Polarisationssebene durch die Annahme, dass die betreffenden chemischen Verbindungen zwei oder mehrere asymmetrische Kohlenstoffatome enthalten, d. h. Kohlenstoffatome von der Gestalt eines Tetraëders, an dessen vier Ecken vier verschiedene Radikale sich befinden, in welchem Falle es keine Symmetrieebene giebt. (1874.)

Die Polarisationssebene drehen ferner viele ätherischen Oele und die Lösungen der verschiedenen Arten des Zuckers; Rohrzucker ist rechts-, Traubenzucker linksdrehend.

**Saccharimeter.** Der Drehungswinkel (die Grösse der Drehung der Polarisationssebene) wächst mit der Dicke der drehenden Krystallplatte bezw. mit der Konzentration der drehenden Lösung.

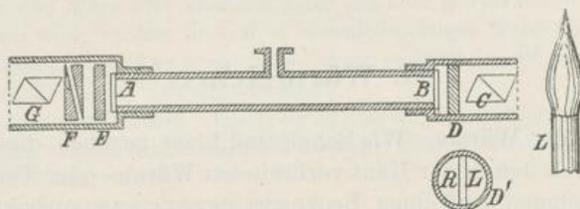


Fig. 75. Saccharimeter.

Daher giebt der Drehungswinkel einen Maassstab für die Konzentration einer Lösung ab. Man benutzt diesen Umstand zur Bestimmung des Gehalts von Zuckerlösungen; die dabei Verwendung findenden Apparate heissen Saccharimeter.

Das Saccharimeter von Soleil (1847) hat folgende Einrichtung (Fig. 75):

Die zu untersuchende Zuckerlösung wird in die an den Enden durch ebene Glasplatten geschlossene Röhre *AB* gefüllt. Das Licht gelangt von der Lichtquelle *L* aus durch das Nicol'sche Prisma *C* und die Quarzplatte *D* in die Röhre. Durch das Nicol'sche Prisma wird es polarisirt; die Quarzplatte *D* besteht, wie *D'* zeigt, aus zwei halbkreisförmigen Quarzstücken: einem rechtsdrehenden und einem linksdrehenden; die Dicke beider Quarzstücke ist eine derartige, dass jedes zwischen den gekreuzten Nicols *C* und *G* (bei Ausschluss der Zuckerlösung) genau die gleiche, dunkel-violett-röthliche Farbe, die sogenannte Uebergangsfarbe, darbietet. Bei *A* verlässt das Licht die Röhre und geht 1. durch die rechtsdrehende Quarzplatte *E*, 2. die aus zwei keilförmig geschliffenen Stücken

zusammengesetzte linksdrehende Quarzplatte  $F$  und 3. das als Analysator dienende Nicol'sche Prisma  $G$  ins Auge. Die Dicke der Quarzplatte  $F$  ist dadurch veränderlich, dass die beiden Quarzkeile, aus denen sie besteht, sich durch eine Mikrometerschraube an einander verschieben lassen. Stimmen die Platten  $E$  und  $F$  in der Dicke überein, so heben sich ihre drehenden Wirkungen gleichzeitig auf, und beide Hälften der Platte  $D$  bieten, wenn  $AB$  keine Flüssigkeit enthält, die Uebergangsfarbe dar.

Wird nun die Flüssigkeit eingeschaltet, so giebt sich das geringste Drehungsvermögen derselben dadurch kund, dass die beiden Hälften der Platte  $D$  ungleich gefärbt erscheinen: die eine blau, die andere roth. Durch Drehung an der Mikrometerschraube verändert man jetzt die Dicke der Quarzplatte  $F$ , bis die Uebergangsfarbe (in beiden Hälften von  $D$ ) wieder hergestellt ist. Die Grösse der Drehung ist dem Procentgehalt der Lösung proportional.

## 11. Wärmelehre.

**Natur der Wärme.** Wie Schall und Licht ist auch die Wärme, die wir durch den in der Haut verbreiteten Wärme- oder Temperatursinn wahrnehmen, auf einen Bewegungsvorgang zurückzuführen. Man denkt sich denselben als eine Bewegung der Körpermoleküle, und zwar erfolgt dieselbe bei festen Körpern in Form regelmässiger Schwingungen um eine feste Gleichgewichtslage; bei flüssigen Körpern fehlt die letztere, aber die Moleküle entfernen sich doch nicht über eine gewisse Grenze hinaus; bei allen luftförmigen Körpern endlich bewegen sich die Moleküle geradlinig fort oder führen kreisende Bewegungen aus, nur gehemmt durch den Zusammenstoss und die in Folge dessen stattfindende Zurückwerfung an anderen Molekülen oder an begrenzenden Wänden.

Diese Vorstellungen gründen sich vor allem auf die Thatsache der Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme und umgekehrt. (Siehe später.)

Die verschiedenen Grössen der Wärme unterscheiden wir als höhere und niedrigere Wärmegrade oder Temperaturen.

Werden Körper von verschiedener Temperatur in Berührung gebracht, so gleichen sich ihre Temperaturen allmählich aus: es vollzieht sich ein Uebergang von Wärme von dem wärmeren zu dem weniger warmen Körper.

Kälte ist nichts wesentlich anderes als Wärme, sondern nur ein niedriger Grad der letzteren. Wir bezeichnen einen Gegen-