

der Optik näher eingegangen werden, ebenso wie auf die Erscheinungen der Brechung, Polarisation und Interferenz der Wärmestrahlen, welche genau den Verhältnissen beim Lichte entsprechen.

Optik.

A. Ursprung und Ausbreitung des Lichtes.

§ 106. **Natur des Lichtes.** Unter Licht versteht man einmal die subjektive Empfindung der Helligkeit, welche durch verschiedene Reize des Sehnerven und der Sehzentra, z. B. durch Elektrizität, Blutdruckschwankungen usw. hervorgebracht wird, dann aber besonders — im physikalischen Sinne ausschließlich — das Agens selbst, welches diese Empfindung unter normalen Verhältnissen auslöst. Über die Natur dieses letzteren bestehen verschiedene Ansichten. Nach der Emanations- oder Emissionstheorie¹ NEWTONS ist das Licht ein äußerst feiner Stoff, der von den leuchtenden Körpern ausgesandt wird. Nach der jetzt fast allgemein angenommenen Undulationstheorie² von HUYGENS entsteht es ebenso wie Wärme durch außerordentlich schnelle Schwingungen der Körpermoleküle, die durch transversale Ätherschwingungen fortgepflanzt werden [vgl. § 105]. Die moderne elektromagnetische Lichttheorie ist in § 218 erwähnt.

§ 107. **Lichtquellen.** Die Verwandtschaft zwischen Wärme und Licht zeigt sich z. B. darin, daß durch genügende Wärmezufuhr Körper leuchtend werden. So wird ein Platindraht durch Erhitzen rot- und schließlich weißglühend. Auch das elektrische Glühlicht ist durch vermehrte Wärmeentwicklung des elektrischen Stromes zu erklären. So ist auch verständlich, daß die größte Wärmequelle, die Sonne, zugleich die stärkste Lichtquelle vorstellt. Alle derartigen Körper, deren Moleküle also so schnell schwingen, daß die von ihnen ausgehenden Ätherwellen (400—800 Billionen in 1 Sekunde) als Licht empfunden werden [vgl. § 135], heißen selbstleuchtend. Von Himmelskörpern gehören außer der Sonne nur noch die Fixsterne dazu, während z. B. die Planeten nur dadurch sichtbar sind, daß sie das Sonnenlicht reflektieren. Besonders stark wird die Lichtentwicklung, wenn mit der Erwärmung auch eine lebhaft oxydation (Verbrennung) Hand in Hand geht. Brennende Gase haben übrigens nur ein geringes Leuchtvermögen, das aber durch suspendierte feste Partikelchen bedeutend erhöht wird. So beruht die Helligkeit einer Gas-

¹ *emano* ausfließen, *emitto* aussenden. — ² *undulatus* wellenförmig.

flamme auf den weißglühenden Kohlenstoffteilchen [vgl. Bunsenbrenner § 52]. Manche Körper senden aber schon bei gewöhnlicher oder nicht sehr erhöhter Temperatur Licht aus (Lumineszenz¹). Hierher gehört das durch Oxydationsprozesse bedingte Leuchten gewisser niederer Tiere und Pflanzen (z. B. Meerleuchten, Glühwürmchen, faulendes Holz) sowie des Phosphors. Man faßt speziell die erwähnten Erscheinungen unter dem Namen Phosphoreszenz² zusammen, bezeichnet aber in der Physik mit diesem Namen auch das Nachleuchten gewisser Körper, nachdem sie einer starken Belichtung ausgesetzt waren [vgl. § 137].

§ 108. **Ausbreitung des Lichtes. Schatten.** Das Licht breitet sich im allgemeinen von einem leuchtenden Punkte nach allen Seiten hin geradlinig [vgl. aber § 140] und mit gleichmäßiger Geschwindigkeit aus. Treffen dabei die Lichtstrahlen auf einen Körper, so werden sie entweder zurückgeworfen (reflektiert) oder verschluckt (absorbiert), oder gehen endlich durch ihn hindurch, indem sie dabei eine Ablenkung (Brechung) erfahren. Auf der Reflexion beruht der Glanz der Körper und die Spiegelung, auf der Absorption die Farbe, Erwärmung und chemische Veränderung, auf dem Durchgang des Lichtes die Durchsichtigkeit der Körper. In dünnen Schichten sind alle Körper durchsichtig oder wenigstens durchscheinend, umgekehrt vermindert zunehmende Dicke die Durchsichtigkeit.

Da ein undurchsichtiger Körper die Ausbreitung des Lichtes stört, muß hinter ihm eine Schattzone entstehen. Bei einer gewissen Größe der Lichtquelle unterscheidet man die Zone des Kernschattens *acb* (Fig. 79), die gar kein Licht erhält, von der des Halbschattens *dacbe*, die teilweise beleuchtet wird. Die Form beider

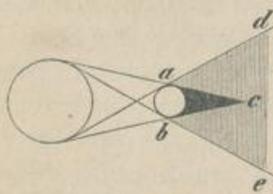


Fig. 79.

ist durch die geradlinige Ausbreitung des Lichtes bedingt. Ebenso beruht darauf die Erscheinung in der optischen Kammer (auch Lochkamera genannt). Dringt nämlich Licht von einem Gegenstande aus durch

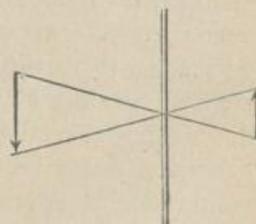


Fig. 80.

ein kleines Loch in einen dunklen Raum, so entsteht auf einer gegenüberstehenden Wand ein umgekehrtes Bild desselben (Fig. 80).

§ 109. **Intensität des Lichtes.** Wie für jede Wellenbewegung gilt auch für das Licht der Satz, daß die Intensität umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung ist [§ 56]. Darauf beruhen die Photo-

¹ *luminesco* leuchten. — ² *φωσφόρος* Lichtträger.

meter¹, Apparate zur Messung der Lichtstärke, worunter man die Gesamtheit des von einer Lichtquelle ausgehenden Lichtes versteht. Denn aus der leicht zu messenden Entfernung, die zwei Lichtquellen haben müssen, um dieselbe Wirkung zu erzielen, ist nach diesem Gesetze das Verhältnis ihrer Intensität ohne weiteres zu berechnen. Bei dem RUMFORDSchen Photometer werden die beiden zu vergleichenden Lichtquellen so aufgestellt, daß die von ihnen auf einen Schirm geworfenen zwei Schatten eines Stabes gleich dunkel sind. Das sehr zweckmäßige Fettfleckphotometer von BUNSEN beruht darauf, daß ein Fettfleck auf Papier im durchfallenden Lichte hell, im auffallenden dunkel erscheint und ganz verschwindet, wenn die auf entgegengesetzten Seiten stehenden Lichtquellen gleiche Wirkung ausüben. Als (willkürliche) Einheit der Lichtstärke, gewöhnlich als HEFNER-Kerze (HK), auch Kerze schlechtweg bezeichnet, benutzt man das Licht der v. HEFNER-ALTENECKSchen mit Amylacetat gespeisten Lampe bei 40 mm Flammenhöhe. Unter Beleuchtungsstärke versteht man die auf die Flächeneinheit (1 qcm) fallende Lichtstärke. Einheit ist die Meterkerze oder Lux², d. h. die Lichtmenge, die von einer Normalkerze auf die im senkrechten Abstand von 1 m befindliche Flächeneinheit fällt. In diesem Maße drückt man die „indizierte Helligkeit“ aus, d. i. die Helligkeit an einem gegebenen Punkte. Beim Lesen soll die indizierte Helligkeit etwa 50 Meterkerzen betragen.

Die ganze Photometrie hat den Mangel, daß es eine absolute Einheit der Lichtintensität noch nicht gibt, und daß sie ferner auf die subjektive Empfindung des Beobachters angewiesen ist. Nun hat aber selbst bei ein und demselben Beobachter die Pupille bei verschiedener Lichtstärke nie dieselbe Weite, es werden also nie gleichgroße Netzhautflächen getroffen.

§ 110. **Lichtgeschwindigkeit.** Das Licht pflanzt sich mit großer Schnelligkeit fort. Es durchläuft in 1 Sekunde ca. 300000 km oder 40000 Meilen. Die erste Bestimmung rührt von OLAF RÖMER her.

Befindet sich die Erde zwischen Sonne und Jupiter, etwa in *E* (Fig. 81), so ist das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsterungeneines der vier Jupitermonde stets gleich, nämlich 42 ½ Stunden. RÖMER hatte auf Grund dieser Beobachtung die Verfinsterungen für längere Zeit voraus berechnet; als nun die Erde inzwischen auf ihrer Bahn nach *E*² gekommen war, trat die Verfinsterung ca. 1000 Sekunden später ein, als berechnet. Dies kann nur darauf beruhen, daß das Licht jetzt 1000 Sekunden mehr braucht, um zur Erde zu gelangen, die jetzt um den Durchmesser der Erdbahn,

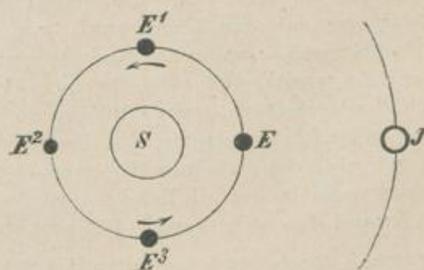


Fig. 81.

*Merkur
Venus
Erde
Mars
Jupiter
Saturn
Uranus
Neptun*

¹ *φῶς* Genitiv *φωτός* Licht; *μέτρον* Maß. — ² *lux* Licht.

296300000 km, weiter vom Jupiter entfernt ist als im ersten Falle. Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich dann nach der Formel $v = \frac{s}{t}$ zu 296300 km in 1 Sekunde.

Ein gleiches Resultat erhält man nach der Methode von BRADLEY, die auf der Aberration¹ des Lichtes der Fixsterne beruht.

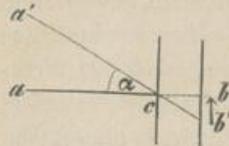


Fig. 82.

Stände nämlich die Erde still, so würde das Licht des Fixsterns *a* (Fig. 82) in gerader Linie die Netzhaut des Beobachters, etwa in *b*, treffen. Da sich aber die Erde (in der Richtung des Pfeils) fortbewegt, während das Licht von der vorderen bis zur hinteren Fläche des Auges geht, so fällt der Strahl nach *b'*. Der Stern wird also in der Verlängerung von *b'c*, etwa in *a'* gesehen, macht daher die scheinbare Bewegung (Aberration) von *a* nach *a'*. Mithin legt das Licht den Weg *cb* in derselben Zeit zurück, wie die Erde den Weg *b'b*. Es ist also v' (Geschwindigkeit des Lichtes): v (Geschwindigkeit der Erde) = $cb:b'b = \cotg \alpha$. v beträgt ca. 30 km; α , der sogenannte Aberrationswinkel, 20,45''; daraus läßt sich v' berechnen.

FIZEAU gelang es dann auch, die Lichtgeschwindigkeit auf der Erde selbst zu bestimmen.

Er ließ durch eine in einem Fernrohr *L* (Fig. 83) 45° zu dessen Achse geneigte unbelegte, also durchsichtige, Glasplatte *s* ein seitlich von *q* kommendes Lichtbündel so reflektieren, daß es in die Achse des Fernrohres fiel und durch die Lücken eines daselbst befindlichen exzentrisch angebrachten Zahnrades *rr* hindurch zu einem ca. 8 1/2 km entfernten Fernrohr *L'* sich fortpflanzte, in diesem an einem Spiegel *p* reflektiert wurde, wieder durch die Zahn-



Fig. 83.

lücken hindurchging und schließlich ins Auge des Beobachters am hinteren Ende des ersten Fernrohres gelangte. Letzterer sah den Lichtpunkt, von dem das Strahlenbündel ausging, wenn das Rad stillstand oder nur langsam gedreht wurde, weil eben der zurückkehrende Lichtstrahl das Rad passierte, bevor ein Zahn an die Stelle der vorangehenden Lücke getreten war. Drehte man aber das Rad so rasch, daß die Zeit eines Hin- und Herganges der Lichtstrahlen genau der Zeit entsprach, in der ein Zahn an Stelle der vorangehenden Lücke trat, so verschwand der Lichtpunkt. Bei einem Rad mit 720 Zähnen und 720 Lücken geschah dies bei 12,5 Umläufen in 1 Sekunde. Diese Zeit betrug somit $\frac{1}{1440 \cdot 12,5} = \frac{1}{18000}$ Sekunde; in dieser Zeit legte das Licht die Entfernung 16 2/3 km zurück, woraus sich eine Geschwindigkeit zu $18000 \cdot 16 \frac{2}{3} = 300000$ km ergab.

¹ *aberro* abirren, abweichen.

B. Reflexion des Lichtes (Katoptrik¹).

§ 111. **Allgemeine Gesetze der Reflexion.** Körper mit rauhen Oberflächen zerstreuen das auf sie fallende Licht nach allen Seiten („diffuse Reflexion“) und werden dadurch selbst sichtbar (z. B. Mond, Planeten usw.). Ihnen gegenüber stehen die Spiegel, glatte Flächen, welche ein Bild des lichtaussendenden Körpers entwerfen. Unter Bild eines Punktes versteht man nämlich den Punkt, an dem die von jenem ausgehenden Lichtstrahlen sich wieder vereinigen. Da ein Gegenstand aus vielen Punkten zusammengesetzt gedacht werden kann, ist die Größe seines Bildes durch die Bilder seiner äußersten Punkte bestimmt. Wenn sich nun die Lichtstrahlen wirklich vor dem Spiegel schneiden, so daß das Bild auch objektiv nachzuweisen ist, indem man es z. B. auf einem Schirm auffängt, so heißt es reell. Vereinigen sich aber die Strahlen nicht wirklich, sondern liegt der Punkt, von dem sie scheinbar ausgehen, hinter dem Spiegel, so heißt das Bild virtuell² oder imaginär. Ein solches, wie es z. B. Planspiegel liefern, kann man natürlich nicht auffangen. Reelle Bilder sind stets umgekehrt, virtuelle aufrecht. Betreffs der Spiegel sei noch bemerkt, daß die gewöhnlichen Spiegel so hergestellt werden, daß eine Glasplatte auf der Rückseite mit einer Schicht von Zinnamalgam belegt wird. Weil aber sowohl an dieser wie an der Vorderfläche Reflexion stattfindet, sind Metallspiegel vorzuziehen. — Die Hauptsätze der Reflexion sind noch einmal folgende [vgl. § 63]:

1) Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene („Einfallsebene“).

2) Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

§ 112. **Ebene Spiegel (Planspiegel³).** Ebene spiegelnde Flächen erzeugen Bilder, die dem Gegenstand symmetrisch sind und so weit hinter dem Spiegel liegen, wie der Gegenstand vor ihm. Dieselben sind also virtuell.

Der vom Gegenstand a (Fig. 84) ausgehende Strahl ab wird nämlich am Spiegel in der Richtung bc reflektiert. Verlängert man den auf MN senkrechten „Hauptstrahl“ aN über N , und cb über b , bis sie sich in a' schneiden, so sind die rechtwinkligen Dreiecke abN und $a'bN$ kongruent (da $\angle a'bN = \angle Mbc$, und dieser nach § 63 = $\angle abN$). Folglich $aN = a'N$. Dasselbe gilt auch für Strahl ade . Daraus folgt, daß die Rückwärtsverlängerung aller Strahlen durch a' geht.

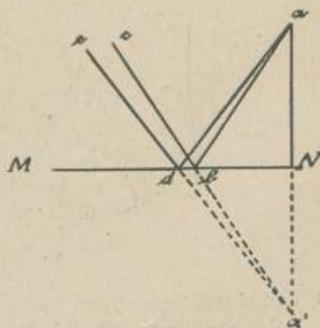


Fig. 84.

¹ *κατοπτρικός* zu einem Spiegel (*κατόπτρον*) gehörig. — ² *virtus* Kraft, Wirkung; also Phänomene, die wie Bilder wirken, ohne durch Vereinigung von Lichtstrahlen entstanden zu sein. — ³ *planus* eben.

Ein Auge in c bzw. e erblickt also den Gegenstand a , wenn es in die Richtung cb bzw. ed sieht¹, und zwar in a' . Aus derselben Figur geht auch hervor, daß beim Planspiegel die gegenseitige Lage der Lichtstrahlen nicht geändert wird. Divergierende Strahlen z. B. bleiben divergent.

Anwendung finden Planspiegel, um Lichtstrahlen eine andere Richtung zu geben. Man kann durch sie „um die Ecke“ sehen. Ihre Verwendung zu den wichtigen Spiegelablesungen beruht darauf, daß die Winkelgeschwindigkeit des reflektierten Strahls doppelt so groß ist wie die des Spiegels selbst. Ist also z. B. an einer Magneta-

nadel ein kleiner Spiegel befestigt, auf den Licht fällt, so lassen sich auch kleine Ausschläge durch die doppelt so großen Exkursionen des reflektierten Strahls leicht erkennen.

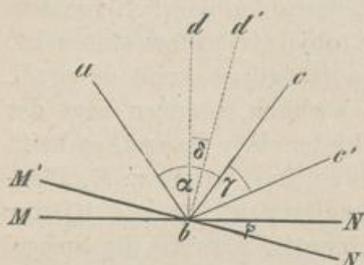


Fig. 85.

Es sei (Fig. 85) MN die ursprüngliche Lage des Spiegels, ab der einfallende, bc der reflektierte Strahl, bd das Einfallslot. Wird MN um φ in die neue Lage $M'N'$ gedreht, so bewegt sich das Einfallslot um $\angle \delta = \varphi$, der reflektierte Strahl um $\angle \gamma$.

Bezeichnet man $\angle abc$ mit α , so ist $\angle \delta = \angle abd' - \angle abd = \frac{\alpha + \gamma}{2} - \frac{\alpha}{2} = \frac{\gamma}{2}$.

Ähnlich ist das Prinzip des Spiegelsextanten, welcher dazu dient, den Winkel zu messen, den zwei Gegenstände mit dem Auge des Beobachters bilden, ohne daß dieser fest zu stehen braucht. Er ist daher z. B. unentbehrlich für die See.

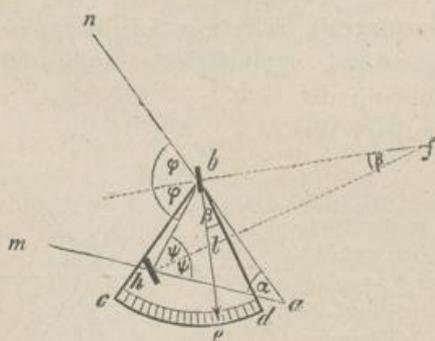


Fig. 86.

Es seien z. B. m und n (Fig. 86) zwei Sterne, deren Schwinke α gemessen werden soll. m kann von dem Auge in a über den feststehenden, bd parallelen, Spiegel h hinweg direkt gesehen werden. Dann wird der Zeiger bc und dadurch auch der an ihm bei b befestigte Spiegel so gedreht, daß die von n ausgehenden Strahlen nach zweimaliger Reflexion an den Spiegeln in b und h ebenfalls nach a gelangen. Der an der Skala cd direkt ablesbare Winkel

β , den der Zeiger dabei zurückgelegt hat, ist nun gleich der Hälfte des gesuchten Schwinke α . Errichtet man nämlich in b und h die Einfallslotte und ver-

¹ Erfahren die von einem Gegenstand ausgehenden Lichtstrahlen durch Spiegelung oder Brechung eine Richtungsänderung, so wird der Gegenstand nicht an seinem wirklichen Platze gesehen, sondern in die Richtung der ins Auge gelangenden Strahlen projiziert [vgl. §§ 116, 119].

längert sie bis zum Schnittpunkte in f , so ist zunächst $\angle hfb = \beta$, weil beide $\angle flb$ zu einem Rechten ergänzen. Ferner ist $\angle \varphi = \beta + \psi$, $\angle 2\varphi = \alpha + 2\psi$. Daraus folgt $\alpha = 2\beta$.

§ 113. **Sphärische Spiegel.** Den Planspiegeln stehen die gekrümmten gegenüber, die entweder konkav (Hohlspiegel) oder konvex sind. Hier sollen nur die kugelförmig gekrümmten (sphärischen) betrachtet werden (Fig. 87—89). Der Mittelpunkt C der Kugel, zu welcher ein solcher Spiegel (SS') vervollständigt werden kann, heißt geometrischer oder Krümmungsmittelpunkt, die Mitte O der spiegelnden Fläche optischer Mittelpunkt oder Scheitel, die Verbindungslinie beider Hauptachse. Jeder Strahl, der durch den geometrischen Mittelpunkt geht, also auch die Hauptachse, heißt Hauptstrahl und wird in sich reflektiert, weil er ja als Radius senkrecht auf dem betreffenden Teil des Spiegels steht. Alle Strahlen parallel der Hauptachse gehen nach der Reflexion durch den sog. Brennpunkt (Focus) F , der in der Mitte zwischen optischem und geometrischem Mittelpunkte liegt. Mittels dieser beiden Sätze lassen sich alle Bilder konstruieren. Der Bildpunkt von B liegt z. B. dort, wo sich die Linien BC und NF bzw. ihre Verlängerungen schneiden. Bezeichnet man nun die Entfernung eines Gegenstandes vom Spiegel mit g , die seines Bildes mit b , die des Brennpunktes (die sog. Brennweite) mit f , so gilt ganz allgemein das Gesetz:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Ferner verhält sich die Größe des Bildes zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandweite.

§ 114. **Bilder der Konkavspiegel.** Aus dem Spiegelgesetz ergibt sich sofort, daß das Bild eines unendlich fernen Gegenstandes im Brennpunkte liegen muß. Denn dann ist $\frac{1}{\infty} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, folglich $b=f$.

Daraus folgt, daß Hohlspiegel als Brennspiegel wirken können, indem sie die Strahlen der Sonne im Brennpunkte konzentrieren. Umgekehrt hat ein Gegenstand im Brennpunkt sein Bild in der Unendlichkeit, d. h. die von ihm ausgehenden Strahlen verlassen den Spiegel nach der Reflexion in paralleler Richtung. Hierauf beruht die Anwendung von Hohlspiegeln in Leuchttürmen usw. Ist der Gegenstand zwischen Unendlichkeit und geometrischem Mittelpunkt, so liegt das Bild zwischen diesem und dem Brennpunkte (Fig. 87). Auch hier ist wieder die Umkehrung möglich. Überhaupt sind Bild und Gegenstand stets konjugiert¹, d. h. sie können miteinander

¹ *conjungo* miteinander verbinden.

vertauscht werden. Ist der

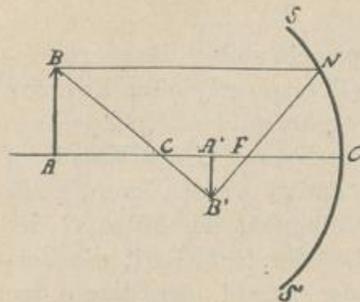


Fig. 87.

vertauscht werden. Ist der Gegenstand im geometrischen Mittelpunkt, so muß auch das Bild dort liegen und gleichgroß sein. In diesen fünf ersten Fällen handelt es sich stets um reelle Bilder, deren Größe nach dem oben Gesagten leicht zu finden ist. Es zeigt sich, daß, je näher der Gegenstand an den Spiegel heranrückt, das Bild sich um so weiter vom Spiegel entfernt. Rückt nun der Gegenstand in die Brennweite hinein, liegt er also zwischen Spiegel- und Brennpunkt, so muß das Bild gewissermaßen über die Unendlichkeit hinausgehen, d. h. es wird negativ und erscheint auf der anderen Seite des Spiegels. In diesem einen Falle geben also Hohlspiegel virtuelle Bilder. Dieselben sind aufrecht und vergrößert, da sie ja weiter vom Spiegel entfernt sind als der Gegenstand (Fig. 88). Darauf beruht die Anwendung von Hohlspiegeln als Barbierspiegel usw. Je mehr sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite dem Spiegel nähert, desto mehr nähert sich auch das Bild dem Spiegel und wird dabei kleiner, bis es unmittelbar am Spiegel gleichgroß wie der Gegenstand wird.

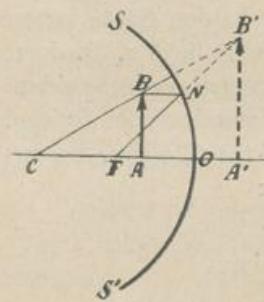


Fig. 88.

§ 115. **Bilder der Konkavspiegel.** Konkavspiegel erzeugen stets virtuelle, aufrechte, verkleinerte Bilder (Fig. 89), die um so kleiner sind, je weiter der Gegenstand vom Spiegel entfernt ist. Die Konstruktion der Bilder erfolgt in analoger Weise wie bei Konkavspiegeln. Den Bildpunkt B' von B (Fig. 89) findet man z. B., indem man einmal die Verbindungslinie zwischen B und C zieht, und zweitens den achsenparallelen Strahl BN , der am Spiegel in der Richtung des Pfeils so reflektiert wird, als ob er vom Brennpunkt F käme. Die Vereinigung beider Strahlen in B' ist daher nur eine scheinbare. Nähert sich der Gegenstand dem Spiegel von der Unendlichkeit bis zur Berührung, so bewegt sich das Bild von F

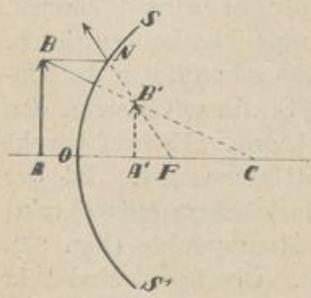


Fig. 89.

nach O zu und wächst dabei von unendlich klein bis fast zur Gegenstandsgröße. Da hier Bild- und Brennweite negativ sind, so nimmt das Spiegelgesetz die Form an

$$\frac{1}{g} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}, \text{ oder anders geschrieben}$$

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{g} = \frac{1}{f}.$$

Daraus folgt $b < g$, d. h. das Bild ist stets dem Spiegel näher als der Gegenstand, mithin auch kleiner, was eine Bestätigung des oben Gesagten bildet.

C. Brechung des Lichtes (Dioptrik¹).

§ 116. **Allgemeine Gesetze der Brechung.** Unter Brechung des Lichtes versteht man die Ablenkung, die ein Lichtstrahl erfährt, wenn er in ein Medium von anderer Dichte dringt. Es gelten hierbei die Gesetze [vgl. § 63]:

1) Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.

2) Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels für je 2 Medien in einem konstanten Verhältnis (Gesetz von SNELLIUS).

Das Verhältnis zwischen dem Sinus des Einfallswinkels α im Medium a und dem Sinus des Brechungswinkels β im Medium b heißt Brechungsverhältnis (oder -exponent, -quotient, -koeffizient, -index) und wird mit n bezeichnet. Es ist also $\sin \alpha : \sin \beta = n$. Dieses Brechungsverhältnis ist nur von der Natur der beiden Medien und der dadurch bedingten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in ihnen, aber nicht von der Größe des Einfallswinkels abhängig². Geht Licht aus einem Stoff in einen anderen über, so spricht man von relativem, geht es aber aus dem leeren Raum in einen Stoff über, von absolutem Brechungsverhältnis. Wenn man sagt, ein Körper hat den Brechungsexponenten n , so versteht man darunter den absoluten Brechungsexponenten bzw. in der Praxis das damit fast übereinstimmende Brechungsverhältnis beim Übergang des Lichts aus Luft in diesen Körper. Je größer also der Brechungsexponent eines Mediums ist, desto stärker wird das Licht in ihm ge-

¹ *διοπτρικός* auf das Durchsehen bezüglich. — ² Auch die Farbe bzw. Wellenlänge des Lichtes kommt hierbei noch in Betracht. Kurzwellige, z. B. violette, Strahlen werden unter sonst gleichen Verhältnissen stärker gebrochen als langwellige, z. B. rote [vgl. § 129]. Als mittleren Brechungsexponenten bezeichnet man das Brechungsverhältnis für gelbe Strahlen von der Wellenlänge $0,59 \mu$ [vgl. § 135].

brochen, desto „optisch dichter“ ist er¹. Luft hat z. B. den Brechungs-exponenten 1, Wasser 1,3, Glas und Öl 1,5. Die stärkere Brechung des Lichts in einem dichteren Medium beruht eben darauf, daß in einem solchen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner wird² [vgl. §§ 61, 63]. Es wird hier also $\sin \alpha > \sin \beta$ und $n > 1$. Mit anderen Worten, der Lichtstrahl wird im dichteren Medium dem Einfallslot zu gebrochen. Beim Übergang des Lichts in ein dünneres Medium liegen diese Verhältnisse umgekehrt. Und zwar hat das Brechungsverhältnis zwischen einem Medium a und einem Medium b genau den reziproken Wert wie zwischen b und a . Geht also z. B. Licht aus Luft in Wasser, so ist $n = 4/3$, geht es umgekehrt aus Wasser in Luft, so ist $n = 3/4$. Für Luft/Glas ist $n = 3/2$, für Glas/Luft ist $n = 2/3$. Brechung findet aber nur bei schräg auffallenden Strahlen statt; senkrecht auffallende gehen ungebrochen weiter.

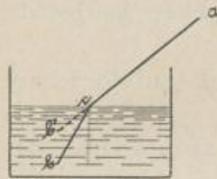


Fig. 90.

Auf der Brechung beruht es z. B., daß Gegenstände im Wasser der Oberfläche näher zu liegen scheinen. Wenn nämlich von b (Fig. 90) Strahlen ausgehen, die nach der Brechung an der Oberfläche des Wassers in das Auge bei a fallen, so wird b in b' gesehen, weil Gegenstände immer in der Blickrichtung, hier also ac , projiziert werden. Ebenso erscheinen durch Brechung in den verschieden dichten Luftschichten entfernte Gegenstände höher, ja sie werden unter Umständen sichtbar, selbst wenn sie unter dem Horizonte liegen (z. B. die Sonne). Auf gleichen Ursachen

beruhen zum Teil die Fata morgana genannten Luftspiegelungen.

§ 117. **Totale Reflexion.** Beim Übergange aus einem dichteren in ein dünneres Medium ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel. Fallen die Strahlen schräg genug auf die Grenzfläche, so wird also der gebrochene Strahl parallel der Oberfläche verlaufen, z. B. coc' (Fig. 91), ja sogar vollständig in das alte Medium zurückkehren müssen, z. B. dod' . Diese Erscheinung heißt totale Reflexion. Da hierbei kein Licht durch Absorption oder Lichtdurchtritt verloren geht, so ist klar, daß total reflektierende Flächen undurchsichtig sind, stark glänzen und die voll-

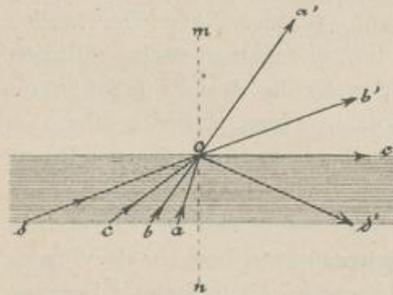


Fig. 91.

stimmende Flächen undurchsichtig sind, stark glänzen und die voll-

¹ Ein optisch dichteres Medium ist in der Regel auch dichter im mechanischen Sinne. Doch gibt es auch Ausnahmen; so ist z. B. Benzol stärker lichtbrechend als Wasser, trotzdem sein spezifisches Gewicht kleiner ist. — ² FOUCAULT bewies dies auch experimentell und widerlegte damit die Emanationstheorie. Denn NEWTON hatte in der Annahme, daß sein Leuchtstoff nach dem Gravitationsgesetze von dichteren Körpern stärker angezogen würde, theoretisch das

kommensten Spiegel darstellen. Für Wasser und Luft beträgt der sogenannte Grenzwinkel der Brechung, d. i. derjenige, von dem an totale Reflexion stattfindet, ca. 48° , für Glas und Luft ca. 41° . Bei optischen Instrumenten wird vielfach die totale Reflexion an rechtwinkligen Prismen [§ 119] benutzt, um Lichtstrahlen ohne Lichtverlust abzulenken. Geht ein Lichtstrahl senkrecht durch die eine Kathete eines solchen „Reflexionsprismas“ (Fig. 92), so trifft er die Hypotenuse unter einem Winkel von 45° , der also größer ist als der Grenzwinkel; daher erfolgt eben totale Reflexion [vgl. § 127].

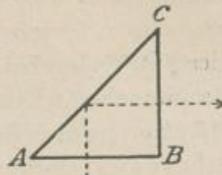


Fig. 92.

§ 118. **Brechung durch planparallele Platten.** Geht Licht durch einen Körper, der von parallelen Flächen begrenzt ist und beiderseits an dasselbe (dünnere) Medium stößt, so werden die Strahlen an der Vorderfläche um ebensoviel dem Einfallslotte zu, wie an der Rückfläche von ihm ab gebrochen. Sie behalten also ihre ursprüngliche Richtung bei und werden nur parallel mit sich verschoben (Fig. 93). So sieht man z. B. auch durch Fensterscheiben die Gegenstände nicht an ihrem wirklichen Platze, obwohl hier die Verschiebung minimal ist. Letztere ist nämlich um so größer, je dicker der Körper ist, je schräger die Strahlen auffallen, und je größer der Brechungsexponent ist.

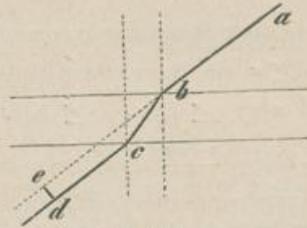


Fig. 93.

§ 119. **Brechung durch Prismen.** Geht dagegen Licht durch einen Körper, dessen Grenzflächen gegeneinander geneigt sind, so bekommen die Lichtstrahlen eine andere Richtung. Dies ist z. B. der Fall beim Prisma¹, wie in der Physik ganz allgemein zwei brechende Flächen heißen, die in der „brechenden Kante“ zusammenstoßen; der Winkel, den sie bilden, heißt „brechender Winkel“. Stellt z. B. Fig. 94 einen Schnitt durch ein Prisma senkrecht zur brechenden Kante, einen sog. Hauptschnitt vor, so wird der Lichtstrahl ab in b nach der Richtung bc

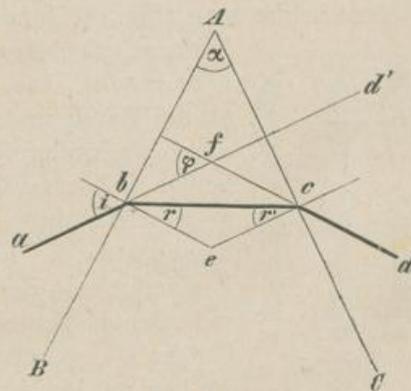


Fig. 94.

Gegenteil behauptet. — Die Abnahme der Lichtgeschwindigkeit in dichteren Medien ist dadurch bedingt, daß die Wellenlängen kleiner werden; die Schwingungszahlen bleiben dieselben.

¹ τὸ πρίσμα eig. „das Gesägte“.

und in c nach cd hin gebrochen; es findet also eine Ablenkung des Lichtstrahls nach dem dicken Ende des Prismas zu statt. Licht, welches von einem Gegenstande in d ausgeht, fällt also in ein Auge bei a . Da dieses aber hierbei in die Richtung ab sieht, projiziert es den Gegenstand nach d' . Ein Prisma wirkt demnach so, daß die Gegenstände nach der brechenden Kante hin verschoben erscheinen. Daraus ergibt sich ohne weiteres die Anwendung prismatischer Gläser für schielende Augen. Der Winkel, den die ein- und austretenden Strahlen miteinander bilden, der sog. Ablenkungswinkel (φ), ist nun, wie sich zeigen läßt, am kleinsten, wenn bc symmetrisch durch das Prisma geht. Dieser kleinste Ablenkungswinkel ist für zwei bestimmte Medien eine konstante Größe; da er außer vom brechenden Winkel nur von dem Brechungsexponenten abhängt, so dient er zur Bestimmung des letzteren. Feste Stoffe bringt man dazu in Prismenform, Flüssigkeiten füllt man in Hohlprismen.

Der Brechungsexponent ist nämlich $\frac{\sin i}{\sin r}$. Es ist nun stets $\angle cbe + \angle bce = \angle \alpha$ als Supplementwinkel zu $\angle bec$. Beim symmetrischen Durchgange ist aber $\angle cbe = \angle bce$, folglich r und $r' = \frac{\alpha}{2}$. Ferner ist $\angle i = \angle ebc + \angle cbf = \frac{\alpha + \varphi}{2}$; somit $n = \sin \frac{\alpha + \varphi}{2} : \sin \frac{\alpha}{2}$. Um also den Brechungsexponenten zu finden, hat man nur nötig, nachdem α bestimmt ist, das Prisma auf die kleinste Ablenkung einzustellen und dann φ zu messen.

§ 120. **Brechung durch Linsen.** Unter Linsen versteht man durchsichtige Körper (meist aus Glas), die von zwei gekrümmten Flächen begrenzt sind. Wir betrachten hier nur solche Linsen, deren Begrenzungsflächen kugelförmig bzw. eben sind. Nach der Form unterscheidet man (Fig. 95) bikonvexe (1), plankonvexe (2), konkavkonvexe (3), bikonkave (4), plankonkave (5), konvexkonkave (6). Die Linsen 1—3 sind in der Mitte dicker als am Rande und haben die Eigenschaft, Strahlen, die durch sie hindurchgehen, konvergenter zu machen; sie heißen daher auch Sammellinsen. Umgekehrt sind



Fig. 95.

4—6 in der Mitte dünner und heißen Zerstreuungslinsen, da sie Divergenz der Strahlen verursachen. Verbindet man die beiden Krümmungsmittelpunkte — so heißen die Zentren der die Linse begrenzenden Kugelflächen —, so erhält man die optische Achse. Auf ihr liegt in der Mitte der Linse der optische Mittelpunkt. Alle durch diesen gehende Strahlen heißen Hauptstrahlen und bleiben bei bikonkaven und bikonvexen Linsen ungebrochen, da für sie die Ein- und Austrittsflächen parallel sind. Der Hauptstrahl, der in die optische Achse fällt, bleibt bei allen Linsen ungebrochen. Alle

anderen Strahlen werden sowohl an der Vorder- wie an der Hinterfläche gebrochen¹. Die beiden Punkte, in denen parallel der optischen Achse auffallende Strahlen sich wirklich oder scheinbar vereinigen, heißen Brennpunkte; ihre Entfernung von der Linsenmitte heißt Brennweite (Fokaldistanz). Um nun z. B. das Bild des Gegenstandes AB (Fig. 96) zu konstruieren, bestimmt man die Bildpunkte seiner beiden Enden. Das Bild von A

muß natürlich auf der optischen Achse liegen. Das Bild von B erhält man, wenn man einmal den zugehörigen Hauptstrahl BOB' zieht, und dann den zur optischen Achse parallelen Strahl BN , der nach der Brechung durch den Brennpunkt F' gehen muß. Der Schnittpunkt beider Strahlen

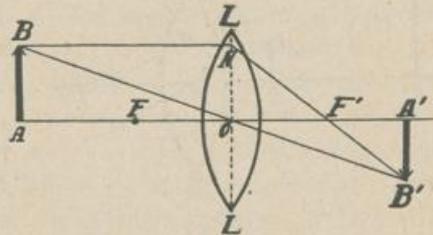


Fig. 96.

ist der gesuchte Punkt, und $A'B'$ das Bild von AB . Auch für die Linsen gilt wieder die Formel [vgl. § 113].

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

wo g Gegenstands-, b Bild-, f Brennweite bedeutet. Handelt es sich um ungleiche Krümmungsflächen, und soll das angrenzende Medium berücksichtigt werden, so wird für $\frac{1}{f}$ eingesetzt $(n-1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$, wo n der Brechungsexponent ist, r und r' die Krümmungsradien vorstellen. Im Gegensatz zu den Spiegeln sind natürlich diejenigen Bilder reell, die auf der anderen Seite der Linse liegen wie der Gegenstand, weil sich ja nur hier Strahlen wirklich vereinigen können. Auch bei Linsen verhält sich Bildgröße zur Gegenstandsgröße wie Bildweite zur Gegenstandsweite.

§ 121. **Konvexlinsen.** Berücksichtigt man diesen Gegensatz, so gelten für die Konvexlinsen die gleichen Regeln wie für die Konkavspiegel. Ist also der Gegenstand unendlich fern, so liegt sein Bild auf der anderen Seite der Linse im Brennpunkte. So kann man durch Konvexlinsen die Sonnenstrahlen im Brennpunkte vereinigen und dort brennbare Körper entzünden. Rückt der Gegenstand aus der Unendlichkeit heran, so entfernt sich das Bild auf der anderen Seite immer mehr. Ist der Gegenstand in doppelter Brennweite, so ist auch das Bild in doppelter Brennweite und ebenso groß; denn auch hier ist das Größenverhältnis zwischen Bild und Gegenstand durch das Ver-

¹ Der Einfachheit halber ist bei den Figuren nur eine einmalige Brechung angenommen.

hältnis ihres Abstandes von der Linse bedingt. Ist der Gegenstand im Brennpunkte, so rückt das Bild in unendliche Entfernung. In allen diesen Fällen entsteht ein reelles, umgekehrtes Bild. Liegt nun aber der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so ent-

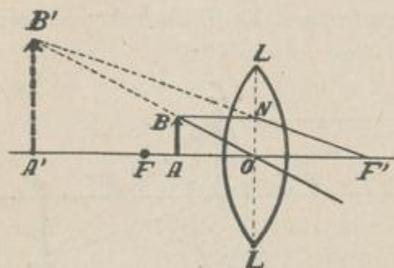


Fig. 97.

steht auf derselben Seite der Linse ein aufrechtes, vergrößertes Bild, das natürlich virtuell (Fig. 97 $A'B'$) und von der Linse weiter entfernt ist als der Gegenstand, aber um so kleiner wird, je näher der Gegenstand an die Linse heranrückt. Darauf gründet sich die Anwendung der Lupen, die vergrößerte Bilder in der Weite des deutlichen Sehens erzeugen.

Denn die Vergrößerung von Objekten durch Annäherung an das Auge findet ihre Grenze dadurch, daß innerhalb des sogenannten Nahpunktes nicht scharf gesehen werden kann.

Da weitsichtige (hypermetropische) Augen einen kürzeren Längendurchmesser haben als normale, so müssen die durch die Linse des Auges entworfenen Bilder hinter die Netzhaut fallen. Gegenstände werden aber nur dann deutlich gesehen, wenn die von ihnen ausgehenden Strahlen sich genau in der Netzhaut schneiden. Es sind hier daher solche Brillen nötig, welche die Strahlen eher zur Vereinigung zwingen, d. h. Konvexgläser.

§ 122. **Konkavlinsen.** Für Konkavlinsen gelten analoge Regeln wie für Konvexspiegel; sie erzeugen also virtuelle Bilder, die hier natürlich auf derselben Seite liegen wie der Gegenstand. Um z. B. das Bild des Punktes B (Fig. 98) zu finden, zieht man wieder den

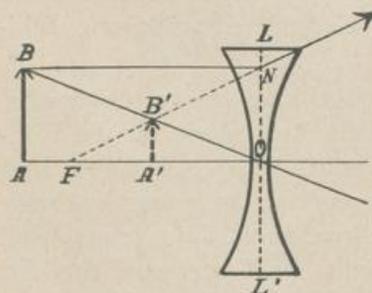


Fig. 98.

Strahl BO , der ungebrochen durch die Linse geht, und den achsenparallelen Strahl BN , der so gebrochen wird, als wenn er vom imaginären Brennpunkte F käme. Wie die Figur zeigt, sind die entstehenden Bilder aufrecht und verkleinert. Der Abstand des Punktes F von der Linse heißt hier Zerstreuungswerte.

Bei kurzsichtigen (myopischen) Augen, deren Längsachse größer als normal ist, fallen die durch die Linse des Auges entworfenen Bilder vor die Netzhaut. Man wendet daher hier Konkavgläser an, um die Konvergenz der Strahlen zu verringern, so daß sie sich eben erst in der Netzhaut schneiden.

§ 123. **Sphärische Aberration.** Die angeführten Gesetze für Linsen und Spiegel gelten nur für nahe der Achse einfallende Strahlen.

Strahlen, die weiter von der Achse entfernt sind, sogenannte Randstrahlen, werden stärker gebrochen, vereinigen sich also eher. Es existiert dann kein Brennpunkt, sondern eine Brennlinie bzw. Brennfläche oder Brennraum. Dadurch werden natürlich die Bilder verschwommen. Zur Vermeidung dieses Übelstandes, der sogenannten sphärischen Aberration, gebraucht man Blenden. Auch die Iris des Auges ist eine solche Blende. Ferner kann man durch geeignete Kombination mehrerer Linsen ein sogenanntes aplanatisches System herstellen, welches von diesem Fehler frei ist.

§ 124. **Kardinalpunkte.** Liegen mehrere brechende Medien hintereinander, so daß sie die Achse gemeinsam haben, so spricht man von einem zentrierten System. Ein solches bilden z. B. die brechenden Schichten des Auges. Gerade bei diesem kommt es nun nicht so sehr darauf an, den Gang der Strahlen durch die einzelnen Schichten zu verfolgen, sondern ihre Richtung im letzten Medium (hier der Glaskörper) zu kennen. Wie GAUSS zeigte, ist nun die Lage der Bilder in solchen zentrierten Systemen durch 3 Paar Kardinalpunkte resp. die durch sie senkrecht zur Achse gelegten Ebenen bestimmt. Diese durch Rechnung zu findenden Punkte sind:

1) 2 Brennpunkte (*F* u. *F'*). Strahlen, die im ersten Medium parallel der Achse verlaufen, gehen im letzten durch den (zweiten) Brennpunkt und umgekehrt.

2) 2 Hauptpunkte (*H* u. *H'*). Ein Strahl, der vor der Brechung in irgendeiner Richtung durch den ersten Hauptpunkt geht, geht nach der Brechung parallel verschoben durch den zweiten. In den durch sie senkrecht zur Achse gelegten Hauptebenen (*hh* und *h'h'*) entsprechen daher Bildern der ersten gleichgroße und gleichgerichtete in der zweiten.

3) 2 Knotenpunkte (*K* u. *K'*). Jeder Strahl, der ohne Brechung durch den ersten gehen würde, geht nach der Brechung parallel mit sich verschoben durch den zweiten.

Um z. B. das Bild von *ab* zu finden, zieht man von *b* aus den Richtungsstrahl *bK* und zur Achse parallel *bl*. Verschiebt man beide Strahlen mit sich

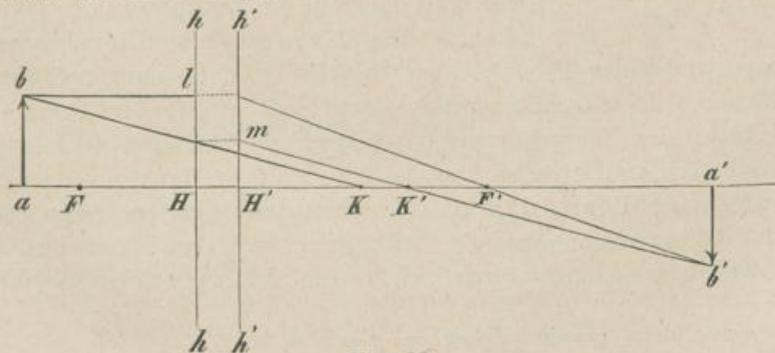


Fig. 99.

selbst parallel bis zur zweiten Hauptebene, dann geht der zur Achse parallele Strahl durch den zweiten Brennpunkt F' , der andere durch den zweiten Knotenpunkt K' . Im Schnittpunkte ihrer Verlängerung liegt das Bild von b , während das von a auf der Hauptachse liegt.

§ 125. **Camera obscura.** Setzt man vor die Öffnung der optischen Kammer [§ 108] eine Sammellinse, so entsteht auf der gegenüberliegenden Wand ein viel schärferes reelles Bild des betreffenden Gegenstandes. Der Apparat heißt dann Camera obscura. Ihr Wert liegt darin, daß sie von körperlichen Gegenständen Bilder entwirft, die in einer Ebene liegen. Sie ist der Hauptbestandteil aller photographischen Apparate, kann aber auch zum Zeichnen benutzt werden, wenn man die einfallenden Strahlen an einem um 45° geneigten Spiegel reflektieren läßt, so daß das Bild dann horizontal liegt. Durch Verschiebung der Linse können sowohl ferne wie nahe Gegenstände „eingestellt“ werden, natürlich nicht gleichzeitig.

Auch das Auge ist eine solche Camera obscura. Hier wird aber die Einstellung für verschiedene Entfernungen nicht dadurch bewirkt, daß die Linse der Netzhaut genähert oder von ihr entfernt wird; sondern dieselbe plattet sich durch die Tätigkeit eines Muskels beim Sehen in die Ferne ab, beim Sehen in die Nähe wölbt sie sich mehr, ein Vorgang, der Akkommodation heißt.

§ 126. **Mikroskop.** Unter Mikroskop¹ schlechtweg versteht man das „zusammengesetzte“ M., im Gegensatz zur Lupe [§ 121], die zuweilen auch als „einfaches“ M. bezeichnet wird. Ein Mikroskop (Fig. 100) besteht im Prinzip aus zwei Linsen. Die dem Objekt zu-

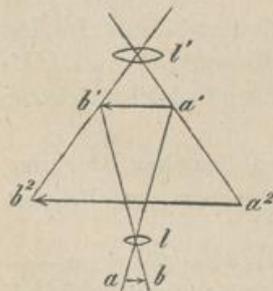


Fig. 100.

gewandte Linse, das Objektiv l' , ist eine Sammellinse von sehr kurzer Brennweite. Sie entwirft von einem kleinen Gegenstande ab , der etwas außerhalb des Brennpunktes liegt, ein umgekehrtes, vergrößertes reelles Bild $a'b'$, das durch eine zweite, dem Auge zugewandte Linse, das Okular² l , nochmals vergrößert wird. Letzteres wirkt hierbei als Lupe; das vom Objektiv entworfene reelle Bild muß daher in die Brennweite des Okulars fallen. Die Gesamtvergrößerung eines

Mikroskops ist das Produkt aus Objektiv- und Okularvergrößerung, von denen jede umgekehrt proportional der betreffenden Brennweite ist. Außer dem Vergrößerungsvermögen kommen aber noch andere Eigenschaften in Betracht, namentlich das Auflösungs- oder Abbildungsvermögen, d. h. die Fähigkeit des Objektivs, feine Struktureinheiten des Präparates zu zeigen, und das Begrenzungs- oder Zeichnungsvermögen, d. i. die Fähigkeit des Objektivs,

¹ μικρός klein, σκοπέω blicken. — ² oculus Auge.

ein scharfes, von Farbensäumen und Schleiern freies Bild des Gegenstandes zu liefern (das wie „gezeichnet“ aussehen soll, daher der Name).

Bei den modernen Mikroskopen (und Fernrohren) verwendet man zur Vermeidung der sphärischen und chromatischen Aberration [§§ 123, 130] statt einfacher Linsen Linsensysteme, die beim Objektiv aus 2—4 und mehr Einzellinsen bestehen, beim Okular dagegen gewöhnlich nur aus zwei plan-konvexen Linsen. Letztere sind beim HUYGENSschen Okular¹ so angeordnet, daß beide Konvexseiten nach dem Objekt hin sehen; die untere Linse („Kollektivglas“) macht die vom Objektiv kommenden Strahlen konvergenter, wodurch ein etwas kleineres reelles Bild, als ohne sie, entsteht, das die obere Linse („Augenglas“) als Lupe vergrößert. Beim RAMSDENSchen Okular dagegen (das hauptsächlich bei Fernrohren zur Anwendung kommt) sind die konvexen Flächen beider Linsen gegeneinander gerichtet; beide Linsen wirken hier als Lupen.

Objektiv und Okular sind durch ein Metallrohr (den Tubus) verbunden das gegen den Objektisch (eine mit zentraler Öffnung versehene Metallplatte) verschieblich ist. Auf letzteren kommen die zu untersuchenden Gegenstände (Präparate), die man vorher auf eine rechtwinklige Glasplatte (Objektträger) bringt und in der Regel mit einem kleinen dünnen quadratischen Glasplättchen (Deckgläschen) bedeckt. Die Untersuchung der Präparate erfolgt fast ausschließlich mittels durchfallenden Lichts, das durch einen unten befindlichen Spiegel in die Achse des Mikroskops geworfen wird. Bei modernen Mikroskopen benutzt man außerdem zur besseren Durchleuchtung des Präparates einen sog. Kondensor², d. i. ein unmittelbar unter dem Objektisch angebrachtes Linsensystem, welches das vom Spiegel kommende Licht im Präparat konzentriert. Zwischen Spiegel und Präparat befindet sich ein Blenden-träger zur Aufnahme von **Blenden**, d. s. Metallscheiben mit zentraler Öffnung von bestimmter Größe; bei den Irisblenden läßt sich die Öffnung mittels eines am Rande befindlichen Griffes in einfacher Weise konzentrisch vergrößern und verkleinern. Spiegel, Kondensor und Blende bilden den Beleuchtungsapparat, dessen vollkommenste Konstruktion von ABBE stammt. Hier ist der Kondensor vertikal verschieblich, ev. auch ausklappbar; die für sich bewegliche Irisblende kann exzentrisch gestellt und um die Mikroskopachse gedreht, auch ganz beiseite geschoben werden. Der ABBEsche Beleuchtungsapparat gestattet daher, Öffnung³ und Einfallsrichtung der Beleuchtungsbüschel während der Untersuchung in bequemster Weise nach Belieben zu ändern.

Bei den gewöhnlichen Trockensystemen befindet sich zwischen dem Objekt bzw. Deckglas und der untersten Linse des Objektivs („Frontlinse“) Luft als Medium. Bei den für stärkste Vergrößerungen in Betracht kommenden Immersionssystemen füllt man aber diesen Raum durch eine Flüssigkeit aus, und zwar in der Regel durch eine solche, die den gleichen Brechungsexponenten hat wie die Frontlinse und das Deckgläschen (homogene Im-

¹ Irrtümlich auch CAMPANISches Okular genannt. — ² Eigentlich Vorrichtung zur Verdichtung (des Lichts), von *condenso* verdichten. ³ Unter Öffnung (Apertur, Öffnungswinkel) versteht man den Winkel zwischen den Randstrahlen des Lichtkegels, der vom Achsenpunkt des Objekts zu einer Linse (oder einem Spiegel), im vorliegenden Falle zum Objektiv geht.

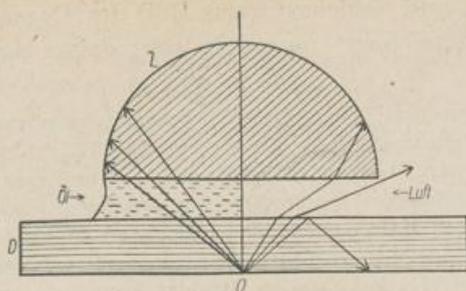


Fig. 101.

system, links bei einem Immersionssystem zeigt (O Objekt, D Deckgläschen, L Frontlinse). Eine homogene Immersion gibt also lichtstärkere Bilder, vor allem steigert sie aber auch das Auflösungsvermögen (s. o.).

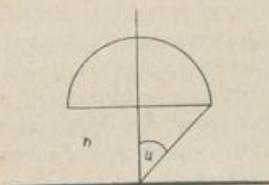


Fig. 102.

Als zweckmäßigen Ausdruck und Vergleichsmaßstab für diese Leistungen hat ABBE den mathematischen Begriff der numerischen Apertur¹ eingeführt. Man versteht darunter den Sinus des halben Öffnungswinkels, multipliziert mit dem Brechungsindex des Mediums, in dem dieser Winkel verläuft. In Fig. 102 ist also die numerische Apertur $a = n \cdot \sin u$. Das Auflösungsvermögen eines Objektivs ist nun direkt proportional der numerischen Apertur, die Helligkeit des Bildes proportional dem Quadrate der numerischen Apertur. Um die Leistungsfähigkeit des Mikroskops zu erhöhen, muß man also die numerische Apertur möglichst groß machen. Bei Trockensystemen kann ihr Wert theoretisch nicht größer sein als 1, in Wirklichkeit jedoch nicht größer als 0,94. Da hier nämlich Luft das Medium ist, ist $n = 1$ [§ 116]. Wäre $u = 90^\circ$, so wäre $\sin u = 1$, also auch $a = 1$. Dies ist aber praktisch unmöglich, da das Objekt nicht unmittelbar an der Frontlinse liegen kann. Selbst bei den besten Konstruktionen kann der Gegenstand nur so nahe an die Linse herangebracht werden, daß höchstens $u = 70^\circ$, $\sin u = 0,94$ wird. Dann ist die numerische Apertur $1 \times 0,94 = 0,94$. Dagegen beträgt bei einer Wasser-

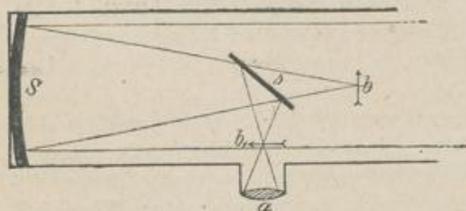


Fig. 103.

immersion ($n = 1,33$) der Höchstwert der numerischen Apertur $1,33 \times 0,94 = 1,25$, und bei einer Ölimmersion ($n = 1,51$) wird die numerische Apertur im besten Falle $1,51 \times 0,94 = 1,43$. — [Vgl. hierzu § 140].

§ 127. Fernrohr. Bei den katoptrischen Fernrohren (auch Reflektoren oder Spiegelteleskope² genannt) wird das durch einen Hohlspiegel erzeugte umgekehrte Bild durch ein Okular betrachtet. Fig. 103 zeigt z. B. die Anordnung von NEWTON. Hier werden die vom Hohlspiegel

¹ *numcrus* Zahl; also etwa „zahlenmäßig definierte Öffnung“. ² *τῆλε φερν*, *σκοπεῖν* blicken.

mersion). Auf diese Weise fällt die Brechung des Lichts zwischen Objekt und Objektiv fort, und es gelangen auch solche Lichtstrahlen ins Objektiv, die bei Trockensystemen wegen ihrer schrägen Richtung am Objektiv vorbeiziehen oder wegen totaler Reflexion überhaupt gar nicht aus dem Deckgläschen austreten würden. Dies geht ohne weiteres aus Figur 101 hervor, die rechts die Verhältnisse bei einem Trocken-

system, links bei einem Immersionssystem zeigt (O Objekt, D Deckgläschen, L Frontlinse). Eine homogene Immersion gibt also lichtstärkere Bilder, vor allem steigert sie aber auch das Auflösungsvermögen (s. o.).

Als zweckmäßigen Ausdruck und Vergleichsmaßstab für diese Leistungen hat ABBE den mathematischen Begriff der numerischen Apertur¹ eingeführt. Man versteht darunter den Sinus des halben Öffnungswinkels, multipliziert mit dem Brechungsindex des Mediums, in dem dieser Winkel verläuft. In Fig. 102 ist also die numerische Apertur $a = n \cdot \sin u$. Das Auflösungsvermögen eines Objektivs ist nun direkt proportional der numerischen Apertur, die Helligkeit des Bildes proportional dem Quadrate der numerischen Apertur. Um die Leistungsfähigkeit des Mikroskops zu erhöhen, muß man also die numerische Apertur möglichst groß machen. Bei Trockensystemen kann ihr Wert theoretisch nicht größer sein als 1, in Wirklichkeit jedoch nicht größer als 0,94. Da hier nämlich Luft das Medium ist, ist $n = 1$ [§ 116]. Wäre $u = 90^\circ$, so wäre $\sin u = 1$, also auch $a = 1$. Dies ist aber praktisch unmöglich, da das Objekt nicht unmittelbar an der Frontlinse liegen kann. Selbst bei den besten Konstruktionen kann der Gegenstand nur so nahe an die Linse herangebracht werden, daß höchstens $u = 70^\circ$, $\sin u = 0,94$ wird. Dann ist die numerische Apertur $1 \times 0,94 = 0,94$. Dagegen beträgt bei einer Wasser-

immersion ($n = 1,33$) der Höchstwert der numerischen Apertur $1,33 \times 0,94 = 1,25$, und bei einer Ölimmersion ($n = 1,51$) wird die numerische Apertur im besten Falle $1,51 \times 0,94 = 1,43$. — [Vgl. hierzu § 140].

§ 127. Fernrohr. Bei den katoptrischen Fernrohren (auch Reflektoren oder Spiegelteleskope² genannt) wird das durch einen Hohlspiegel erzeugte umgekehrte Bild durch ein Okular betrachtet. Fig. 103 zeigt z. B. die Anordnung von NEWTON. Hier werden die vom Hohlspiegel

S reflektierten Strahlen, bevor sie sich zum Bilde b vereinigen durch den schief gestellten Planspiegel s seitlich abgelenkt, so daß das Bild in Wirklichkeit in b_1 entsteht und mittels der Lupe a betrachtet werden kann.

Die Bilder der Spiegelteleskope sind zwar frei von chromatischer Aberration [§ 130], aber verhältnismäßig lichtschwach; deshalb, und weil für wirksame Instrumente sehr große Spiegel erforderlich sind, bevorzugt man in der Neuzeit dioptrische Fernrohre oder Refraktoren, die auf Linsenwirkung beruhen. Die beiden Hauptformen derselben sind das GALILEISCHE und das KEPLERSCHE Fernrohr.

Beim GALILEISCHEM oder holländischen Fernrohr (Fig. 104) werden die Strahlen, die infolge der Brechung durch eine Sammellinse (SS) ein reelles

Bild (A^1B^1) des Gegenstandes (AB) erzeugen würden, vor ihrer Vereinigung durch eine Zerstreulinse (ZZ) aufgefangen und diver-

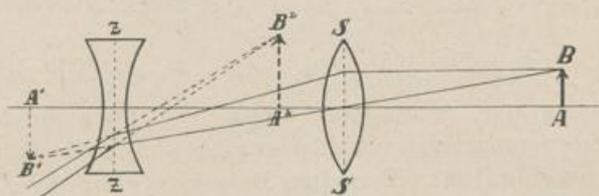


Fig. 104.

gent gemacht, so daß z. B. die von B ausgehenden Strahlen von B^2 herzukommen scheinen. Es entsteht daher ein aufrechtes, vergrößertes, virtuelles Bild (A^2B^2). Hierzu gehören auch die gewöhnlichen Feldstecher und Operngucker.

Das KEPLERSCHE oder astronomische Fernrohr besteht aus einem Objektiv von großer, und einem Okular von kleiner Brennweite (seine Länge entspricht der Summe dieser Brennweiten). Durch das Objektiv wird von einem fernen Gegenstand ein umgekehrtes verkleinertes reelles Bild entworfen, das innerhalb der Brennweite des Okulars liegt, durch dieses daher wie durch eine Lupe vergrößert wird. Es resultiert also ein vergrößertes, virtuelles, umgekehrtes Bild.

Um eine genaue Zentrierung bzw. Messungen zu ermöglichen, bringt man in der Ebene, wo das reelle Bild entsteht, meist ein Fadenkreuz an, das ev. durch eine Mikrometerschraube verschieblich ist und dessen Bild mit dem des Objektes zusammenfällt. Es besteht aus zwei sich rechtwinklig kreuzenden, sehr dünnen (Spinnen-, Quarz- usw.) Fäden, deren Schnittpunkt genau der Achse des Fernrohrs entspricht. Beim Galileischen Fernrohr, wo ja kein reelles Bild zustande kommt, kann natürlich auch ein Fadenkreuz nicht angebracht werden, wohl aber im Okular von Mikroskopen. Das Fadenkreuz kann auch durch eine durchsichtige Skala ersetzt werden (Okularmikrometer).

Schaltet man zwischen Objektiv und Okular eines KEPLERSCHEN Fernrohres eine Konvexlinse („Umkehrungslinse“) ein, so erhält man aufrechte Bilder, was für gewöhnliche Beobachtungen natürlich zweckmäßiger ist (terrestrisches Fernrohr). Statt der Umkehrungs-

*Virtuell
aufsteigend*

Umgekehrtes

linse kann man auch zwei total reflektierende Prismen [§ 117] benutzen. Da ein solches Prisma, wie Fig. 105 zeigt, eine Umkehrung nur in einer Richtung bewirkt, sind eben zwei in solcher Anordnung erforderlich, daß das vom Objektiv gelieferte Bild sowohl in

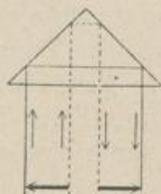


Fig. 105.

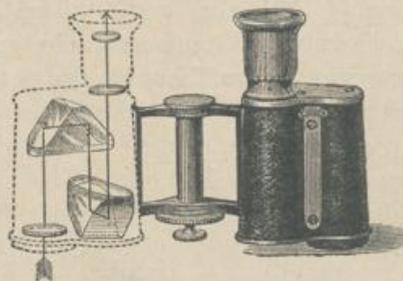


Fig. 106.

bezug auf rechts und links, wie auch in bezug auf oben und unten umgekehrt wird, worauf es durch das Okularsystem betrachtet wird (Fig. 106). Derartige Prismenfernrohre finden, meist in Form von Doppelfernrohren, in der Neuzeit ausgedehnte Verwendung.

Als Feldstecher und Operngläser sind sie den holländischen Fernrohren nicht nur wegen ihrer stärkeren Vergrößerung und Handlichkeit überlegen, sondern auch wegen ihrer besseren Tiefenplastik. Da nämlich der Abstand ihrer Objekte größer ist als der Augenabstand, sieht jedes Auge den betr. Gegenstand besser von der Seite, worauf eben das körperliche Sehen beruht [§ 128]. Besonders ist dies der Fall bei den Scherenfernrohren, wo die Objektive am Ende langer Arme sitzen, die horizontal nach links und rechts hinausragen und zugleich auch drehbar sind (wie die Arme einer Schere, daher der Name). Dies hat wieder den Vorteil, daß der Beobachter gedeckt hinter einer Mauer usw. stehen kann, während die über die Mauer ragenden Objektive das gewünschte Bild liefern. — Ebenfalls auf Prismenwirkung beruhen die Periskope (Sehrohre) der Unterseeboote.

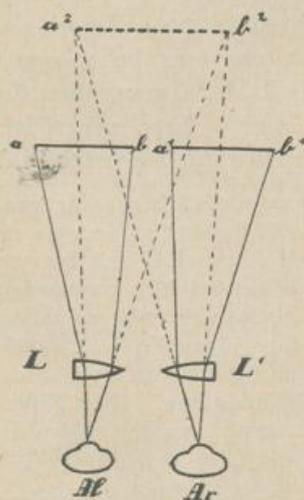


Fig. 107.

§ 128. **Stereoskop.** Die Fähigkeit, stereoskopisch¹ zu sehen, d. h. Gegenstände als Körper, also nach drei Dimensionen wahrzunehmen, wird erst allmählich erworben und hat verschiedene Ursachen. Vor allem erhält beim binokularen Sehen das rechte Auge einen etwas anderen Eindruck von einem Objekte wie das linke, und diese beiden gleichzeitigen Eindrücke werden im Gehirn zu einem einzigen verschmolzen. Hierauf beruht auch das Stereoskop. Sein Prinzip

¹ στερεός starr, fest, körperlich.

ist, daß zwei (flächenhafte) Abbildungen desselben Gegenstandes, die dem Eindruck des rechten bzw. linken Auges von demselben entsprechen, übereinander gelagert werden, und daß dadurch eben ein körperliches Bild entsteht.

Von den mannigfachen Formen sei hier nur das Stereoskop von BREWSTER erwähnt (Fig. 107). Es ist dies ein Kasten, an dessen Boden die beiden Abbildungen (ab und a^1b^1) liegen; eine (hier nicht gezeichnete) Scheidewand bewirkt, daß jedes Auge (A_l und A_r) nur das zugehörige Bild sieht. Durch zwei halbe Konvexlinsen, deren dickerer Teil nach außen sieht, und die wie Prismen wirken, wird sowohl von ab wie von a^1b^1 ein virtuelles Bild erzeugt, und diese beiden Bilder werden in a^2b^2 zur Deckung gebracht. Die Linsen dienen gleichzeitig als Lupen zur Vergrößerung; natürlich müssen die Abbildungen innerhalb ihrer Brennweite liegen¹.

D. Dispersion, Absorption, Spektralanalyse.

§ 129. **Einfaches und zusammengesetztes Licht.** Als NEWTON Sonnenlicht, das durch einen Spalt (S , Fig. 108) in ein dunkles Zimmer drang, durch ein Prisma (P) gehen ließ und dann auf einem Schirm (W) auffing, fand er, daß die Lichtstrahlen nicht nur abgelenkt, sondern auch in eine Reihe kontinuierlich ineinander übergehende Farben zerlegt waren. Die Gesamtheit derselben nannte er Spektrum² und unterschied besonders Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Die Größe der Ablenkung nimmt vom Rot (R) zum Violett (V) kontinuierlich zu (Fig. 108). Ließ er eine dieser Spektralfarben nochmals ein Prisma passieren, so fand zwar wieder eine Ablenkung statt, aber die Farbe blieb dieselbe. Ließ er alle Farben noch durch ein zweites Prisma mit entgegengesetzter brechender Kante gehen, so entstand wieder Weiß. Diese Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß kann man auch durch eine Sammellinse bewirken oder durch schnelle Rotation einer Scheibe, auf der die einzelnen Farben aufgetragen sind (Farbenkreisel); in letzterem Falle erfolgt die Verschmelzung der Farben zu Weiß erst im Gehirn. Weiß entsteht aber auch, wenn man nur je zwei bestimmte Farben des Spektrums, die sog. Komplementärfarben, vereinigt. Als solche gelten Rot und Blaugrün, Orange und Zyanblau, Gelb und Indigoblau, Grüngelb und Violett [vgl. § 131]. Vereinigt man andere Farben des Spektrums miteinander, so entstehen sog. Mischfarben.

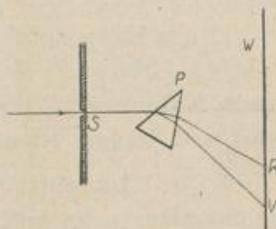


Fig. 108.

¹ Übrigens kann man auch durch Übung ohne Prismen oder Linsen zwei getrennte Gegenstände zur Deckung bringen. — ² eig. das Bild in der Seele, von *specio* schauen.

Hieraus schloß NEWTON, daß die Spektralfarben als einfaches oder homogenes Licht zu betrachten sind, d. h. nur aus Wellen gleicher Schwingungszahl bestehen. Im weißen Lichte dagegen sind alle Spektralfarben (Wellenformen) enthalten, es ist also zusammengesetztes Licht. Geht es durch einen brechenden Körper, namentlich durch ein Prisma, so werden seine einzelnen Bestandteile verschieden stark gebrochen, am stärksten das Violett, am wenigsten das Rot; sie werden also dadurch voneinander getrennt, zerstreut (dispargiert),

Die Schwingungszahl der verschiedenen Lichtwellen wächst kontinuierlich von Rot bis Violett. Rot hat die kleinste Schwingungszahl (ca. 400 Billionen), Violett die größte (ca. 800 Billionen). Da sich nun alle Lichtstrahlen im leeren Raum und in Luft gleich schnell fortpflanzen, folgt aus der Formel $v = n\lambda$, daß umgekehrt die roten Strahlen die größte Wellenlänge (ca. $0,8 \mu$), die violetten die kleinste (ca. $0,4 \mu$) haben [vgl. § 135]. In optisch dichteren Medien ist dagegen die Geschwindigkeit der einzelnen farbigen Strahlen nicht gleich, sondern sie wird hier in verschiedenem Grade verlangsamt¹ — beim Violett am meisten, beim Rot am wenigsten [vgl. § 116] —, und als Folge davon entsteht eben eine verschieden starke Brechung derselben, bei Anwendung von zusammengesetztem Lichte also Dispersion².

Einige Körper mit Oberflächenfarben, die im auffallenden Lichte anders gefärbt aussehen wie im durchfallenden (Fuchsin, übermangansaures Kalium usw.), zeigen anomale Dispersion, d. h. sie brechen Blau und Violett schwächer als Rot, Orange, Gelb.

§ 130. **Achromatismus.** Mit jeder Brechung ist eine (wenn auch nicht immer sehr auffallende) Dispersion verbunden. Da nun bei verschiedenen Substanzen das Verhältnis zwischen beiden Vorgängen nicht dasselbe ist, so kann man durch passende Kombinationen (z. B. von Kron- und Flintglas) Prismen herstellen, die zwar noch Brechungsvermögen besitzen, aber von Farbenzerstreuung frei sind, sog. achromatische Prismen, andererseits solche mit Dispersionsvermögen, aber ohne Brechkraft, sog. geradsichtige Prismen. Ebenso läßt sich auch bei Linsen die störende Dispersion, hier chromatische Aberration genannt, durch Vereinigung einer Flintglas- und einer Kronglaslinse beseitigen.

§ 131. **Körperfarben.** Die Farbe eines Körpers beruht auf den nicht absorbierten, d. h. also den reflektierten resp. durchgelassenen Strahlen. Man kann daher auch die Körperfarben als Restfarben bezeichnen. Absorbiert der Körper von den auf ihn fallenden Strahlen

¹ Diese Annahme hat man wieder durch verschiedene Hilfhypothesen zu stützen versucht, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. —

² Übrigens sind auch andere Farbentheorien aufgestellt worden (z. B. von GOETHE und von SCHOPENHAUER), die allerdings bei den Fach-Physikern keine Anerkennung gefunden haben.

keine, so ist er entweder weiß oder ganz durchsichtig, je nachdem er alle Strahlen reflektiert oder ganz durchläßt. Absorbiert er alle Strahlen, so sieht er schwarz aus. Absorbiert er nur bestimmte Strahlen, so nimmt er die entsprechende Komplementärfarbe an, weil die absorbierten Strahlen natürlich im reflektierten bzw. durchgelassenen Lichte fehlen. Es folgt daraus, daß ein roter Körper (der ja grünes Licht absorbiert) in weißem und rotem Lichte rot, in grünem schwarz aussieht, daß ein rotes und ein dahinter befindliches grünes Glas eine undurchsichtige Verbindung geben usw.

Während die Vereinigung von Spektralfarben Additions- oder Summationsfarben ergibt, erhält man durch Mischung von Körperfarben Differenz- oder Subtraktionsfarben. Läßt man z. B. weißes Licht erst durch ein blaues Glas gehen (das die roten, gelben, violetten Strahlen absorbiert), dann durch ein gelbes Glas (das die roten, blauen, violetten absorbiert), so bleibt hauptsächlich grünes Licht übrig. Dasselbe gilt für die Mischung von blauem und gelbem undurchsichtigem Farbstoff („Pigment“). Die subtraktive Mischung von Blau und Gelb ist also Grün, während die additive Weiß ist [§ 129].

§ 132. **Spektralanalyse.** Da das Spektrum eines Körpers nichts anderes ist, wie die Nebeneinanderstellung der von ihm ausgesandten Lichtstrahlen, geordnet nach ihren Schwingungszahlen, so ist klar, daß man aus der Beschaffenheit desselben auf den Körper schließen kann. Diese von KIRCHHOFF und BUNSEN entdeckte Untersuchungsmethode, die sich durch äußerste Feinheit auszeichnet, z. B. auch zur Entdeckung mancher chemischen Elemente geführt hat, heißt Spektralanalyse.

Fig. 109 zeigt das Schema eines Spektralapparates. Durch einen schmalen Spalt des sogenannten Kollimatorrohres¹ *A* dringen Strahlen von dem zu untersuchenden Körper ein und werden durch eine Sammellinse parallel auf das Prisma *P* geworfen, dort dispergiert und zugleich in das Fernrohr *B* gelenkt. Dort entsteht durch das Objektiv ein umgekehrtes Bild des Spektrums, das dann durch eine Lupe betrachtet wird. Gleichzeitig wird durch das Prisma in das Fernrohr das Bild einer Skala geworfen, welche am vorderen Ende des sog. Skalenrohres *C* in Glas eingeritzt ist; dieselbe dient zur Orientierung im Spektrum. — Für die Zwecke der Praxis benutzt man handliche Spektroskope, bei denen ein einziges Rohr Spalt, geradsichtiges Prisma [§ 129] und Fernrohr enthält.

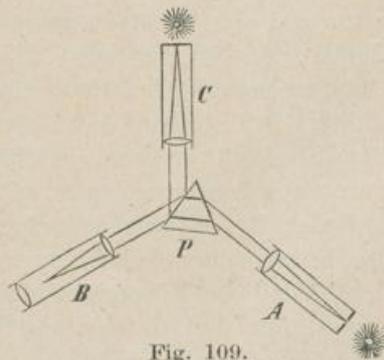


Fig. 109.

§ 133. **Emissionsspektren.** Wenn Körper in glühendem Zustande selbst Strahlen aussenden, liefern sie sog. Emissionsspektren.

Um Körper glühend zu machen, bringt man sie entweder in die Flamme

¹ verdorben aus *collineo* in gerade Linie bringen.

eines Bunsenbrenners oder, wenn diese Hitze nicht genügt, in ein Knallgasgebläse oder endlich in den elektrischen Flammenbogen. Eventuell läßt man auch den elektrischen Funken zwischen zwei Elektroden des betr. Metalls übergehen. Um Gase leuchtend zu machen, schließt man sie sehr verdünnt in sog. GEISSLERSche Röhren [§ 206] ein und sendet elektrische Funken hindurch.

Die Natur der Spektra ist abhängig von der molekularen Beschaffenheit des betreffenden Körpers. Da bei festen und flüssigen Körpern im Zustande der Weißglut den dicht zusammengedrängten Molekülen alle möglichen Schwingungszahlen zukommen, so werden alle möglichen Farben von ihnen ausstrahlen; es entsteht daher ein kontinuierliches Spektrum, bei dem die Farben ineinander übergehen. Je weiter die Moleküle voneinander entfernt sind, desto eher können sie die ihnen eigentümlichen Schwingungen ausführen, ohne durch Zusammenprall mit anderen gestört zu werden. Es haben daher Dämpfe und Gase bei hoher Temperatur und geringer Dichte ein Linienspektrum, d. h. ein Spektrum mit bestimmten farbigen Linien, das bei niedriger Temperatur, größerer Dichte und dickerer Schicht des Gases in ein Bandenspektrum, d. h. ein Spektrum mit breiteren hellen Bändern, übergeht. Ein Linienspektrum ist charakteristisch für Elemente, während chemische Verbindungen meist ein Bandenspektrum haben.

§ 134. **Absorptionsspektra.** Wird von weißem Licht, das durch einen Körper hindurchgegangen ist, ein Spektrum entworfen, so zeigen sich an gewissen Stellen dunkle Linien oder Bänder, die den vom Körper absorbierten Strahlen entsprechen. Dies sind sogenannte Absorptionsspektra. Um sie zu erhalten, stellt man den betreffenden Körper zwischen eine weiße Lichtquelle und das Kollimatorrohr des Spektralapparates; Flüssigkeiten bringt man hierzu in Gefäße mit planparallelen Glaswänden. Einen Wert bekamen diese Untersuchungen aber erst, als KIRCHHOFF das berühmte Gesetz aufstellte, daß jeder leuchtende Körper gerade diejenigen Strahlengattungen am stärksten absorbiert, die er selbst auszusenden vermag (s. u.). Danach kann also aus der Zahl und Stellung der schwarzen Linien und Bänder ebenfalls auf die Natur der betreffenden Körper geschlossen werden. Man erklärt dies dadurch, daß die Körpermoleküle auf eine bestimmte Schwingungszahl abgestimmt sind, daß sie also Wellen von derselben Schwingungszahl am leichtesten aussenden und auch aufnehmen können. Es sind mithin analoge Verhältnisse wie beim Mittönen [§ 70]. Um einen Vergleich zu gebrauchen, so wird derjenige eine fremde Sprache am besten verstehen (absorbieren), der sie selbst sprechen (emittieren) kann. Von den wichtigen Folgerungen aus dem KIRCHHOFF'schen Gesetze sei hier nur die Erklärung der sogenannten FRAUNHOFER'schen Linien an-

geführt, das sind die äußerst zahlreichen dunklen Linien im Sonnenspektrum. Nach dem oben Gesagten muß es sich hier um ein Absorptionsspektrum handeln. Man nimmt daher an, daß die Strahlen des glühenden Sonnenkerns erst durch eine Metaldampfhülle (sog. Chromosphäre) dringen müssen, bevor sie in den Weltraum gelangen. Die FRAUNHOFERSchen Linien, die mit großen lateinischen Buchstaben (die schwächeren mit kleinen) bezeichnet werden, dienen zur Orientierung im Spektrum und zur Bezeichnung der entsprechenden Lichtstrahlen bzw. Wellenlängen.

Das allgemeine Strahlungsgesetz von KIRCHHOFF, von dem der oben angeführte Satz nur ein Spezialfall ist, bezieht sich auf die gesamte kalorische Strahlung [§ 135], von dem die sichtbare Strahlung ja nur einen Teil bildet, und lautet: Für jeden Körper ist das Verhältnis zwischen Emissions- und Absorptionsvermögen eine konstante Größe, und zwar ist es gleich der Strahlung des absolut schwarzen Körpers von derselben Temperatur und derselben Wellenlänge. Das heißt eben: Ist das Emissionsvermögen eines Körpers für irgendein Strahlengebiet sehr groß, so muß sein Absorptionsvermögen für dasselbe Strahlengebiet auch sehr groß sein.

Ein absolut schwarzer Körper ist ein solcher, der alle auffallenden Strahlen weder reflektiert noch durchläßt, sondern vollkommen absorbiert. Da also sein Absorptionsvermögen (A) ein Maximum, nämlich $= 1$ ist, wird hier das Verhältnis zwischen Emissions- und Absorptionsvermögen $E : A = E$, so daß der absolut schwarze Körper als Vergleichsobjekt sehr geeignet ist, worauf die obige Formulierung des KIRCHHOFFSchen Gesetzes beruht. In praxi verwendet man zur Herstellung eines absolut schwarzen Körpers metallische, innen geschwärzte Hohlkugeln oder Hohlzylinder mit einer kleinen Öffnung; die durch letztere eintretenden Strahlen werden im Innern wiederholt reflektiert und dabei fast vollkommen absorbiert.

§ 135. **Ultrarote und ultraviolette Strahlen.** Außer dem sichtbaren, durch die Farben rot bis violett charakterisierten, Spektrum, gibt es auch Ätherwellen bzw. Strahlen, die das Sehorgan nicht reizen, daher unsichtbar bleiben. Diese Strahlen liegen jenseits von rot bzw. violett, heißen daher ultrarote bzw. ultraviolette Strahlen. Für alle diese Strahlen gilt die Formel $v = n \lambda$ [§ 61] $= 300000$ km pro Sekunde. Nach der ultraroten Seite hin werden die Wellenlängen immer größer, die Schwingungszahlen kleiner, nach der ultravioletten Seite zu ist es umgekehrt.

Für rote Strahlen ist annähernd $\lambda = 0,8 \mu$, $n = 400$ Billionen; für gelbe Strahlen (entsprechend der FRAUNHOFERSchen D-Linie oder Natriumlinie) $\lambda = 0,59 \mu$, $n = 500$ Billionen; für violette Strahlen $\lambda = 0,4 \mu$, $n = 800$ Billionen. Ultrarote Strahlen sind gemessen worden bis zu $\lambda = 343 \mu = 0,34$ mm, wobei $n = 1$ Billion. Ultraviolette Strahlen sind gemessen worden bis zu $\lambda = 0,1 \mu$, wobei $n = 3000$ Billionen. Die elektrischen Wellen [§ 216] haben eine Länge $\lambda = 3$ mm bis viele Kilometer. Die Röntgenstrahlen haben vielleicht eine Wellenlänge von $0,01 - 4 \mu\mu$.

Je nach der Substanz, in der sie absorbiert werden, zeigen die

Ätherstrahlungen Wärme-, Licht- bzw. chemische Wirkung. Der sichtbare Teil des Spektrums besitzt alle diese Wirkungen, der ultrarote Teil nur Wärmewirkungen („dunkle“ Wärme¹), der ultraviolette Teil hauptsächlich chemische Wirkungen.

Die ultraroten Strahlen weist man mittelst einer Thermosäule nach [§ 184]; zu ihrer Darstellung benutzt man Steinsalzprismen, da Glas zu viel dunkle Wärme absorbiert [§ 105]. Die ultravioletten Strahlen weist man durch ihre Fluoreszenzwirkung nach [§ 137]; hierzu benutzt man Quarzprismen, da Glas ultraviolettes Licht absorbiert.

§ 136. **Chemische Strahlenwirkungen.** In manchen Körpern verursachen die absorbierten Strahlen chemische Umsetzungen. Man nennt solche chemisch wirksamen Strahlen auch aktinische² Strahlen und spricht von photochemischen Wirkungen. Besonders gilt dies von den kurzwelligigen Lichtstrahlen und noch mehr von den ultravioletten Strahlen. So bewirkt z. B. Sonnenlicht die Umwandlung des giftigen gelben Phosphors in den unschädlichen roten, die Vereinigung von Wasserstoff und Chlor zu Salzsäure, den Aufbau komplizierter chemischer Verbindungen in Pflanzen, die Zersetzung von Wasserstoffsperoxyd (H_2O_2) in H und O usw. Hierher gehört auch die Photographie.

Die ersten Lichtbilder waren die sog. Daguerreotypien³. Hier wirkte das Licht auf Jodsilberplatten; die vom Licht getroffenen Stellen bekamen die Fähigkeit, Quecksilberdämpfe zu kondensieren. Um das so entstandene Bild zu „fixieren“, d. h. weitere Umsetzungen der lichtempfindlichen Platte zu verhüten, wurde das überschüssige Jodsilber mit unterschwefligsaurem Natron abgespült. — Bei der modernen Photographie wird im wesentlichen eine mit Halogensilber überzogene Glasplatte kurze Zeit exponiert. Durch Behandlung mit reduzierenden Substanzen (sog. „Entwicklern“) entsteht an den belichteten Stellen schwarzes metallisches Silber. Nach dem Fixieren erhält man somit ein negatives Bild, d. h. die hellen Stellen des Gegenstandes sind dunkel und umgekehrt. Drückt man dies Negativ auf lichtempfindliches Papier und setzt dieses dem Tageslicht aus, so bleiben die den dunklen Stellen des Negativs entsprechenden Partien hell, die den hellen des Negativs entsprechenden werden dunkel; es entsteht somit jetzt ein positives Bild.

§ 137. **Fluoreszenz und Phosphoreszenz.** Auf der Absorption gewisser Strahlen beruht auch die Eigenschaft mancher Substanzen (z. B. Flußspat, Chininsulfat, Baryumplatincyranür usw.), unter dem Einflusse intensiver Bestrahlung selbstleuchtend zu werden und dann Strahlen auszusenden, deren Farbe sowohl von derjenigen der Lichtquelle, wie von der gewöhnlichen Farbe des Körpers abweicht. Hält

¹ Die dunklen Wärmestrahlen sind nur ein Teil der „kalorischen“ Strahlen, womit eben alle Strahlen bezeichnet werden, die Wärmewirkung zeigen. — ² Von *actis* Strahl, also eine Tautologie. — ³ Nach dem frz. Maler DAGUERRE (1789—1851), der sie 1838 erfand.

dieser Zustand nur während der Bestrahlung an, so heißt er **Fluoreszenz**¹, während das Nachleuchten **Phosphoreszenz** genannt wird. Ein phosphoreszierender Körper ist z. B. der **Diamant** [vgl. § 107]. Daß es sich um eine Absorptionserscheinung hierbei handelt, geht daraus hervor, daß die Strahlen, die von einem fluoreszierenden Körper ausgehen, nicht wieder Fluoreszenz erregen können. Die wirksamen Strahlen sind hier die mit großer Schwingungszahl, welche dadurch, daß sie ihre Bewegung teilweise an materielle Moleküle abgeben, eine Verminderung ihrer kinetischen Energie erfahren und dadurch in Strahlen von größerer Wellenlänge, aber kleinerer Schwingungszahl übergehen. Fluoreszierende Körper sind demnach ein Mittel, die sonst unsichtbaren ultravioletten Strahlen (auch Röntgen- und Radiumstrahlen) sichtbar zu machen.

E. Interferenz und Polarisation.

§ 138. **Fresnels Spiegelversuch.** Eine Hauptstütze der Wellentheorie des Lichtes ist die Tatsache, daß unter Umständen Licht zu Licht gefügt Dunkelheit ergibt. Dies zeigt sehr schön der berühmte Spiegelversuch von FRESNEL.

Fallen von der Lichtquelle L (Fig. 110) Strahlen auf die unter sehr stumpfem Winkel zusammenstoßenden Spiegel AB und BC , so scheinen die reflektierten Strahlen von den Bildpunkten M und M' zu kommen. Die davon ausgehenden Lichtkegel OMP und $O'M'P'$ haben nun das Stück $O'BP$ gemeinsam, und in diesem entstehen bei Anwendung einfarbigen Lichtes² abwechselnd dunkle und helle Streifen, die auf einem Schirme aufgefangen oder direkt mittels einer Lupe betrachtet werden können.

Diese dunklen Streifen sind der Ausdruck dafür, daß daselbst Wellen mit entgegengesetzten Phasen zusammentreffen, also sich schwächen bzw. aufheben [§ 64]. Da N , die Mitte von $O'P$, von M und M' gleichweit entfernt ist, muß dort Helligkeit herrschen, weil hier die Wellen gleiche Phasen haben, also sich verstärken. Ebenso muß Helligkeit an allen den Punkten sein, deren Abstände von M und M' um

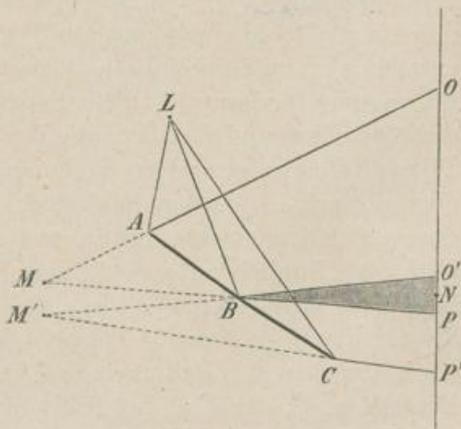


Fig. 110.

¹ Weil zuerst beim Fluorkalzium (Flußspat) entdeckt. — ² Zum Zustandekommen der Interferenzerscheinungen müssen beide Wellensysteme gleichartig sein, was nur der Fall ist, wenn sie von einer Lichtquelle ausgehen.

eine gerade Zahl von halben Wellenlängen differieren; Dunkelheit dagegen dort, wo die Differenz dieser Abstände eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen beträgt. Bei Anwendung von rotem Licht sind die dunklen Streifen weiter voneinander entfernt als beim violetten Licht. Da nämlich die Wellenlänge des ersteren größer ist, entsteht auch die zur Auslöschung nötige Phasendifferenz von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge erst nach einer längeren Strecke. Aus dem Abstände der Interferenzstreifen lassen sich die Wellenlängen für die einzelnen Farben berechnen. Bei der Anwendung von weißem Lichte, das ja alle Strahlen in sich vereint, erhält man in N wieder eine weiße Stelle, da ja dort keine Phasendifferenz besteht. Seitlich davon werden zuerst die violetten Strahlen durch Interferenz ausgelöscht, dann allmählich die anderen, entsprechend ihrer Wellenlänge. Die an den betreffenden Stellen übrigbleibenden Strahlen ergeben dann durch Mischung die sogenannte Interferenzfarben.

§ 139. **Andere Interferenzerscheinungen.** Auf Interferenz beruhen viele prächtige Farbenercheinungen, z. B. die Farben dünner

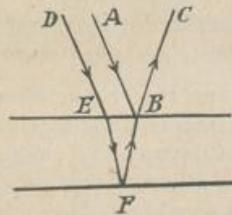


Fig. 111.

Blättchen. Hier wird nämlich das Licht sowohl an der vorderen, wie an der hinteren Fläche reflektiert und kommt dann zur Interferenz. Der ins Auge gelangende Strahl BC (Fig. 109) setzt sich also zusammen aus dem in B reflektierten Strahl AB und aus dem in F reflektierten Strahl DE . Diese beiden zur Interferenz kommenden Anteile haben nun einen Gangunterschied, der dadurch bedingt ist, daß der an der Hinterfläche reflektierte Strahl einen längeren Weg (hier EFB) zurücklegt; außerdem entsteht aber noch durch Reflexion am dichteren Medium ein (einmaliger) Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge [vgl. § 63]. Je nach der Dicke des Blättchens und der Richtung der Strahlen wird nun eine bestimmte Phasendifferenz eintreten; in homogenem Lichte wird es daher hell oder dunkel, in weißem in einer bestimmten Farbe erscheinen. Bei durchgehendem Lichte treten analoge Erscheinungen auf; doch ist Hell und Dunkel vertauscht, und bei weißem Lichte erscheinen die Komplementärfarben. Ändert sich die Dicke des Blättchens bzw. der für die Interferenz in Betracht kommenden Schicht, so tritt auch ein Wechsel in der Helligkeit und Dunkelheit bzw. in den Farben ein. Dies ist z. B. der Fall bei Seifenblasen und bei dünnen Ölschichten auf Wasser. Hierher gehören auch die sog. NEWTONSchen Ringe. Diese entstehen, wenn auf eine ebene Glasplatte eine schwach gekrümmte Konvexlinse gedrückt wird; dann stellt die Luft zwischen beiden eine dünne Schicht vor, deren Dicke gleichmäßig zunimmt. Es bilden sich daher in homogenem Lichte helle und dunkle Ringe,

in weißem farbige. In der Mitte, also an der Berührungsstelle zwischen Platte und Linse, herrscht Dunkelheit, da hier die Luftschicht zwar gleich Null ist, aber wegen Reflexion am dichteren Medium ein Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge, also Phasenumkehrung entsteht.

§ 140. **Beugung.** Mit Interferenz verbunden ist auch die Beugung des Lichts um den Rand undurchsichtiger Körper. Dringen z. B. parallele Lichtstrahlen durch den sehr schmalen Spalt AB (Fig. 112), so breiten sie sich nach dem im § 62 Gesagten auch seitlich aus. Läßt man sie durch eine (hier nicht gezeichnete) Sammellinse gehen, so vereinigt diese die einzelnen verschieden gerichteten parallelen Strahlenbündel auf dem in ihrer Brennebene angebrachten Schirme MN in bestimmten Punkten, ohne daß hierdurch der Gangunterschied, den die Strahlen während ihres parallelen Verlaufes¹ hatten, geändert wird. Bei Anwendung von homogenem

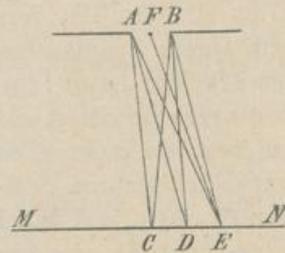


Fig. 112.

(einfarbigem) Lichte treten nun folgende Erscheinungen auf: An der AB gerade gegenüberliegenden Stelle C kommen alle Elementarwellen ohne Gangunterschied, also mit derselben Phase an; hier muß also Helligkeit herrschen. An allen anderen Punkten kommen aber die Strahlen mit einem Gangunterschied an, der um so größer wird, je schräger die Strahlen auf den Schirm fallen, d. h. je größer der „Beugungswinkel“ wird. Beträgt der Gangunterschied z. B. in D für die Randstrahlen AD und BD eine halbe Wellenlänge, dann müssen diese Randstrahlen sich aufheben, da sie genau entgegengesetzte Phase haben [§ 64], die dazwischenliegenden Strahlen aber nicht; es wird daher auch in D Helligkeit herrschen, wenn auch geringere als in C . In E dagegen, wo die Randstrahlen AE und BE mit einer Wegdifferenz von einer ganzen Wellenlänge ankommen mögen, muß Dunkelheit herrschen. Denn wenn F die Mitte von AB vorstellt, so heben sich die Strahlen AE und FE gegenseitig auf, und ebenso der Reihe nach die zwischen AF und FB liegenden Strahlen, da immer für je zwei derselben ein Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge besteht. Weiter muß an der Stelle, wo die Randstrahlen mit einem Gangunterschied von $\frac{3}{2}$ Wellenlängen ankommen, wieder Helligkeit herrschen. Denkt man sich nämlich das betreffende Strahlenbündel in drei Teilbündel zerlegt, deren Randstrahlen je um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge differieren, so müssen nach dem eben Gesagten die beiden ersten Teilbündel sich

¹ Der Einfachheit wegen sind in der Figur die Strahlenbündel bereits vom Spalt AB an konvergent gezeichnet, obwohl sie in Wirklichkeit vom Spalt bis zur Linse aus parallelen Strahlen bestehen.

gegenseitig aufheben, so daß das dritte Teilbündel allein zur Geltung kommt; auf dem Schirm entsteht also wieder Helligkeit, wenn auch geringere als in *C*, weil ja nur $\frac{1}{3}$ der Strahlen wirksam ist. So ergibt sich ganz allgemein, daß auf dem Schirm helle bzw. dunkle Stellen entstehen müssen, je nachdem der Gangunterschied der dort ankommenden Randstrahlen eine ungerade bzw. gerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt. Besonders schöne Beugungserscheinungen erhält man durch zahlreiche eng nebeneinander liegenden Spalten, sog. Gitter. Eine Art derselben wird z. B. dadurch hergestellt, daß man mit einem Diamanten feine parallele Striche in Glas einritz (300 bis 1700 auf 1 mm); hier wirken die geritzten, matt gewordenen Stellen wie undurchsichtige Schirme, und die Stellen zwischen zwei Strichen entsprechen einem Spalt. Die entstehenden Interferenzstreifen sind um so breiter und deutlicher, je größer die Wellenlänge der betreffenden Strahlen und je schmaler der Spalt ist. Verwendet man weißes Licht anstelle des einfarbigen, so entstehen, entsprechend dem im § 138 Gesagten, auch bei der Interferenz durch Beugung farbige Streifen (abgesehen von der weißbleibenden Mitte). Man erhält mit anderen Worten sog. Beugungs- oder Gitterspektren. Diese unterscheiden sich von den durch Prismen erzeugten (Dispersions-) Spektren dadurch, daß hier die Ablenkung der einzelnen Lichtstrahlen unabhängig von der Substanz und genau proportional der Wellenlänge ist (Blau wird z. B. am schwächsten abgelenkt). Man bezeichnet sie daher auch als Normalspektren und benutzt sie zur bequemen und genauen Messung der Wellenlänge von Lichtstrahlen.

Weitere Beugungserscheinungen sind z. B. das Schillern von Spinnfäden, das Erscheinen farbiger Ringe um Flammen, die man durch angelaufene Fensterscheiben betrachtet, die sog. Höfe der Sonne und des Mondes usw. Eine wichtige Rolle spielen Beugungserscheinungen auch bei der

Bildentstehung im Mikroskop. Da ein mikroskopisches Objekt nicht selbstleuchtend ist, sondern erst mittels durchfallenden Lichts sichtbar gemacht wird, und da in ihm zahlreiche enge lichtdurchlässige Stellen mit lichtundurchlässigen abwechseln, so wirkt es optisch wie eine Vielheit von neben- und übereinander liegenden komplizierten Gittern. Außerdem findet auch eine Beugung im Objektiv statt, die um so mehr ausgesprochen ist, je kleiner sein Durchmesser, also je stärker die Vergrößerung ist. Auf diesen Beugungserscheinungen beruht es, daß das Bild eines Objektpunktes nicht ebenfalls punktförmig, sondern scheibenförmig verbreitert erscheint. Infolgedessen können zwei Punkte des Objekts, die so nahe aneinander liegen, daß ihre scheibchenförmigen Bilder sich teilweise decken, nicht getrennt erkannt werden, mag man auch noch so scharfe Vergrößerungen anwenden. Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops hat also eine bestimmte Grenze, die nach **ABBE** und **HELMHOLTZ** dann erreicht ist, wenn der Abstand zweier Punkte im Objekt ca. 1 Wellenlänge (bei schiefer Beleuchtung ca. $\frac{1}{2}$ Wellenlänge) des angewandten Lichtes beträgt. Man kann nun das Auflösungsvermögen einmal dadurch steigern, daß man sehr kurzwelliges Licht (blaues, violettes, ultraviolettes;

letzteres nur für Mikrophotographie) anwendet. Das zweite, für die Praxis vornehmlich in Betracht kommende Mittel ist die Benutzung von Immersionssystemen, da in solchen, als optisch dichteren Medien die Lichtgeschwindigkeit, somit auch die Wellenlänge kleiner ist als in Luft [§ 116]. Ist λ die Wellenlänge des angewandten Lichts, n der Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit, so wird in dieser die Wellenlänge $\lambda:n$. Die äußerste Grenze des Auflösungsvermögens ist gegenwärtig die Erkennung von zwei Punkten, deren Abstand im Objekt $0,1 \mu$ beträgt (Untersuchung mit ultraviolettem Licht von $350 \mu\mu$ Wellenlänge und mit numerischer Apertur 1,66).

Ultramikroskopie. Dunkelfeldbeleuchtung. In neuester Zeit hat man gelernt, auch Teilchen sichtbar zu machen, die jenseits des mikroskopischen Auflösungsvermögens liegen. Diese **Ultramikroskopie** beruht auf dem Prinzip der **Dunkelfeldbeleuchtung**, wobei die Objekte hell auf dunklem Grunde erscheinen und eben infolge der dadurch gesteigerten Kontrastwirkung noch zur Wahrnehmung kommen, wo die gewöhnliche Hellfeldbeleuchtung versagt. Bei dieser Methode erfolgt die Abbildung nicht mittels direkter Beleuchtungsstrahlen, sondern durch Strahlenbüschel, die an den Teilchen des Objekts eine Beugung erfahren und so ins Gesichtsfeld gelangen. Um dies zu erreichen, gibt es verschiedene Mittel. Bei dem zuerst konstruierten Ultramikroskop (SIEDENTOPF und ZSIGMONDY 1903) wird das Licht einer seitlich stehenden sehr starken Lichtquelle L (Fig. 113) durch einen Kondensator im Objekt konzentriert,

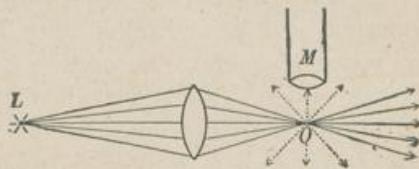


Fig. 113.

so daß also die direkten Beleuchtungsstrahlen annähernd rechtwinklig zur Mikroskopachse verlaufen und nur die (gestrichelt gezeichneten) Beugungsbüschel ins Mikroskop gelangen. Das hier angewandte Prinzip ist analog demjenigen, das dem Sichtbarwerden der „Sonnenstäubchen“ zugrunde liegt. Diese in der Luft suspendierten feinsten Staubteilchen werden ja in einem Bündel Sonnenstrahlen, das in einen nicht zu hellen Raum eintritt, auch nur dadurch sichtbar, daß das von ihnen abgebeugte Licht ins Auge des seitlichen Beobachters gelangt. Man kann aber Dunkelfeldbeleuchtung auch bei axial einfallendem Licht erreichen, wenn man z. B. im Beleuchtungsapparat oder im Objektiv Zentralblenden anbringt und, zur vollständigen Ausschaltung der direkten Beleuchtung, auch noch die seitlich eindringenden Strahlen durch Totalreflexion an der Oberfläche des Deckgläschens beseitigt. Sehr zweckmäßig hierfür sind die sog. **Spiegelkondensoren**, bei denen die Beleuchtungsstrahlen nach dem Objekt nur durch Spiegelung hingeleitet werden. Fig. 114 zeigt z. B. schematisch den Kardioidkondensator der Firma ZEISS. P ist ein Glaskörper mit parabelartig gekrümmten Seitenflächen, J die Immersionsschicht, O der Objektträger, auf dem das Präparat mit Deckgläschen liegt. B ist eine Zentralblende, welche Strahlen von der Apertur 0 bis 1,1 abhält. Die ausgezogene Pfeillinie stellt den Verlauf eines beleuchtenden Strahles vor, der an den Seitenflächen des Kondensors sowie im Deckgläschen total

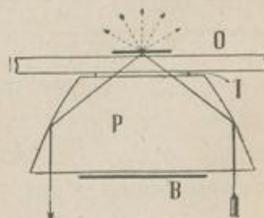


Fig. 114.

reflektiert wird. Von den beleuchteten Stellen des Präparates gehen dann wieder Beugungsbüschel (gestrichelt gezeichnet) in das Mikroskop. — Mittels Dunkelfeldbeleuchtung kann man noch Teilchen erkennen, deren Durchmesser bis zu herab zu $4\ \mu\mu$ beträgt¹, vorausgesetzt, daß der Abstand zweier Teilchen dem Auflösungsvermögen des Mikroskops entspricht. Das Sichtbarwerden der Teilchen beruht, wie erwähnt, auf Entstehung von hellen Beugungslichtscheibchen. Diese geben durchaus keinen Aufschluß über die wahre Form und Größe der Teilchen, erlauben aber ihr Vorhandensein und ihre Bewegung, event. auch ihre Zahl festzustellen. Die ultramikroskopische Anwendung der Dunkelfeldbeleuchtung ist daher sehr wichtig zum Studium von nicht homogenen Medien (z. B. durch Goldteilchen gefärbte Rubingläser, Kolloide in Lösungen und Zellen), zur Beobachtung der BROWN'schen Molekularbewegung (zitternde Bewegung kleinster in Flüssigkeiten suspendierter Teilchen, hervorgerufen durch Anprall der Flüssigkeitsmoleküle, die sich analog den Gasmolekülen bewegen) usw. Aber auch für mikroskopische Untersuchungen im engeren Sinne ist die Dunkelfeldbeleuchtung wertvoll, da infolge der starken Kontrastwirkung feinste Objekte (z. B. Spirochaeten, Bakteriengeißeln) auch ungefärbt gut wahrgenommen werden können.

§ 141. **Begriff der Polarisation.** Polarität wird die Eigenschaft genannt, daß zwei Enden eines Körpers, die Pole (man denke z. B. an einen Magneten), besondere Eigenschaften gegenüber den anderen Seiten haben. Nach der üblichen Anschauung pflanzt sich nun das Licht durch transversale Ätherschwingungen fort, und zwar so, daß die Ätherteilchen in allen möglichen Ebenen — immer senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung — pendeln. Ein gewöhnlicher Lichtstrahl, dessen Achse senkrecht auf der Ebene des Papiers steht, würde also auf dem Querschnitt etwa ein Bild ergeben, wie es Fig. 115a andeutet. Demgegenüber schwingen beim geradlinig polarisierten Lichte, dessen Querschnitt Fig. 115b zeigt, alle Ätherteilchen nur in einer Ebene, ebenfalls senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung; diese Ebene heißt Schwingungsebene, die zu ihr senkrechte Polarisationssebene². Man erhält geradlinig (oder linear) polarisiertes Licht aus gewöhnlichem durch Doppelbrechung, ferner durch Spiegelung und einfache Brechung (s. u.).

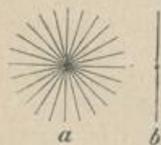


Fig. 115.

§ 142. **Doppelbrechung.** Die Kristalle aller Systeme, mit Ausnahme des regulären, sind anisotrop³, d. h. sie haben in verschiedenen, und zwar besonders in zwei zueinander senkrechten Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften (Dichte, Elastizität,

¹ Der Durchmesser von Wasserstoffmolekülen ist berechnet worden auf $0,1\ \mu\mu$, von Alkoholmolekülen auf $0,5\ \mu\mu$, von Molekülen der löslichen Stärke auf $5\ \mu\mu$. Vgl. auch die Zusammenstellung über Lichtwellenlängen im § 135.

— ² Bisweilen wird auch die Schwingungsebene als Polarisationssebene bezeichnet und umgekehrt. — ³ α privativum, ἴσος gleich, τρόπος Richtung, Einrichtung.

Wärmeleitungsvermögen usw.). So ist auch in diesen beiden Richtungen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts verschieden groß, und dadurch ist eine Doppelbrechung bedingt, d. h. ein auffallender Strahl teilt sich im Kristall in zwei Strahlen, die Gegenstände werden daher doppelt gesehen. Der eine von beiden Strahlen folgt dem SNELLIUSschen Gesetze [§ 116] und heißt daher der ordentliche, während dies beim außerordentlichen nicht der Fall ist. Beide sind polarisiert, und zwar so, daß ihre Schwingungsebenen senkrecht zueinander sind; kurz ausgedrückt, sie sind zueinander senkrecht polarisiert. Alle doppelbrechenden Kristalle haben nun eine oder zwei Symmetrieachsen; in den senkrecht durch diese gelegten Ebenen sind die physikalischen Eigenschaften (also auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes) gleich, dagegen verschieden von denjenigen in der Richtung der Achsen selbst. Wenn sich also Licht in der Richtung dieser Achsen fortpflanzt, werden sich die Ätherschwingungen des ordentlichen und außerordentlichen Strahles, die ja in dazu senkrechten Ebenen (und senkrecht zueinander) erfolgen, nach dem eben Gesagten gleich schnell fortpflanzen; mit anderen Worten, es tritt dann keine Doppelbrechung ein. Diese Richtungen, auch optische (Haupt-) Achsen genannt, fallen bei den optisch einachsigen Systemen, zu denen das quadratische und hexagonale gehört, mit der kristallographischen Hauptachse zusammen oder sind ihr parallel; bei den optisch zweiachsigen dagegen, wo die Verhältnisse überhaupt viel komplizierter sind, ist dies nicht der Fall. Jede Ebene, die durch einen Kristall so gelegt ist, daß die optische Achse in sie fällt, sowie jede dazu parallele Ebene heißt Hauptschnitt. Zu den optisch einachsigen Kristallen gehört z. B. der Kalkspat, wegen seiner Doppelbrechung auch isländischer Doppelspat genannt; er kristallisiert in Rhomboëdern. Bei seiner Grundform sind zwei gegenüberliegende Ecken (a und c Fig. 116) vor den anderen dadurch ausgezeichnet, daß alle drei hier zusammenstoßende Winkel stumpfe sind. Verbindet man diese Ecken, so erhält man die kristallographische Hauptachse ac , die zugleich optische Achse ist; $abcd$ ist ein Hauptschnitt. Während also in der Richtung der optischen Achse keine Doppelbrechung eintritt, muß dies in allen anderen

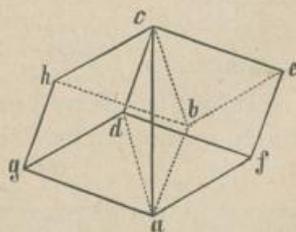


Fig. 116.

Richtungen der Fall sein, weil eben dann die beiden Komponenten, in die das Licht zerlegt wird, ungleiche Geschwindigkeit besitzen. Hat der ordentliche Strahl eine kleinere Geschwindigkeit als der außerordentliche, wird er also stärker gebrochen, so heißt der betreffende Kristall optisch negativ, im anderen Falle positiv.

§ 143. **Polarisation durch Doppelbrechung.** Wie oben gezeigt, bietet die Doppelbrechung ein bequemes Mittel, polarisiertes Licht zu erhalten. Da aber die Schwingungsebenen des ordentlichen und außerordentlichen Strahles aufeinander senkrecht stehen, durch ihre Vereinigung nach Austritt aus dem Kristall also die Polarität fortfallen würde, so muß einer dieser Strahlen beseitigt werden. Beim Turmalin z. B., einem rötlich bis grünen Kristall, geschieht dies von selbst durch Absorption des ordentlichen Strahls. Es tritt hier also nur ein polarisierter Strahl heraus und dieser schwingt in der Richtung der optischen Achse; durch Turmalinplatten, die parallel zur optischen Achse geschliffen sind, also einen Hauptschnitt vorstellen, gehen somit nur diejenigen Komponenten eines gewöhnlichen Lichtstrahls durch, die parallel der optischen Achse schwingen. Eine solche Turmalinplatte dient dazu, um gewöhnliches Licht zu polarisieren, heißt daher Polarisator. Legt man eine zweite Turmalinplatte von gleicher Beschaffenheit so auf die erste, daß die Achsen parallel sind, so können die durch die erste gegangenen Lichtstrahlen auch die

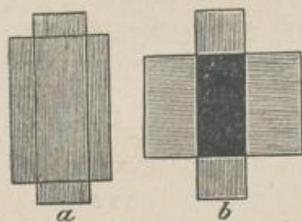


Fig. 117.

zweite passieren; blickt man also durch die Platten, so ist das Gesichtsfeld hell. Legt man sie aber mit gekreuzten Achsen aufeinander, so muß das Gesichtsfeld dunkel sein, weil ja immer nur parallel der Achse schwingende Strahlen durchgehen können (Fig. 117). Zwischen diesen Extremen gibt es natürlich Übergänge (s. u.). Die zweite Platte dient zum Nachweis polarisierten Lichtes, weil ja gewöhnliches, das nach allen Richtungen schwingt, in jeder Stellung durch sie gehen würde; sie heißt daher Analysator. Zwei Turmalinplatten zusammen bilden einen vollkommenen Polarisationsapparat. Zweckmäßig verwendet man dazu die Turmalinzange, eine federnde Zange, die an ihren Enden zwei um ihre Achse drehbare Turmalinplatten trägt.

Häufiger als den Turmalin, der braun oder grün gefärbtes und dadurch geschwächtes Licht liefert, benutzt man zur Darstellung polarisierten Lichtes den Doppelspat in Form des NICOLSCHEN PRISMAS, kurz Nicol genannt.

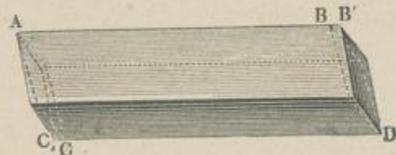


Fig. 118.

$AB'DC'$ (Fig. 118) sei ein natürliches Kalkspatrhomboëder, dessen durch die Kanten AB' und $C'D'$ gehende Hauptschnittebene in der Zeichnungsebene liegen möge (Fig. 119). Man schleift nun zunächst (entsprechend den punktierten Linien der Figur) die Endflächen so ab, daß sie mit den Kanten AB und CD Winkel von 68° statt wie ursprünglich

von 71°) bilden. $ABCD$ (Fig. 115) sei dann der neue Durchschnitt durch die Eckpunkte. Darauf wird der Kristall senkrecht auf diese Ebene AD und zugleich senkrecht auf die neuen Endflächen AC und BD durchsägt, so daß also zwei dreiseitige Prismen entstehen, und dann werden die Schnittflächen wieder in der alten Lage durch Kanadabalsam zusammengekittet.

Trifft nun ein Lichtstrahl ab (Fig. 119) auf die rhombische Vorderfläche des Prismas, so wird er in zwei Strahlen zerlegt. Da der ordentliche Strahl bc sich im



Fig. 119.

Doppelspat langsamer fortpflanzt als im Kanadabalsam, dieser mithin für ihn ein optisch dünneres Medium vorstellt, so wird er bei genügend

schrägem Auffall an der Balsamschicht total reflektiert und seitlich bei d in der dunklen Einfassung des Prismas absorbiert. Der außerordentliche Strahl bc' dagegen, der im Kristall rascher verläuft als im Balsam, geht unbehindert durch diesen und verläßt das Prisma bei d' parallel mit seiner ursprünglichen Richtung. Ein Nicol läßt also nur Strahlen hindurch, die ebenso schwingen wie der außerordentliche Strahl, d. h. parallel dem Hauptschnitt oder, was dasselbe ist, parallel

der kürzeren Diagonale seiner rhombischen Endflächen, wie Fig. 120, zeigt, die die Endfläche eines Nicols samt Fassung darstellt. PP ist die zur Schwingungsebene senkrechte Polarisationsebene. Je nachdem also die Achsen zweier Nicols parallel oder rechtwinklig gekreuzt sind, resultiert Helligkeit oder Dunkelheit, wie beim Turmalin. Ein Nicol kann natürlich ebenfalls sowohl als Polarisator wie als Analysator dienen.

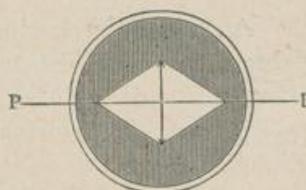


Fig. 120.

Bilden die optischen Achsen beider Nicols (bzw. Turmalinplatten) einen anderen Winkel als einen Rechten, sei z. B. MN (Fig. 121) die Richtung der Achse im ersten, PQ die im zweiten Nicol, so wird das durch den Polarisator tretende Licht, dessen Schwingungsrichtung und Amplitude OC sei, nach dem Parallelogramm der Kräfte in die Schwingungen OA und OB zerlegt, von denen nur erstere den Analysator passiert, da sie in dessen Hauptschnitt PQ fällt. Die Helligkeit des durchgelassenen Lichtes entspricht der Größe der Komponente $AO = OC \cos \alpha$, ist also proportional dem Kosinus des Winkels α .

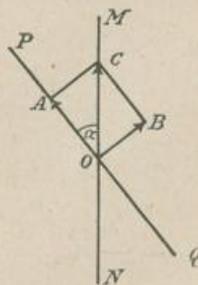


Fig. 121.

§ 144. **Polarisation durch Reflexion und einfache Brechung.** Gewöhnliches Licht wird auch durch Reflexion, ausgenommen an Metallspiegeln, in linear polarisiertes um-

gewandelt (MALUS). Und zwar ist die Polarisationssebene des reflektierten Lichts identisch mit der Einfallsebene; nach § 141 erfolgen also die Schwingungen senkrecht zu dieser

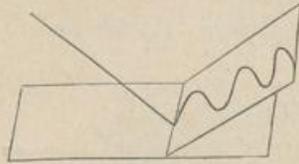


Fig. 122.

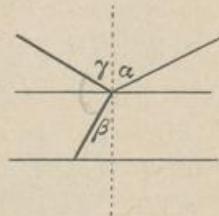


Fig. 123.

und parallel zur Oberfläche des Spiegels (Fig. 122). Gewöhnlich findet hierbei nur eine teilweise Polarisation statt; nur wenn der Einfallswinkel so groß ist, daß der reflektierte Strahl

mit dem gebrochenen einen rechten Winkel bildet, ist alles reflektierte Licht polarisiert (Gesetz von BREWSTER).

Die Größe dieses Polarisationswinkels hängt vom Brechungsindex [§ 116] ab. Dieser ist hier (Fig. 123) $\sin \alpha : \sin \beta$. Nun ist $\alpha = \gamma$ und $\beta + \gamma = R$. Also $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\cos \gamma} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$. Bei vollständiger Polarisation ist also die Tangente des Einfallswinkels gleich dem Brechungsindex. Weißes Licht kann durch Reflexion stets nur teilweise polarisiert werden, da seine Bestandteile verschiedene Brechungsindizes, somit auch verschiedene Polarisationswinkel haben.

Auch das durch eine Glasplatte hindurchgegangene, also einfach gebrochene, Licht ist teilweise polarisiert, und zwar steht bei der Brechung die Polarisationssebene senkrecht zu der Einfallsebene; die Schwingungen des Lichts erfolgen hier also parallel der Einfallsebene. Das so erhaltene polarisierte Licht ist aber wegen der Beimengung anderen Lichts sehr schwach; verstärkt wird es, indem man es durch mehrere Glasplatten hindurchgehen läßt, da hierbei das nicht polarisierte Licht durch wiederholte Reflexion beseitigt wird.

Die verschiedene Schwingungsrichtung des reflektierten und durchgelassenen Lichtes beruht darauf, daß Lichtstrahlen, deren Ätherteilchen senkrecht oder nur wenig geneigt zur Oberfläche der Glasfläche schwingen, leicht in diese eindringen können, während Strahlen, bei denen die Ätherschwingungen parallel zur Glasfläche erfolgen, reflektiert werden. Um einen rohen Vergleich zu gebrauchen, wird ja auch ein Messer, das mit der Spitze auf ein Brett fällt, in dieses leicht eindringen können; dagegen wird es zurückprallen, wenn es mit der Breitseite auffällt.

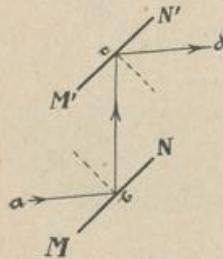


Fig. 124.

Man kann nach dem Gesagten auch zwei Spiegel als Polarisationsapparat benutzen. Fällt z. B. der Lichtstrahl ab unter dem Polarisationswinkel auf den Spiegel MN (Fig. 124), der hier

Polarisator ist, so wird er in der Richtung bc reflektiert, und gleich-

zeitig schwingen seine Teilchen alle senkrecht zur Einfallsebene. Bildet $M'N'$, der Analysator, denselben Winkel zur Achse, die hier mit dem Lichtstrahl bc zusammenfällt, so kann er nur dann bc vollständig reflektieren, wenn die Einfallsebene abc parallel zur Einfallsebene bcd ist. Dies ist aber nur der Fall, wenn $M'N'$ zu MN entweder so steht wie in der Figur oder aber (unter Beibehaltung seiner Neigung zur Achse bc) um 180° gedreht ist. Wird dagegen $M'N'$ um 90° bzw. 270° gedreht, so daß also jetzt die Einfallsebene bcd senkrecht zu abc steht, so wird kein Licht an $M'N'$ reflektiert. Dreht man also $M'N'$ einmal vollständig im Kreise herum, so findet für ein Auge in d viermal ein allmählicher Wechsel zwischen Hell und Dunkel statt. Benutzt man als Analysator einen Satz Glasplatten und beobachtet das durchgehende Licht, so sind die Erscheinungen analog, jedoch gerade umgekehrt.

§ 145. **Interferenz polarisierten Lichtes.** Polarisierte Lichtstrahlen zeigen nur dann Interferenzerscheinungen, wenn sie in einer Ebene schwingen. Derartige Interferenzerscheinungen treten z. B. auf, wenn man ein dünnes Gipsblättchen zwischen Polarisator und Analysator eines Polarisationsapparates bringt. Ein solches Gipsblättchen liefert durch Doppelbrechung¹ zwei senkrecht zueinander polarisierte Strahlen, die sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Durch den Polarisator in die Richtung ab (Fig. 125) gebrachte Lichtstrahlen werden also durch das Gipsblättchen in zwei Teilstrahlen zerlegt, die etwa in den Richtungen ef und gh schwingen [vgl. § 143, letzten Absatz], und diese Teilstrahlen am Analysator wieder in Komponenten nach den Richtungen ab und cd . Je nachdem nun der Analysator parallel oder senkrecht zum Polarisator steht, gehen nur die in der Richtung ab bzw. cd schwingenden Komponenten durch ihn hindurch. Jedenfalls haben aber die vorher rechtwinklig zueinander polarisierten Strahlen nach Passieren des Analysators dieselbe Schwingungsebene, und da sie ferner aus Komponenten bestehen, die infolge der Doppelbrechung einen Gang-, somit auch einen Phasenunterschied, abhängig von der Dicke des Gipsblättchens, besitzen, so werden sie sich durch Interferenz schwächen oder verstärken. Das Gesichtsfeld wird also bei Anwendung einfarbigen

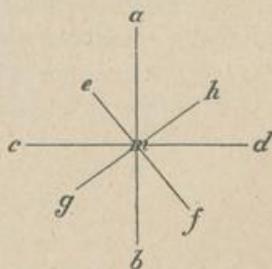


Fig. 125.

¹ Da in der Richtung der optischen Achsen keine Doppelbrechung stattfindet [§ 142], muß bei Anwendung parallelen Lichtes ein solches Gipsblättchen parallel zur optischen Achse geschnitten sein; bei Anwendung konvergenten Lichtes kann es dagegen auch senkrecht zur Achse geschnitten sein, da hier die schräg einfallenden Strahlen Doppelbrechung erleiden.

Lichtes mehr oder weniger hell erscheinen, als es ohne Zwischenschaltung des Gipsblättchens der Fall wäre. Benutzt man jedoch weißes Licht, so muß, da ja immer nur eine bestimmte Strahlenart (entsprechend ihrer Wellenlänge und der Dicke des Blättchens) geschwächt oder verstärkt wird, das Gesichtsfeld in einer bestimmten Farbe erscheinen¹.

In ähnlicher Weise entsteht in Platten optisch einachsiger Kristalle, die senkrecht zur Achse geschnitten sind, bei Anwendung konvergenter Lichtstrahlen zwischen gekreuzten Nicols ein System von hellen und dunklen bzw. farbigen Ringen, das von einem schwarzen Kreuz in der Richtung der Achsen des Polarisators und Analysators durchzogen ist; zwischen parallelen Nicols erscheinen die komplementären Farben und ein helles Kreuz. Bei optisch zweiachsigen Kristallen sind die Erscheinungen noch komplizierter.

Hierauf beruht auch das Polarisationsmikroskop, bei dem polarisiertes Licht konvergent gemacht wird, dann durch den zu untersuchenden Körper dringt und schließlich hinter dem Okular noch einen Analysator passiert. Es dient einmal zum Erkennen doppelbrechender Substanz, denn diese verrät sich durch ihren Farbenschein; ferner treten dadurch feinere Strukturunterschiede besser hervor.

§ 146. **Zirkulare Polarisation.** Während es sich bei den verschiedenen Interferenzerscheinungen um die Zusammensetzung von Strahlen handelte, welche dieselbe Schwingungsebene, aber verschiedene Phase hatten, betrachten wir nun die Zusammensetzung von Strahlen mit verschiedener Schwingungsebene. Zum besseren Verständnis sei fol-

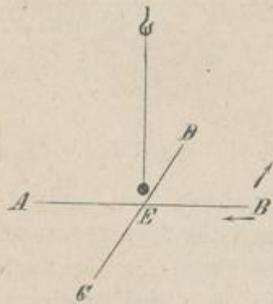


Fig. 126.

gendes vorausgeschickt: Wenn einem Pendel, das durch einen bestimmten Impuls zwischen A und B (Fig. 126) schwingt, gleichstarke Impulse senkrecht zu dieser Bahn an verschiedenen Stellen erteilt werden, so entstehen verschiedene Schwingungsformen. Ist z. B. das Pendel in B angelangt, hat es also von der Ruhelage E aus $\frac{1}{4}$ einer ganzen Schwingung (§ 33) zurückgelegt, und erhält es hier einen Impuls in der Richtung und Stärke von $ED (= EB)$, so wird eine Kreis-

bewegung nach links resultieren. Trifft der zweite Impuls das Pendel in Punkt A seiner Bahn, wo es $\frac{3}{4}$ einer ganzen Schwingung zurückgelegt hat, so entsteht analog eine Kreisbewegung nach rechts. Wirkt dagegen der zweite Impuls auf das Pendel in E ein, wenn es

¹ Die Farbenerscheinungen, die bei Interferenz polarisierten Lichtes auftreten, werden auch chromatische Polarisation genannt.

also seine Bewegung erst beginnt oder eine halbe bzw. ganze Schwingung zurückgelegt hat, so entsteht eine geradlinige Bewegung in diagonalen Richtung. Trifft endlich der zweite Impuls das Pendel auf der Strecke zwischen A und E bzw. E und B , so resultiert eine elliptische Bewegung. Genau dasselbe findet nun beim polarisierten Lichte statt. Wenn z. B. die beiden durch einen doppelbrechenden Körper hindurchgegangenen, senkrecht zueinander polarisierten Schwingungen sich wieder zusammensetzen, so hängt es allein von ihrem Gangunterschied ab, welche Form der Bewegung resultiert. Ist er $= 0$ oder beträgt er $\frac{1}{2}$ Wellenlänge oder ein Vielfaches davon, so entsteht geradlinig polarisiertes Licht; beträgt er $\frac{1}{4}$ Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches davon, so entsteht kreisförmig polarisiertes Licht, und für die Zwischenwerte elliptisch polarisiertes Licht. Für die beiden letzten Formen ist streng genommen die Bezeichnung „polarisiert“ nicht ganz passend, da ja z. B. kreisförmig polarisiertes Licht sich nach allen Richtungen gleich verhält. Es ist vom natürlichen Lichte nur dadurch zu unterscheiden, daß, wenn man den Gangunterschied seiner beiden Komponenten um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge erhöht oder erniedrigt, indem man es z. B. durch ein entsprechend dickes Glimmerblättchen („Viertelwellenblättchen“) schiebt, geradlinig polarisiertes Licht entsteht.

§ 147. **Drehung der Polarisationsebene.** Ebenso wie unter Umständen aus zwei geradlinigen Bewegungen eine kreisförmige entsteht, kann jede geradlinige Bewegung als Resultante zweier gleichgroßer, entgegengesetzt gerichteter Kreisbewegungen aufgefaßt werden. Wirken z. B. auf das Teilchen a (Fig. 127) zwei gleiche Impulse in der Richtung der Pfeile, so wird es den Weg ab beschreiben. Setzt aber der nach links gerichtete Impuls später ein, wenn a schon in a' ist, oder wirkt er schwächer als der nach rechts gerichtete, dann resultiert die Schwingungsrichtung $a'b'$ [vgl. § 16, 1]. In der Tat findet nun beim Quarz und einigen anderen festen Körpern, besonders aber bei vielen Flüssigkeiten (z. B. Lösungen von Zucker, Dextrin, Kampfer, Weinsäure, ätherische Öle usw.) eine Zerlegung geradlinig polarisierten Lichts in zwei entgegengesetzt kreisförmige Bewegungen statt¹. Und da sich hierbei letztere ungleich schnell fortpflanzen, so wird, wenn sie sich wieder zu geradlinig polarisiertem Lichte vereinigen, das letztere in einer anderen Ebene schwingen, die Polarisationsebene wird also, wie man sagt, durch diese optisch aktiven Substanzen gedreht sein, z. B. nach

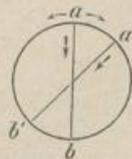


Fig. 127.

¹ Als Ursache nimmt man Besonderheiten im inneren Bau der Kristallteilchen bzw. Flüssigkeitsmoleküle an.

rechts (wie beim Rohrzucker usw.), wenn die rechts herum gehende kreisförmige Bewegung sich schneller fortpflanzt. Diese Drehung der Polarisationssebene ist für die verschiedenen Lichtstrahlen verschieden groß; sie nimmt vom Rot zum Violett zu. Für ein und dieselbe Farbe ist sie proportional der Dicke der benutzten Quarzplatte bzw. bei Flüssigkeiten proportional der Dicke ihrer Schicht und ihrer Konzentration. Man kann daher auf diese Weise den Gehalt von Lösungen an optisch aktiven Stoffen ermitteln. Die hierzu benutzten Polarisationsapparate heißen Polarimeter oder Polaristrobometer¹; dienen sie speziell zur Zuckerbestimmung, auch Saccharimeter².

Durch eine l dm lange Schicht einer Zuckerlösung, die in 100 ccm z gr Zucker enthält, wird die Polarisationssebene des Lichtes z. B. für das gelbe Natriumlicht um den Winkel $\alpha = 0,665^\circ \cdot z \cdot l$ gedreht. Ist α bekannt, so ergibt sich daraus ohne weiteres z . Bei den einfachsten Saccharimetern wird nun die Zuckerlösung zwischen gekreuzte Nicols gebracht, wodurch (bei Anwendung einfarbigen Lichtes) das bisher dunkle Gesichtsfeld heller wird. Dreht man hierauf den Okular-Nicol so lange, bis das Gesichtsfeld wieder dunkel geworden ist, so ist dadurch der Drehungswinkel α bekannt. Genauere Resultate erhält man, wenn man zwischen beide Nicols eine Doppelquarzplatte einschaltet. Diese besteht aus zwei aneinandergelagerten, gleichdicken, senkrecht zur optischen Achse geschliffenen Quarzplatten, von denen eine rechts-, die andere linksdrehend ist. Beide Platten erscheinen sowohl bei gekreuzten wie bei parallelen Nicols gleich hell (bzw. bei Anwendung weißen Lichtes gleich

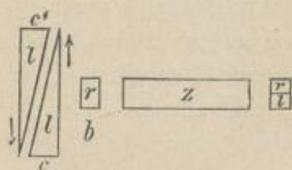


Fig. 128.

gefärbt); nach Zwischenschaltung der Zuckerlösung werden sie dagegen ungleich. Der Winkel, um den der Okular-Nicol gedreht werden muß, damit sie wieder gleich werden, entspricht wieder α . Beim SOLEILSchen Saccharimeter bleibt der Okular-Nicol parallel zum Polarisator stehen; hier wird ein sog. Kompensator benutzt, um die Größe der Drehung zu bestimmen. Ein solcher besteht aus einer rechtsdrehenden Quarzplatte b (Fig. 128)

und zwei linksdrehenden Quarzkeilen c, c' . Letztere können so gegeneinander verschoben werden, daß ihre (genau durch eine Mikrometerschraube meßbare) gemeinsame Dicke gleich, größer oder kleiner wird, als die von b . Da nun das Drehungsvermögen einer 1 mm dicken Quarzschicht bekannt ist, so ergibt sich daraus der optische Effekt derjenigen Zuckerlösung, welcher durch den Kompensator das Gleichgewicht gehalten wird.

Magnetismus.

§ 148. **Definition.** Magnetismus³ wird die ihrem Wesen nach noch nicht genau erforschte Kraft genannt, welche Körper befähigt,

¹ *στροβός* das Herumdrehen im Kreise. — ² *saccharum* Zucker. —

³ Etymologie unsicher; entweder nach dem sagenhaften Hirten MAGNES, oder nach der Landschaft *Magnesia*, oder von *μάγω* bezaubern.