

Alaun, und fast gar nicht Eis. Ferner ist z. B. die Diathermanität des durchsichtigen Bergkristalls gleich der des wenig durchsichtigen Rauchtropases. Wie man nun Licht in verschiedene Farben zerlegen kann, die durch Körper in verschiedenem Maße gehen, so kann auch Wärme durch ein Steinsalzprisma in Strahlen von verschiedener Wellenlänge zerlegt werden. Man spricht daher analog von „Wärmefarben“ und nennt diese Eigenschaft der Wärme *Thermochrose*¹. Mit anderen Worten, die Wärmedurchlässigkeit hängt auch von der Qualität der Wärme ab. Über das Verhältnis der Emission zur Absorption gilt das KIRCHHOFF'sche Gesetz, daß ein Körper genau die Strahlen absorbiert, die er selbst aussenden kann. Darauf soll bei der Optik näher eingegangen werden, ebenso wie auf die Erscheinungen der Brechung, Polarisierung und Interferenz der Wärmestrahlen, welche genau den Verhältnissen beim Lichte entsprechen.

Optik.

A. Ursprung und Ausbreitung des Lichtes.

§ 105. **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 etc. hervorgebracht wird, dann aber besonders — im physikalischen Sinne ausschließlich — das Agens selbst, welches diese Empfindung vorzugsweise auslöst. Über die Natur dieses letzteren bestehen verschiedene Ansichten. Nach der Emanations- oder Emissionstheorie² NEWTON's ist das Licht ein äußerst feiner Stoff, der von den leuchtenden Körpern ausgesandt wird. Nach der jetzt fast allgemein akzeptierten Undulationstheorie von HUYGENS entsteht es ebenso wie Wärme durch außerordentlich schnelle Schwingungen der Körpermoleküle, die durch transversale Ätherschwingungen fortgepflanzt werden. Nach der Auffassung von MAXWELL, die immer mehr an Einfluß gewinnt, ist diese wellenförmige Fortpflanzung ihrerseits durch elektromagnetische Vorgänge bedingt [cf. § 190].

¹ *χρῶμα* Farbe.

² *emano* ausfließen, *emitto* aussenden.

§ 106. **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, bei der dunklen Wärme 20—400 Billionen) als Licht empfunden werden, heißen selbstleuchtend. Von Himmelskörpern gehören außer der Sonne nur noch die Fixsterne dazu, während z. B. die Planeten nur dadurch sichtbar sind, weil sie das Sonnenlicht reflektieren. Besonders stark wird die Lichtentwicklung, wenn mit der Erwärmung auch eine lebhafte 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 Gasflamme auf den weißglühenden Kohlenstoffteilchen [cf. Bunsenbrenner § 52]. Manche Körper senden aber schon bei gewöhnlicher oder nicht sehr erhöhter Temperatur Licht aus (Lumineszenz¹). Hierher gehört das 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 mit diesem Namen auch das Nachleuchten gewisser Körper, nachdem sie einer starken Belichtung ausgesetzt waren [cf. § 134].

§ 107. **Ausbreitung des Lichtes. Schatten.** Das Licht breitet sich im allgemeinen von einem leuchtenden Punkte nach allen Seiten hin geradlinig 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.

¹ *luminesco* leuchten.

² *φωσφόρος* Lichtträger.

Da ein undurchsichtiger Körper die Ausbreitung des Lichtes stört, muß hinter ihm eine Schattenzone entstehen. Bei einer gewissen

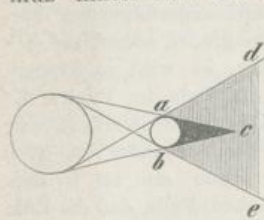


Fig. 62.

Größe der Lichtquelle unterscheidet man den Kernschatten abc (Fig. 62), der gar kein Licht erhält, vom Halbschatten $dacbe$, der teilweise beleuchtet wird. Die Form beider ist durch

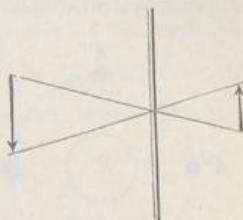


Fig. 63.

die geradlinige Ausbreitung des Lichtes bedingt. Ebenso beruht darauf die Erscheinung der optischen Kammer. Dringt nämlich Licht von einem Gegenstande aus durch einen schmalen Spalt in einen dunklen Raum, so entsteht auf einer gegenüberstehenden Wand ein umgekehrtes Bild desselben (Fig. 63).

§ 108. **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 Photometer, Apparate zur Messung der Lichtstärke. Denn aus der leicht zu messenden Entfernung, die 2 Lichtquellen haben müssen, um dieselbe Wirkung zu erzielen, ist nach diesem Gesetze das Verhältnis ihrer Intensität ohne weiteres zu berechnen. Bei dem RUMFORD'schen Photometer werden die beiden zu vergleichenden Lichtquellen so aufgestellt, daß die von ihnen auf einen Schirm geworfenen 2 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) Lichteinheit, gew. als Normkerze (NK) bezeichnet, benutzt man das Licht der v. HEFNER-ALTENECK'schen Amylazetatlampe bei 40 mm Flammhöhe.

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.

§ 109. **Lichtgeschwindigkeit.** Das Licht pflanzt sich mit großer Schnelligkeit fort. Es durchläuft in 1 Sekunde 300 000 km oder 40 000 Meilen. Die erste Bestimmung rührt von OLAF RÖMER her.

Befindet sich die Erde zwischen Sonne und Jupiter, etwa in E (Fig. 64),
Guttmann, Grundriß der Physik. 3. Aufl. 6

so verstreichen ungefähr $42\frac{1}{2}$ Stunden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsterungen eines der vier Jupitermonde. Entfernt sich die Erde vom Jupiter, so wird das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ver-

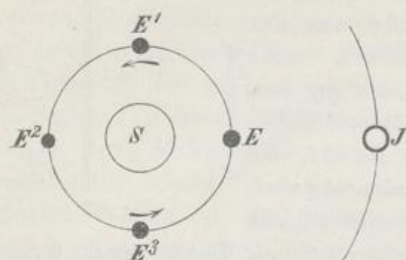


Fig. 64.

finsterungen größer, nähert sie sich dem Jupiter, so wird es kleiner. Ist z. B. die Erde im Punkte E^2 ihrer Bahn, so tritt die Verfinsterung desselben Jupitermondes ca. 1000 Sekunden später ein als in dem (hypothetischen) Falle, daß die Erde in E stehen geblieben wäre. 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, 296 300 000 km, weiter vom Jupiter entfernt ist als im ersten Falle.

Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich dann nach der Formel $v = \frac{s}{t}$ zu 296 300 km in 1 Sekunde.

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

Stände nämlich die Erde still, so würde das Licht des Fixsterns a (Fig. 65) in gerader Linie die Netzhaut des Beobachters, etwa in b , treffen.

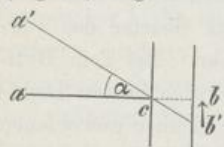


Fig. 65.

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 $b'c$ in derselben Zeit zurück, wie die Erde den Weg $b'b$. Es ist also v' (Geschwindigkeit des Lichtes): v (Geschwindigkeit der Erde) = $b'c : b'b = \frac{1}{\sin \alpha}$. 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 45° zu dessen Achse geneigte unbelegte Glasplatte ein seitlich hereinkommendes Lichtbündel so reflektieren, daß es in die Achse des Fernrohrs fiel und durch die Lücken eines daselbst befindlichen exzentrisch angebrachten Zahnrades hindurch zu einem ca. $8\frac{1}{3}$ km entfernten Fernrohr sich fortpflanzte, in diesem an einem Spiegel reflektiert wurde, wieder durch die Zahnücken hindurchging und schließlich ins Auge des Beobachters am hinteren Ende des ersten Fernrohrs 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

¹ *aberro* abirren, abweichen.

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 $16\frac{2}{3}$ km zurück, woraus sich eine Geschwindigkeit zu $18000 \cdot 16\frac{2}{3} = 300000$ km ergab.

B. Reflexion des Lichtes (Katoptrik).

§ 110. **Allgemeine Gesetze der Reflexion.** Körper mit rauhen Oberflächen zerstreuen das auf sie fallende Licht nach allen Seiten und werden dadurch selbst sichtbar (z. B. Mond, Planeten etc.). 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 nun 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 virtuell 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 die Metallspiegel vorzuziehen. — Die Hauptsätze der Reflexion sind noch einmal folgende [cf. § 63]:

- 1) Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene.
- 2) Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

§ 111. **Planspiegel.** 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

¹ *virtus* Kraft, Wirkung; also Phänomene, die wie Bilder wirken, ohne durch Vereinigung von Lichtstrahlen entstanden zu sein.

Ein Auge in c (Fig. 66) erblickt den Gegenstand a , wenn es in die Richtung cb sieht, 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.

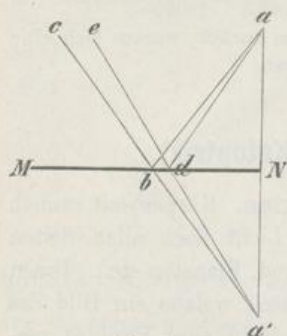


Fig. 66.

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 Magnetnadel 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.

Es sei (Fig. 67) 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 $\angle \delta = \angle ab'd$

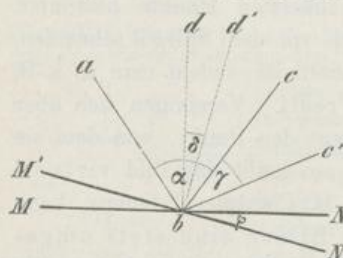


Fig. 67.

— $\angle ab'd = \frac{\alpha + \gamma}{2} - \frac{\alpha}{2} = \frac{\gamma}{2}$.

Ähnlich ist das Prinzip des Spiegelsextanten, welcher dazu 2 Gegenstände mit dem Auge des Beobachters bilden, ohne daß dieser fest zu stehen braucht. Er ist daher z. B. unentbehrlich für die See.

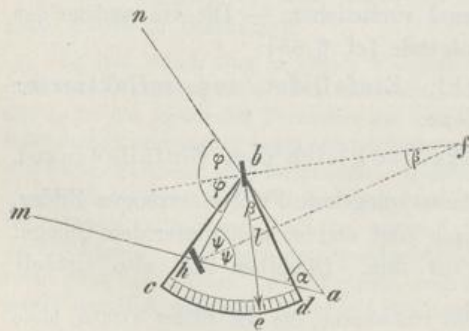


Fig. 68.

Es seien z. B. m und n (Fig. 68) zwei Sterne, deren Sehwinkel 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 zugleich 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 Schwinkels α . Errichtet man nämlich in b und h die Einfallslote und verlängert 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 $\alpha = 2\beta$.

§ 112. **Sphärische Spiegel.** Den Planspiegeln stehen die gekrümmten gegenüber, die entweder konkav (Hohlspiegel) oder konvex sind. Hier sollen nur die kugelförmig gekrümmten betrachtet werden. Der Mittelpunkt c (Fig. 69) der Kugel, zu welcher ein solcher Spiegel vervollständigt werden kann, heißt geometrischer oder Krümmungsmittelpunkt, die Mitte o der spiegelnden Fläche optischer Mittelpunkt oder Scheitel, die Verbindungslinie beider Hauptachse. Zieht man von den Punkten, in denen zwei Strahlen den Spiegel treffen, die Radien, so heißt der Winkel zwischen diesen die Öffnung (Apertur) des Spiegels. Jeder Strahl, der durch den geometrischen Mittelpunkt geht, also auch die Hauptachse, heißt Hauptstrahl und wird in sich selbst 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. Bezeichnet man nun die Entfernung eines Gegenstandes vom Spiegel mit a , die seines Bildes mit b , die des Brennpunkts (die sog. Brennweite) mit f , so gilt ganz allgemein das Gesetz:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

d. h. die Größe des Bildes verhält sich zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

§ 113. **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

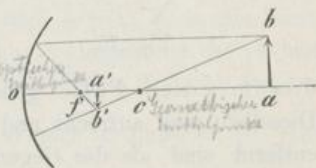


Fig. 69.

den Spiegel nach der Reflexion in paralleler Richtung. Hierauf beruht die Anwendung von Hohlspiegeln in Leuchttürmen etc. Ist der Gegenstand zwischen Unendlichkeit und geometrischem Mittelpunkt, so liegt das Bild zwischen diesem und dem Brennpunkte. Auch hier ist wieder die Umkehrung möglich. Überhaupt sind Bild- und Gegenstand einander stets konjugiert¹, d. h. sie können miteinander vertauscht werden. Ist der Gegenstand im geometrischen Mittelpunkte, so muß auch das Bild dort liegen. In diesen fünf ersteren 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

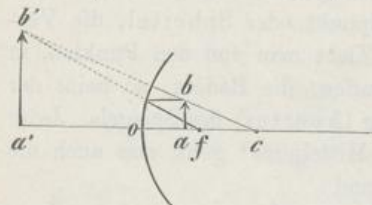


Fig. 70.

um so weiter 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. 70). Darauf beruht die Anwendung von Hohlspiegeln als Barbierspiegel etc.

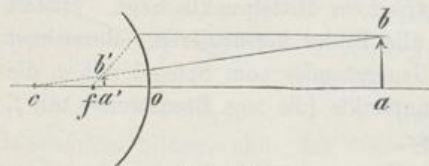


Fig. 71.

hier Bild- und Brennweite negativ sind, so nimmt das Spiegelgesetz die Form an $\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$, oder anders geschrieben

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f}$$

Daraus folgt $b < a$, d. h. das Bild ist stets dem Spiegel näher als der Gegenstand, mithin auch kleiner.

¹ *conjungo* mit einander verbinden.

§ 114. **Bilder der Konvexspiegel.** Konvexspiegel erzeugen stets virtuelle, aufrechte, verkleinerte Bilder (Fig. 71), die um so kleiner sind, je weiter der Gegenstand vom Spiegel entfernt ist. Da

C. Brechung des Lichtes (Dioptrik).

§ 115. **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 [cf. § 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).

Dieses Verhältnis $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ entspricht dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in beiden Medien [§ 63] und wird auch Brechungsexponent (-koeffizient, -index) genannt. Der Brechungsexponent eines Körpers gegen den leeren Raum heißt absoluter Br. Da nun nach der Wellenlehre die Lichtgeschwindigkeit beim Übergang in dichtere Medien kleiner wird¹⁾, so wird $n > 1$, d. h. der Lichtstrahl wird dem Einfallslot zu gebrochen. Umgekehrt ist es beim Übergange in ein dünneres Medium. Geht also z. B. Licht aus Luft in Wasser, so ist $n = \frac{4}{3}$, geht es aus Wasser in Luft, $= \frac{3}{4}$. Dies gilt aber nur für schräge Strahlen, senkrecht auffallende gehen ungebrochen weiter.

Auf der Brechung beruht es z. B., daß Gegenstände im Wasser der Oberfläche näher zu liegen scheinen. Wenn nämlich von b (Fig. 72) 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 verschiedenen 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.

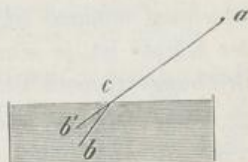


Fig. 72.

§ 116. **Totale Reflexion.** Beim Übergange aus einem dichteren in ein dünneres Medium ist der Brechungswinkel größer als der Ein-

¹ 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 Gegenteil behauptet.

fallswinkel. Fallen die Strahlen schräg genug auf die Grenzfläche, so wird also der gebrochene Strahl parallel der Oberfläche verlaufen,

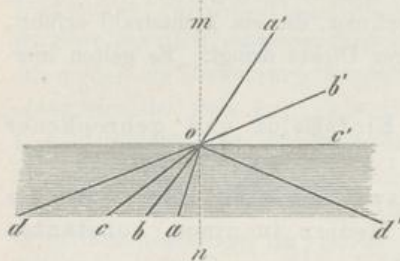


Fig. 73.

z. B. coc' (Fig. 73), 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 vollkommensten

Spiegel darstellen. Für Wasser und Luft beträgt der sogenannte Grenzwinkel, d. i. derjenige, von dem an totale Reflexion stattfindet, ca. 48° .

§ 117. **Brechung durch Prismen.** Geht Licht durch einen Körper, der von parallelen Flächen begrenzt ist und beiderseits an dasselbe (dünnere) Medium stößt, so werden die Strahlen an der

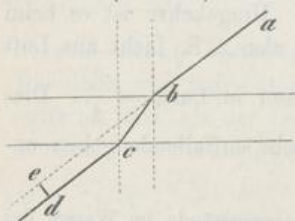


Fig. 74.

Vorderfläche um ebensoviele dem Einfallslote zu, wie an der Rückfläche von ihm ab gebrochen. Sie behalten also ihre ursprüngliche Richtung bei und werden nur parallel mit sich verschoben (Fig. 74). So sieht man z. B. auch durch Fensterscheiben die Gegenstände nicht an ihrem wirklichen Platze, obwohl hier die Ver-

schiebung minimal ist. Letztere ist nämlich um so größer, je dicker der Körper ist, je schräger die Strahlen auffallen, und je größer der Brechungsexponent ist.

Sind dagegen die Grenzflächen des Körpers gegeneinander geneigt, 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. 75 einen Schnitt durch ein Prisma senkrecht zur brechenden Kante, einen sog. Hauptschnitt vor, so wird der Lichtstrahl ab in b nach der Richtung bc 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 Gegen-

¹⁾ τὸ πρίσμα eig. „das Gesägte“.

stande 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 Brechungs-exponenten abhängt, so dient er zur Bestimmung des letzteren. Flüssigkeiten füllt man dazu in Hohlprismen.

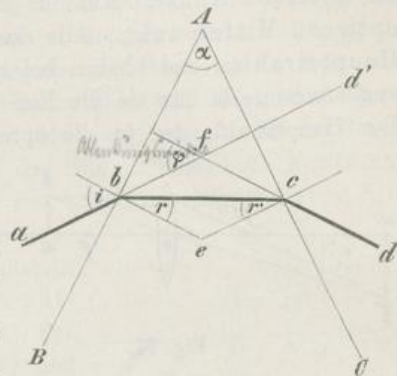


Fig. 75.

Der Brechungsindex 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 $\angle i = \angle ebc + cbf = \frac{\alpha + \varphi}{2}$; somit $n = \sin \frac{\alpha + \varphi}{2} : \sin \frac{\alpha}{2}$. Um also den Brechungs-exponenten zu finden, hat man nur nötig, nachdem α bestimmt ist, das Prisma auf die kleinste Ablenkung einzustellen und dann φ zu messen.

§ 118. **Brechung durch Linsen.** Unter Linsen versteht man Körper (meist aus Glas), die von 2 gekrümmten Flächen begrenzt sind. Wir betrachten hier nur solche Linsen, deren Begrenzungsflächen kugelförmig bzw. eben sind. Nach der Form unterscheidet man (Fig. 76) bikonvexe (1), plankonvexe (2), konkav-konvexe (3), bikonkave (4), plankonkave (5), konvex-konkave (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 4-6 in der Mitte dünner und heißen Zerstreuungslinsen, da sie Divergenz der Strahlen verursachen.

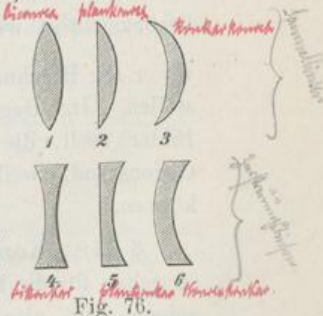


Fig. 76.

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

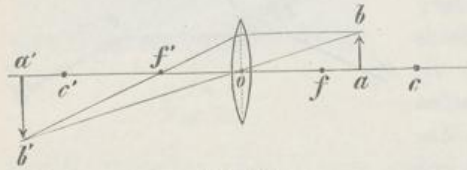


Fig. 77.

Linsen ungebrochen. Alle anderen Strahlen werden sowohl an der Vorder- wie an der Hinterfläche gebrochen.¹ Die beiden Punkte, in denen parallel der optischen Achse auffallende Strahlen sich wirklich oder scheinbar vereinigen, heißen Brennpunkte. Um nun z. B. das Bild des Gegenstandes *ab* (Fig. 77) 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 *bb'* zieht, und dann den zur optischen Achse parallelen Strahl, der nach der Brechung durch den Brennpunkt *f'* gehen muß. Der Schnittpunkt beider Strahlen ist der gesuchte Punkt, und *a'b'* das Bild von *ab*. Auch für die Linsen gilt wieder die Formel

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

wo *a* 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.

§ 119. **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

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

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 Verhältnis 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 entsteht auf derselben Seite der Linse ein aufrechtes, vergrößertes Bild, das natürlich virtuell (Fig. 78 $a'b'$) und von der Linse weiter entfernt ist als der Gegenstand. 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 seine Grenze dadurch, daß innerhalb des sogenannten Nahpunktes nicht scharf gesehen werden kann.

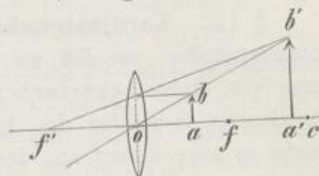


Fig. 78.

Da weitsichtige (hypermetropische) Augen einen kürzeren Längendurchmesser haben als normale, so werden 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.

§ 120. **Konkavlinsen.** Für Konkavlinsen gelten analoge Regeln wie für Konvexspiegel; sie erzeugen also virtuelle Bilder, die hier natürlich auf derselben Seite liegen wie der Gegenstand. Dieselben sind aufrecht und verkleinert (Fig. 79). Der Abstand des Punktes f von der Linse heißt hier Zerstreuungswerte.

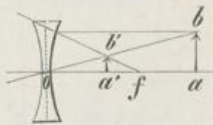


Fig. 79.

Nach dem eben Gesagten ist die Anwendung von Konkavgläsern für kurzsichtige (myopische) Augen, deren Längsachse größer als normal ist, ohne weiteres einleuchtend.

§ 121. **Sphärische Aberration.** Die angeführten Gesetze für Linsen (und auch Spiegel) gelten nur für nahe der Achse einfallende Strahlen, wenn also die „Öffnung“ der Linse, d. h. der Teil zwischen den betreffenden Strahlen, klein ist. 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 (Diacustica) bzw. Brennfläche oder Brennraum. Dadurch werden natürlich die Bilder verschwommen. Zur Vermeidung dieses Übelstandes, der sogenannten späratischen 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.

§ 122. **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 (Fig. 80, F' u. F''). Strahlen, die im ersten Medium parallel der Achse sind, gehen im letzten durch den (zweiten) Brennpunkt und umgekehrt.

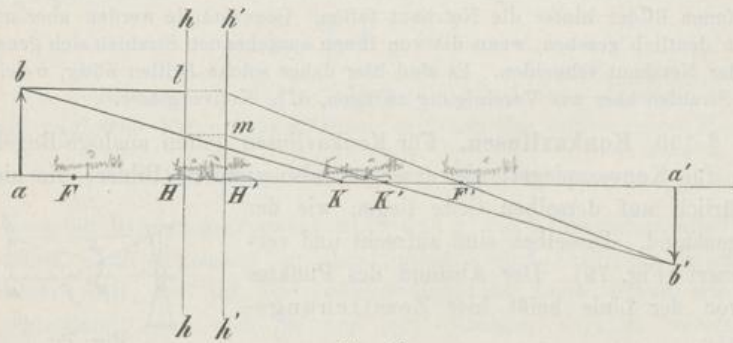


Fig. 80.

2) 2 Hauptpunkte (H u. H'). Ein Strahl, der vor der Brechung in irgend einer Richtung durch den ersten Hauptpunkt geht, geht nach der Brechung parallel verschoben durch den zweiten. In den durch sie senkrecht zur Achse gelegten Hauptebenen ($h h$ u. $h' h'$) 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 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 Schnittpunkt ihrer Verlängerung liegt das Bild von b , während das von a auf der Hauptachse liegt.

§ 123. **Camera obscura.** Setzt man vor die Öffnung der optischen Kammer [§ 107] eine Sammellinse, so entsteht auf der gegenüberliegenden Wand ein viel schärferes reelles Bild des betreffenden Gegenstandes. Der Apparat heißt dann Camera obscura. Ihre Wichtigkeit beruht darauf, 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 Accommodation heißt.

§ 124. **Mikroskop.** Das einfache Mikroskop¹ oder die Lupe ist bereits [§ 119] erwähnt. Das zusammengesetzte (Fig. 81) besteht im wesentlichen aus zwei Linsen. Die dem Objekt zugewandte, das Objektiv l , ist eine Sammellinse von kleiner 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 Gesamt-

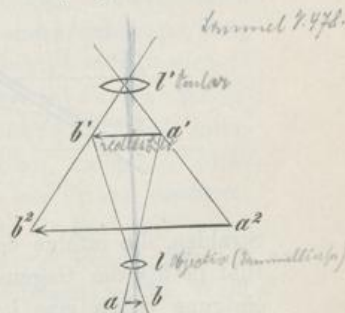


Fig. 81.

¹ μικρός klein, σκοπέω blicken.

² oculus Auge.

vergrößerung eines Mikroskops ist das Produkt aus Objektiv- und Okularvergrößerung. Für das Erkennen von Strukturfeinheiten des Gegenstandes kommt es indes wesentlich auf die Vergrößerung durch das Objektiv an.

§ 125. **Fernrohr.** Die Fernrohre oder Teleskope wirken teils durch Spiegel (Reflektoren), teils durch Linsen (Refraktoren).

Lammert 9.483

Von den Spiegelteleskopen sei das von NEWTON erwähnt (Fig. 82). Hier wird von einem fernen Gegenstande durch einen Hohlspiegel nahe seinem Brennpunkte ein umgekehrtes, reelles, ver-



Fig. 82.

kleinertes Bild erzeugt. Bevor sich die Strahlen aber wirklich vereinigen, werden sie durch einen um 45° geneigten Planspiegel seitlich dem Auge des Beobachters zugeführt und durch eine Lupe betrachtet.

Zur zweiten Art gehört das Kepler'sche oder astronomische Fernrohr. Hier entsteht durch eine Konvexlinse von großer Brennweite ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles Bild des Gegenstandes, das durch eine Lupe vergrößert wird, also umgekehrt bleibt. Schaltet man zwischen Objektiv und Okular ein System von Konvexlinsen ein, so erhält man natürlich aufrechte Bilder (terrestrisches Fernrohr).

Lammert 9.481

Bei den holländischen oder Galilei'schen Fernrohren (Fig. 83), zu denen auch die Operngucker gehören, werden die

Lammert 9.481

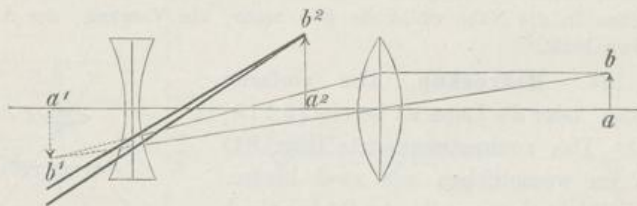


Fig. 83.

Strahlen, die infolge der Brechung durch eine Sammellinse ein reelles Bild ($a^1 b^1$) des Gegenstandes (ab) erzeugen würden, vor ihrer Vereinigung durch eine konkave Linse aufgefangen und zerstreut. Es entsteht daher ein aufrechtes, vergrößertes, virtuelles Bild ($a^2 b^2$).

§ 126. Stereoskop.

Die Fähigkeit, Gegenstände als Körper, also nach drei Dimensionen, wahrzunehmen, wird erst allmählich gelernt. Hierbei wirken verschiedene Umstände mit. Einmal bedarf es einer verschiedenen Akkommodation, um das vordere und hintere Ende eines Gegenstandes deutlich zu sehen, und die dazu nötige Arbeit des Akkomodationsmuskels wird, wenn auch unbewußt,

empfunden; es handelt sich also hier um eine Art des sogenannten Muskelgeföhls. Ferner erhält man durch seitliche Bewegungen des Kopfes nacheinander verschiedene Ansichten des Gegenstandes, die miteinander verglichen werden. Auf diese Weise kann man auch mit einem Auge körperlich sehen. Das beste Hilfsmittel besteht aber wohl darin, daß beim binokularen Sehen das rechte Auge einen etwas anderen Eindruck von einem Objekte erhält wie das linke, und daß diese beiden gleichzeitigen Eindrücke im Gehirn zu einem einzigen verschmolzen werden.

Auf letzterer Tatsache beruht das Stereoskop.¹⁾ Sein Prinzip ist, daß zwei (flächenhafte) Bilder desselben Gegenstandes, die dem Eindruck des rechten bezw. linken Auges von demselben entsprechen, übereinander gelagert werden, und daß dadurch ein körperliches Bild entsteht. Das Stereoskop nach BREWSTER ist nun ein Kasten, an dessen Boden das Doppelbild liegt; eine Scheidewand bewirkt, daß jedes Auge nur das zugehörige Bild sieht. Die Übereinanderlagerung der beiden Bilder erfolgt durch zwei Hälften einer Konvexlinse, die mit den brechenden Kanten gegenüberliegen (Fig. 84) und wie Prismen wirken. Gleichzeitig dienen sie aber als Lupen zur Vergrößerung; natürlich muß dazu das Doppelbild in ihrer Brennweite liegen.²⁾

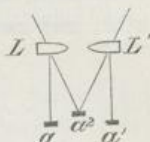


Fig. 84.

D. Dispersion, Absorption, Spektralanalyse.

§ 127. **Einfaches und zusammengesetztes Licht.** Als NEWTON ^{Verbreiterung} Sonnenlicht, das durch einen Spalt in ein dunkles Zimmer drang, durch ein Prisma gehen ließ und dann auf einem Schirm 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 Spektrum³⁾ und unterschied besonders Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. 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 (Farben-

¹ στερεός starr, fest, körperlich.

² Übrigens kann man auch durch Übung ohne Prismen oder Linsen zwei getrennte Gegenstände zur Deckung bringen.

³ eig. das Bild in der Seele, von *specio* schauen.

kreisel); in letzterem Falle erfolgt die Verschmelzung der Farben zu Weiß erst im Gehirn. Vereinigt man nicht alle Farben des Spektrums, so entsteht nicht Weiß, sondern eine sog. Mischfarbe. Nach Ausschaltung von Rot z. B. entsteht Grün. Rot und Grün zusammen geben also Weiß. Je zwei Farben, bei denen dies der Fall ist, heißen Komplementärfarben.

Die Erklärung dieser Erscheinungen ist nach NEWTON folgende: Die Spektralfarben sind als einfaches oder homogenes Licht zu betrachten, d. h. sie bestehen nur aus Wellen gleicher Schwingungszahl; und zwar hat Rot die kleinste, Violett die größte Schwingungszahl.

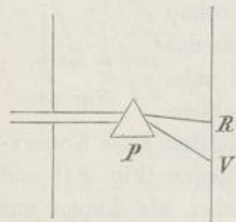


Fig. 85.

Da sich nun alle Farben gleich schnell fortpflanzen, so folgt aus der Formel $v = n\lambda$, [§ 61] daß die roten Strahlen die größte, die violetten die kleinste Wellenlänge haben. Im weißen Lichte sind alle 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 (Fig. 85); sie werden also dadurch voneinander getrennt, zerstreut (dispargiert).¹⁾

¹⁾ Da die Brechung von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit abhängt, diese aber für alle Farben gleich ist, so besteht hier eigentlich ein Widerspruch. Man hilft sich mit der Annahme, daß dem Äther zwischen materiellen Molekülen durch Reibung ein Bewegungshindernis entsteht, das mit der Schwingungszahl wächst. — Es sei hier übrigens kurz darauf hingewiesen, daß es auch andere Erklärungen der Farben gibt. So hat GOETHE eingehende Studien darüber veröffentlicht, die freilich stark angefochten wurden. Er leitet die Farben davon ab, daß entweder Licht durch ein trübes Medium gesehen wird, oder daß hinter einem beleuchteten trüben Medium sich ein dunkler Hintergrund befindet. Im ersten Falle erscheint das Licht bei geringerer Trübung des Mediums gelb und geht mit zunehmender Trübung in gelbrot und rot über; im zweiten Falle sieht man eine blaue Farbe, die mit abnehmender Dichte des Mediums ins Violette übergeht. In neuester Zeit hat O. ROSENBACH diese Ansicht in gewissem Sinne wieder aufgenommen; er faßt Helligkeit und Dunkelheit als Fundamentalreize auf, die entgegengesetzt gerichtete Bewegungen der Schnervenmoleküle bewirken. Aus ihrer Mischung in verschiedenen Verhältnissen sind alle Farben abzuleiten, wie er auch experimentell durch seine Farbensirene nachwies. Dies ist eine durchlöcherne Pappscheibe, deren dem Beschauer zugewandte Seite ganz dunkel (schwarz) ist, und die vor einer gleichmäßig beleuchteten weißen Fläche verschieden schnell rotiert.

§ 128. **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 Crown- 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 Flint- und Crown Glaslinse beseitigen.

§ 129. **Körperfarben.** Die Farbe eines Körpers beruht auf den reflektierten resp. durchgelassenen Strahlen. Absorbiert der Körper von den auf ihn fallenden Strahlen 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 in rotem Lichte rot, in grünem schwarz aussieht, daß ein rotes und ein dahinter befindliches grünes Glas eine undurchsichtige Verbindung geben etc.

§ 130. **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 Art der Untersuchung, die sich durch äußerste Feinheit auszeichnet, heißt daher Spektralanalyse. Man gebraucht hierfür den Spektralapparat von KIRCHHOFF und BUNSEN.

Durch einen schmalen Spalt des sog. Kollimatorrohres *A* (Fig. 86) 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

Guttmann, Grundriß der Physik. 3. Aufl.

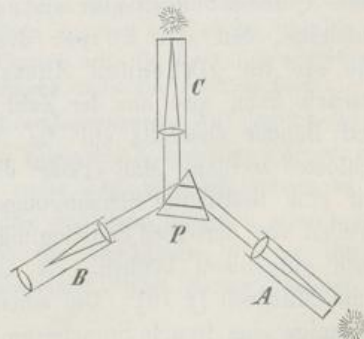


Fig. 86.

vorderen Ende des sog. Skalenrohres *C* in Glas eingeritzt ist; dieselbe dient zur Orientierung im Spektrum.

§ 131. **Emissionsspektra.** Wenn Körper in glühendem Zustande selbst Strahlen aussenden, liefern sie sog. Emissionsspektra.

Um Körper glühend zu machen, bringt man sie entweder in die Flamme eines Bunsenbrenners, oder wenn diese Hitze nicht genügt, in ein Knallgasgebläse, oder endlich in den elektrischen Flammenbogen. Um Gase leuchtend zu machen, schließt man sie sehr verdünnt in sog. GEISSLER'schen Röhren (§ 188) 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 mäßig hoher Temperatur und Verdünnung ein linienförmiges Spektrum. Letzteres ist besonders charakteristisch für Elemente, ersteres für chemische Verbindungen.

§ 132. **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 alle Körper diejenigen Strahlen absorbieren, die sie im glühenden Zustande selbst aussenden würden. 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 angeführt, 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 der eigentlichen Sonne erst durch eine Gashülle, die sogenannte Photosphäre, dringen müssen, bevor sie in den Weltraum gelangen. Die FRAUNHOFER'schen Linien, die mit großen lateinischen Buchstaben (die schwächeren mit kleinen) bezeichnet werden, dienen zur Orientierung im Spektrum.

*Samml. 9. 491.
R-H.*

§ 133. **Chemische Wirkung des Lichtes.** Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie kann die Energie der absorbierten Strahlen nicht verloren gehen. In der Tat geht sie über in Wärme und chemische Prozesse. Diese Wirkung haben besonders die unsichtbaren Teile des Spektrums, d. h. diejenigen Strahlen, die nicht mehr oder noch nicht als Licht empfunden werden. Die Wärmewirkung kommt den ultraroten, die chemische den ultravioletten (sogenannten aktinischen¹) Strahlen zu. Von den chemischen Wirkungen des Sonnenlichts sei z. B. erwähnt die Umwandlung des giftigen gelben Phosphors in den unschädlichen roten, die Vereinigung von Wasserstoff und Chlor zu Salzsäure, der Aufbau komplizierter chemischer Verbindungen in Pflanzen. Hierher gehört auch die Photographie.

Die ersten Lichtbilder waren die sog. Daguerreotypien². 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 ein positives Bild.

§ 134. **Fluoreszenz und Phosphoreszenz.** Auf der Absorption gewisser Strahlen beruht auch die Eigenschaft mancher Körper, z. B. des Flußspats, Chininsulfats etc., unter dem Einflusse intensiver Beleuchtung selbstleuchtend zu werden und dann Strahlen auszusenden, deren Farbe sowohl von derjenigen der Lichtquelle, wie von der gewöhnlichen Farbe des Körpers abweicht. Hält dieser Zustand nur

¹ *ἀκτις* Strahl.

² Nach dem Erfinder DAGUERRE.

während der Bestrahlung an, so heißt er Fluoreszenz¹, während das Nachleuchten Phosphoreszenz genannt wird. Ein phosphoreszierender Körper ist z. B. der Diamant [cf. § 106]. Daß es sich um eine Absorptionserscheinung hierbei handelt, geht daraus hervor, daß Strahlen, die durch einen fluoreszierenden Körper gegangen sind, 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 sichtbar zu machen.

E. Interferenz und Polarisation.

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

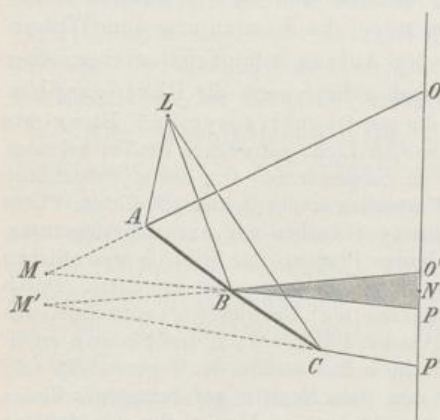


Fig. 87.

Fallen von der Lichtquelle *L* (Fig. 87) 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 von einfarbigem Lichte abwechselnd dunkle und helle Streifen, die auf einem Schirme aufgefangen werden können.

Diese dunklen Streifen sind der Ausdruck dafür, daß daselbst Wellen mit entgegengesetzten Phasen zusammentreffen. 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. Bei Anwendung von rotem Licht sind die dunklen Streifen weiter voneinander entfernt als beim violetten Licht. Da nämlich die Wellenlänge

¹ Weil zuerst beim Fluorkalzium (Flußspat) entdeckt.

des ersteren größer ist, entsteht auch die zur Auslöschung nötige Phasendifferenz von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge erst nach einer längeren Strecke. 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 vernichtet, dann allmählich die anderen, entsprechend ihrer Wellenlänge. Die an den betreffenden Stellen übrig bleibenden Strahlen ergeben dann durch Mischung die sogenannten Interferenzfarben.

§ 136. **Andere Interferenzerscheinungen.** Auf Interferenz beruhen viele prächtige Farbenerscheinungen, z. B. die Farben dünner Blättchen. Hier wird nämlich das Licht sowohl an der vorderen, wie an der hinteren Fläche reflektiert (Fig. 88) und kommt dann zur Interferenz. Der Gangunterschied wird hier einmal dadurch bedingt, daß der an der Hinterfläche reflektierte Strahl einen längeren Weg, hier abc , zurücklegt, und ferner entsteht ja auch durch Reflexion an einem dichteren Medium ein Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge [cf. § 63]. Je nach der Dicke des Blättchens wird nun eine bestimmte Phasendifferenz eintreten; in homogenem Lichte wird es daher hell oder dunkel, in weißem in einer bestimmten Farbe erscheinen. Ändert sich die Dicke der betreffenden Schicht, so tritt auch ein Wechsel in der Helligkeit und Dunkelheit bzw. den Farben ein. Dies ist z. B. der Fall bei Seifenblasen und bei den sogenannten Newton'schen Ringen. 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 entstehen daher in homogenem Lichte helle und dunkle Ringe, in weißem farbige.

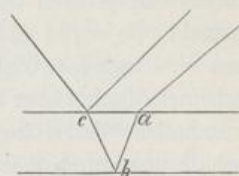


Fig. 88.

§ 137. **Beugung.** Mit Interferenz verbunden ist auch die Beugung oder Diffraktion des Lichts um den Rand undurchsichtiger Körper [vgl. § 62]. Es sei z. B. AB (Fig. 89) ein schmaler Spalt, durch den homogenes Licht auf den Schirm MN fällt, dann wird auf der AB gerade gegenüberliegenden Stelle C Helligkeit herrschen, da alle Elementarwellen dort in gleicher Phase ankommen (vorausgesetzt ist ein genügender Abstand zwischen AB und MN , so daß die Randstrahlen AC und BC als parallel gelten können). In allen anderen Punkten kommen die Strahlen mit einem Gangunterschied an. Beträgt derselbe z. B. in D für die Randstrahlen AD

und BD eine halbe Wellenlänge, dann müssen diese sich aufheben, die dazwischenliegenden Strahlen aber nicht; es wird daher auch in

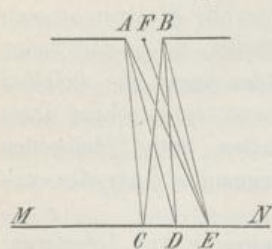


Fig. 89.

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, 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. So ergibt sich, daß die Punkte des Schirms, deren Randstrahlen um eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen differieren, hell erscheinen, dunkel aber die, wo es sich um die Differenz einer geraden Zahl von halben Wellenlängen handelt. Sehr schöne Beugungserscheinungen erhält man durch mehrere nebeneinanderliegende Spalten, sog. Gitter; eine Art derselben wird z. B. hergestellt, indem mit einem Diamanten feine parallele Striche in Glas eingeritzt werden; hier wirken die geritzten, matt gewordenen Stellen wie undurchsichtige Schirme; die Stellen zwischen zwei Strichen entsprechen einem Spalt. An Stelle der hellen und dunklen Streifen erscheinen mit weißem Lichte natürlich wieder farbige (Beugungs- oder Gitterspektra). Die Streifen sind um so breiter und deutlicher, je größer die Wellenlänge der betreffenden Strahlen und je schmaler der Spalt ist. Auf der Beugung beruht es z. B., daß man durch angelaufene Fensterscheiben Flammen mit farbigen Ringen sieht, daß Spinnfäden schillern etc.

§ 138. **Begriff der Polarisation.** Polarität wird die Eigenschaft genannt, daß zwei Enden eines Körpers, die Pole (man

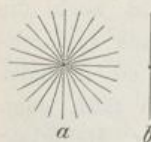


Fig. 90.

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 würde also auf dem Durchschnitt etwa

wie Fig. 90a aussehen. Demgegenüber schwingen beim geradlinig polarisierten Lichte (Fig. 90b) alle Ätherteilchen nur in einer Ebene, ebenfalls senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung;

dieselbe heißt Schwingungsebene, die zu ihr senkrechte Polarisationsebene.¹⁾)

§ 139. **Doppelbrechung.** Die Kristalle aller Systeme, mit Ausnahme des regulären, sind anisotrop, d. h. sie haben in verschiedenen, und zwar besonders in zwei zueinander senkrechten Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften (Dichte, Elastizität, Wärmeleitungsvermögen etc.). 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 SNELLIUS'schen Gesetze [§ 115] und heißt daher der ordinäre, während dies beim extraordinären nicht der Fall ist; beide 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 Ätherteilchen des ordinären und extraordinären Strahles, die ja in dazu senkrechten Ebenen (und senkrecht zueinander) schwingen, nach dem eben Gesagten gleichschnell fortpflanzen; mit anderen Worten, es tritt dann keine Doppelbrechung ein. Diese Richtungen, auch optische 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 nun, die durch einen Kristall so gelegt ist, daß die optische Achse in sie fällt, heißt Hauptschnitt. In Fig. 91, die einen Doppelspatrhomboëder

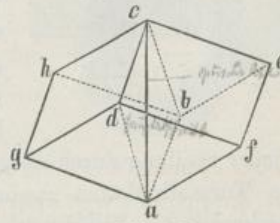


Fig. 91.

vorstellt, ist ac die optische Achse, $abcd$ ein Hauptschnitt. Während also in der Richtung der optischen Achse keine Doppelbrechung eintritt, muß dies in allen anderen Richtungen der Fall sein, weil eben dann die beiden Komponenten, in die das Licht zerlegt wird, un-

¹⁾ Bisweilen wird auch die Schwingungsebene als Polarisationsebene bezeichnet und umgekehrt.

gleiche Geschwindigkeit besitzen. Hat der ordinäre Strahl eine kleinere Geschwindigkeit als der extraordinäre, wird er also stärker gebrochen, so heißt der betreffende Kristall optisch negativ, im anderen Falle positiv.

Strahl 1. 526.

*für Strahl, der sich auf
ausfallender Seite
für einfallender Seite
ausfallender Seite
gefällt.*

8/10. 388.

*Platinsulfid
für einfallender
Seite einfallender
8,8° 53'*

2 1/2 = 59°

Flügelachse

§ 140. **Polarisation durch Doppelbrechung.**

Wie oben gezeigt, bietet die Doppelbrechung ein bequemes Mittel, polarisiertes Licht zu erhalten. Da aber die Schwingungsebenen der austretenden Strahlen aufeinander senkrecht stehen, durch ihre Vereinigung also wieder gewöhnliches Licht entstehen würde, so muß man einen von ihnen beseitigen. Beim Turmalin z. B., einem rötlich bis grünen Kristall, geschieht dies durch Absorption des ordinären 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 zweite passieren; blickt man also durch die Platten, so ist das Gesichtsfeld hell. Legt man sie aber mit gekreuzten

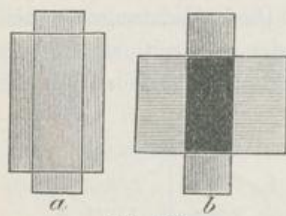


Fig. 92.

Achsen aufeinander, so muß das Gesichtsfeld dunkel sein, weil ja immer nur parallel der Achse schwingende Strahlen durchgehen können (Fig. 92). Zwischen diesen Extremen gibt es natürlich Übergänge. 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 noch benutzt man den Doppelspat in Form des Nicol'schen Prismas, kurz Nicol genannt.

$AB'DC'$ (Fig. 93) sei ein natürlicher Kalkspatrhomboëder, dessen durch die Kanten AB' und $C'D$ gehende Hauptschnittebene in der Zeichnungsebene liegen möge (Fig. 94). 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. 94) 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.

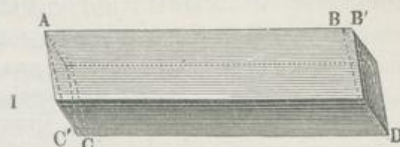


Fig. 93.

Trifft nun ein Lichtstrahl ab (Fig. 94) auf die rhombische Vorderfläche des Prismas, so wird er in zwei Strahlen zerlegt. Da der ordinäre Strahl bc sich im Doppelspat langsamer fortpflanzt als im Kanadabalsam, dieser mithin für ihn ein optisch dünneres Medium vorstellt, so



Fig. 94.

wird er bei genügend schrägem Auffall an der Balsamschicht total reflektiert und seitlich bei d durch die schwarze Einfassung des Prismas absorbiert. Der extraordinäre 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 extraordinäre Strahl, d. h. parallel dem Hauptschnitt oder, was dasselbe ist, parallel der kürzeren Diagonale seiner rhombischen Endflächen, wie Fig. 95 zeigt, die die Endfläche eines Nicols samt Fassung darstellt. PP ist die zur Schwingungsebene senkrechte Polarisationssebene. Ein Nicol kann natürlich ebenfalls sowohl als Polarisator wie als Analytator dienen.



Fig. 95.

§ 141. **Polarisation durch Reflexion und einfache Brechung.** Gewöhnliches Licht wird auch durch Reflexion, ausgenommen an Metallspiegeln, in linear polarisiertes umgewandelt (MALUS). Und zwar ist die Polarisationssebene des reflektierten Lichts identisch mit der Einfallsebene; die Schwingungen erfolgen also senkrecht zu dieser und parallel der Oberfläche des Spiegels. (Fig. 96.) Gewöhnlich findet hierbei nur eine teilweise Polarisation statt; nur

wenn der Einfallswinkel so groß ist, daß der reflektierte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht, ist alles reflektierte Licht polarisiert (Gesetz von BREWSTER).



Fig. 96.

Die Größe dieses Polarisationswinkels hängt vom Brechungsindex ab. Dieser ist nämlich hier (Fig. 97) $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$. Nun ist $a = \gamma$ und $\beta + \gamma = R$. Also $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\cos \gamma} = \frac{\sin \alpha}{\cos a} = \operatorname{tg} a$. Bei vollständiger

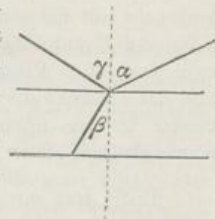


Fig. 97.

Polarisation ist also die Tangente des Einfallswinkels gleich dem Brechungsindex.

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. Das so erhaltene polarisierte Licht ist aber wegen der Beimischung anderen Lichts sehr schwach; verstärkt wird es, indem man es durch mehrere Glasplatten durchgehen läßt, da hierbei das nicht polarisierte Licht durch wiederholte Reflexion beseitigt wird. Die verschiedene Schwingungsrichtung des reflektierten und durchgelassenen Lichts rührt daher, daß Lichtwellen in ein Medium nur dann eindringen können, wenn sie mit ihren Kämmen vorschreiten: treffen sie dagegen mit den Seiten der Wellen auf, so werden sie reflektiert. Ebenso dringt z. B. ein Messer, wenn es mit der Spitze auffällt, in ein Brett ein, fällt es dagegen mit der stumpfen Kante auf, so prallt es zurück.

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. 98), der hier Polarisator ist, so wird er in der Richtung bc reflektiert, und gleichzeitig schwingen seine Teilchen alle senkrecht zur Einfallsebene. Bildet $M'N'$, der Analysator, denselben Winkel zur Achse, die hier durch den Lichtstrahl bc dargestellt ist, so kann er nur dann bc reflektieren, wenn seine Einfallsebene parallel der von MN ist, wenn beide also einen Winkel von 0° oder

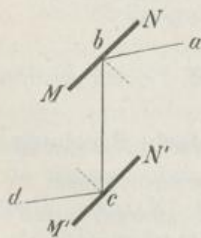


Fig. 98.

180° miteinander bilden; bei einem Winkel von 90° oder 270° wird kein Licht reflektiert. Benutzt man als Analysator einen Satz Glas-

platten und beobachtet das durchgehende Licht, so sind die Erscheinungen gerade umgekehrt.

§ 142. **Interferenz des polarisierten Lichtes.** Es wurde oben auseinandergesetzt, daß bei parallelen Turmalinplatten oder Nicols etc. das Gesichtsfeld hell, bei rechtwinklig gekreuzten aber dunkel sein muß. Bilden die optischen Achsen der Nicols einen anderen Winkel wie einen rechten, sei z. B. ab (Fig. 99) die Richtung der Achse im ersten, ef die im zweiten Nicol, so kann nach dem Parallelogramm der Kräfte jede Schwingung in zwei von der Richtung ef und gh zerlegt werden. Die letztere, rechtwinklig zur Achse des zweiten Nicols erfolgende, geht nicht hindurch, wohl aber die erstere. Auf dieser Zerlegung von Schwingungen beruhen auch Interferenzerscheinungen, wenn man zwischen

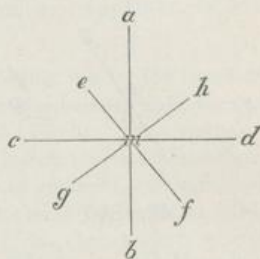


Fig. 99.

einen Polarisationsapparat einen dünnen, doppelbrechenden Körper z. B. ein Gipsblättchen bringt, welches Lichtstrahlen nur in den Richtungen ef und gh (Fig. 99) durchläßt. Dann werden die durch den Polarisator in die Richtung ab gebrachten Strahlen in Schwingungen nach den Richtungen ef und gh zerlegt; und diese am Analysator wieder in Komponenten nach den Richtungen ab und cd . Es werden dann nur die letzteren durchgelassen, und da sie von Strahlen herrühren, die infolge der Doppelbrechung einen Phasenunterschied, abhängig von der Dicke des Gipsblättchens, besitzen, so wird durch Interferenz das Gesichtsfeld bei einfarbigem Lichte mehr oder weniger hell, bei weißem Licht in einer bestimmten Farbe erscheinen. In ähnlicher Weise entsteht in dickeren doppelbrechenden (optisch einachsigen) Kristallen bei Anwendung von divergenten Lichtstrahlen 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. Während dies bei gekreuzten Nicols der Fall ist, erscheinen bei parallelen die komplementären Farben und ein helles Kreuz. Hierauf beruht auch das Polarisationsmikroskop, bei dem durch das Objektiv schon 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 Farbenglanz; ferner treten dadurch feinere Strukturunterschiede besser hervor.

§ 143. **Zirkulare Polarisation.** Wenn ein Pendel durch einen

bestimmten Impuls von A nach B (Fig. 100) schwingt, so werden durch gleichstarke Impulse, die senkrecht zu dieser Bahn an verschiedenen Stellen erteilt werden, verschiedene Schwingungsformen entstehen. Ist

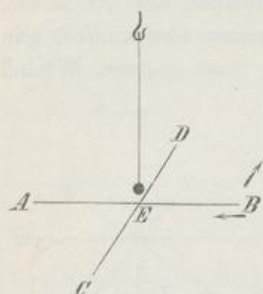


Fig. 100.

der Pendel in B , hat er also von E aus $\frac{1}{4}$ Schwingung zurückgelegt, so wird durch einen Impuls in der Richtung und Stärke von ED eine Kreisbewegung nach links resultieren; ebenso in A eine solche nach rechts; in E eine geradlinige Bewegung in diagonaler Richtung; eine elliptische Bewegung endlich, entweder wenn in A oder B stärkere Impulse wirken, oder wenn der gleiche Impuls auf der Strecke zwischen A und B einwirkt. Genau dasselbe findet nun

beim polarisierten Lichte statt. Wenn das Licht, das durch einen doppelbrechenden Körper in zwei zueinander senkrechte Strahlen polarisiert ist, durch den Analysator wieder auf eine Ebene gebracht wird, so hängt es allein vom Gangunterschied ab, welche Form resultiert. Ist er $= 0$ oder $\frac{1}{2}$ Wellenlänge, so entsteht geradlinig polarisiertes Licht, beträgt er $\frac{1}{4}$ Wellenlänge, kreisförmiges, und für die Zwischenwerte elliptisches. Der Name polarisiert paßt eigentlich nicht mehr, 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 seinen Gangunterschied um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge erhöht oder erniedrigt, indem man es z. B. durch ein entsprechend dickes Glimmerplättchen schickt, geradlinig polarisiertes Licht entsteht.

§ 144. **Drehung der Polarisationssebene.** Ebenso wie unter Umständen aus zwei geradlinigen Bewegungen eine kreisförmige entsteht, kann jede geradlinige Bewegung als Resultante zweier gleichgroßer, entgegengesetzt gerichteter Kreisbewegungen aufgefaßt werden.



Fig. 101.

Wirken z. B. auf das Teilchen a (Fig. 101) zwei 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, dann resultiert der Weg $a'b'$. In der Tat findet nun beim Quarz und bestimmten Flüssigkeiten eine Zerlegung geradlinig polarisierten Lichts in zwei entgegengesetzt kreis-

förmige Bewegungen statt. 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 Polarisationssebene wird also, wie man sagt, durch

diese „optisch aktiven“ Substanzen gedreht sein, z. B. nach rechts (wie beim Rohrzucker etc.), wenn die rechtsherum gehende kreisförmige Bewegung sich schneller fortpflanzt. Diese Drehung der Polarisationssebene ist nun deshalb von großer Bedeutung, weil sie z. B. bei Zuckerlösungen proportional der Dicke der betreffenden Schicht und ihrem Zuckergehalte ist, so daß dieser daraus berechnet werden kann. Die hierfür angewandten Apparate heißen Saccharimeter¹.

Durch eine l dm lange Schicht einer Zuckerlösung, die in 100 ccm z gr Zucker enthält, wird nämlich 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 solange, 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 (bezw. bei Anwendung weißen Lichtes gleichgefärbt); nach Zwischenschaltung der Zuckerlösung werden sie dagegen ungleich.

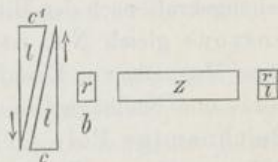


Fig. 102.

Der Winkel, um den der Okular-Nicol gedreht werden muß, damit sie wieder gleich werden, entspricht wieder α . Beim SOLEIL'schen Saccharimeter wird an Stelle des drehbaren Okular-Nicols der sog. Kompensator benutzt (Fig. 102), um die Größe der Drehung zu bestimmen. Derselbe besteht aus einer rechtsdrehenden Quarzplatte b 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 auch der optische Effekt derjenigen Zuckerlösung, welcher durch den Kompensator das Gleichgewicht gehalten wird.

¹ saccharum Zucker. *Über opt. Eigenschaften / Hermann J. 573.*