

### 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 wird<sup>1)</sup>, 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 ungebogen 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.

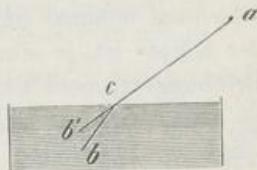


Fig. 72.

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

<sup>1</sup> 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,

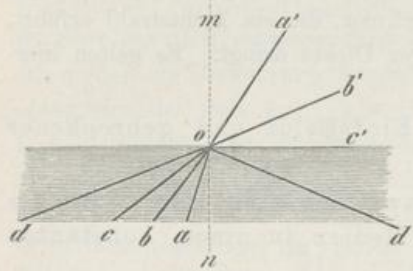


Fig. 73.

z. B.  $co c'$  (Fig. 73), ja sogar vollständig in das alte Medium zurückkehren müssen, z. B.  $do d'$ . 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.  $48^\circ$ .

§ 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

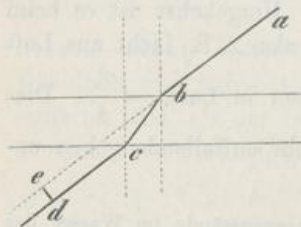


Fig. 74.

Vorderfläche um 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. 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 Brechungsindex ist.

Sind dagegen die Grenzflächen des Körpers gegeneinander geneigt, so bekommen die Lichtstrahlen eine andere Richtung. Dies ist z. B. der Fall beim Prisma<sup>1)</sup>, 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  $ed$  hin gebrochen; es findet also eine Ablenkung des Lichtstrahls nach dem dicken Ende des Prismas zu statt. Licht, welches von einem Gegen-

<sup>1)</sup> 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 ( $\varphi$ ), 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 fällt man dazu in Hohlprismen.

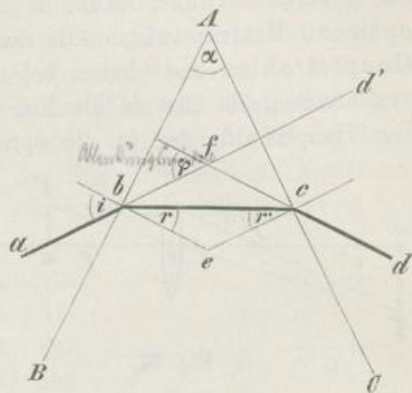


Fig. 75.

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  $\angle i = \angle ebc + \angle cbf = \frac{\alpha + \varphi}{2}$ ; somit  $n = \sin \frac{\alpha + \varphi}{2} : \sin \frac{\alpha}{2}$ . Um also den Brechungs-exponenten zu finden, hat man nur nötig, nachdem  $\alpha$  bestimmt ist, das Prisma auf die kleinste Ablenkung einzustellen und dann  $\varphi$  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 Zerstreulinsen, da sie Divergenz der Strahlen verursachen.

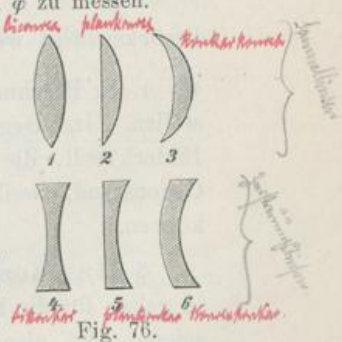


Fig. 76.

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

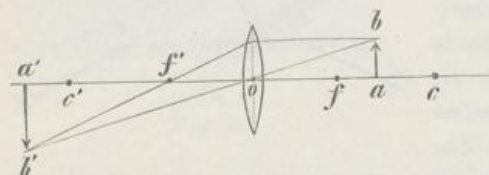


Fig. 77.

Linsen ungebrochen. Alle anderen Strahlen werden sowohl an der Vorder- wie an der Hinterfläche gebrochen.<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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.

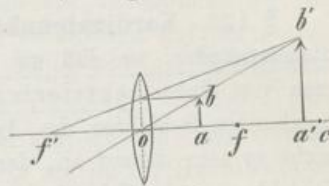


Fig. 78.

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. Konkavgläser.

§ 120. **Konkavlinsen.** Für Konkavlinsen gelten analoge Regeln wie für Konkavspiegel; 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.

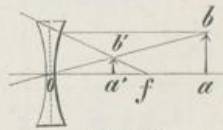


Fig. 79.

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) bezw. Brennfläche oder Brennraum. Dadurch werden natürlich die Bilder verschwommen. Zur Vermeidung dieses Übelstandes, der sogenannten spärtschen 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.

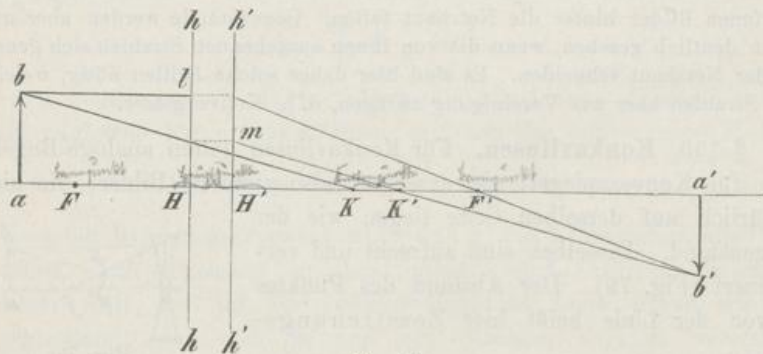


Fig. 80.

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  $45^\circ$  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 Mikroskop<sup>1</sup> 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 Okular<sup>2</sup>  $l'$ , nochmals vergrößert wird. Letzteres wirkt hierbei als Lupe; das vom Objektiv entworfene reelle Bild muß daher in die Brennweite des Okulars fallen. Die Gesamt-

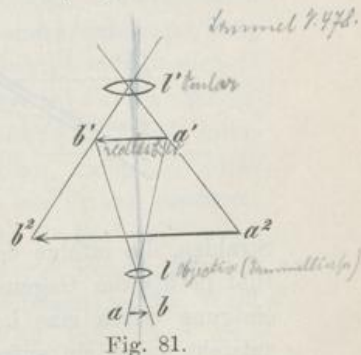


Fig. 81.

<sup>1</sup> μικρός klein, σκοπέω blicken.

<sup>2</sup> 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-

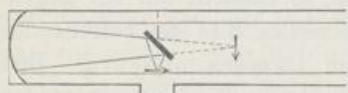


Fig. 82.

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

*Lammert 9.481*

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

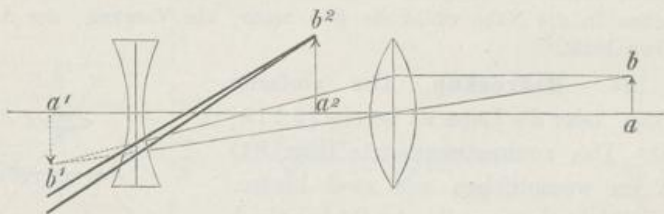


Fig. 83.

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 ( $a^2 b^2$ ).

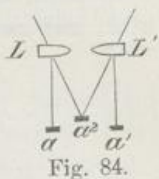
### § 126. Stereoskop.

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 Muskelgefühls. Ferner erhält man durch seitliche Bewegungen des Kopfes nach einander 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.<sup>1)</sup> Sein Prinzip ist, daß zwei (flächenhafte) Bilder desselben Gegenstandes, die dem Eindruck des rechten bzw. 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.<sup>2)</sup>



## D. Dispersion, Absorption, Spektralanalyse.

§ 127. *Farbenauffassung.* **Einfaches und zusammengesetztes Licht.** Als NEWTON 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 Spektrum<sup>3)</sup> 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-

<sup>1</sup> στερεός starr, fest, körperlich.

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

<sup>3</sup> eig. das Bild in der Seele, von *specio* schauen.