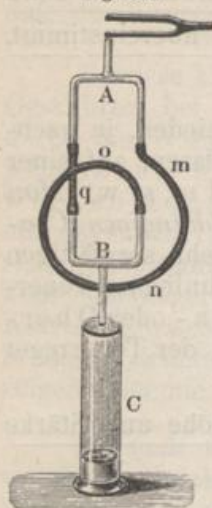


miteinander, von denen der eine (mno) nahezu 40 cm (halbe Länge der fortschreitenden Welle des gewöhnlichen Stimmgabeltones) länger ist als der andere. Die eine der beiden Ansatzröhren halte man in einen nach Fig. 332 auf denselben Ton abgestimmten Resonator. Hält man dann eine kräftig angeschlagene Stimmgabel mit dem äußersten Ende eines ihrer Zinken möglichst nahe vor die Mündung der anderen Ansatzröhre, so hört man den Ton nur dann deutlich, wenn man den längeren Verbindungsschlauch (mno) fest zusammendrückt.

Fig. 334.



Dies erklärt sich daraus, daß die Strecke AmnoB um eine halbe Wellenlänge des Stimmgabeltones größer ist als die Strecke AqB, sodafs die Luftschwingungen, wenn sie sich auf beiden Wegen fortpflanzen, bei B in entgegengesetzten Schwingungszuständen ankommen, d. h. so, daß Verdichtung und Verdünnung zusammentreffen.

Übungsstoff.

Fig. 335.



1. Wenn man die elastischen, aus Tierblase oder Kautschuk bestehenden Böden zweier zylindrischen Blechbüchsen durch eine lange Schnur verbindet (Fig. 335), so erhält man einen Apparat, durch welchen ein in die Höhlung des einen Cylinders gesprochenes Wort vor dem anderen Cylinder auf weite Entfernung hin deutlich hörbar ist. Erkl.!

2. Wie kann ein frei aufgehängter K. von ziemlich großem Gew. durch schwache Stöße in eine pendelartige Bewegung versetzt werden? Wende dies auf die Ersch. des Versuches a an. — 3. Wie erklärt es sich, daß eine geringe Belastung der Stimmgabel das Mittönen verhindern kann? — 4. Wie erklärt sich das Zurückhallen eines in ein Klavier gesungenen Tones und warum können dabei nicht alle Saiten erklingen? — 5. Wodurch erhalten die Töne der Stimmbänder des Kehlkopfes erst ihren Klang? Vorteil der Veränderlichkeit dieses natürlichen Resonators! — 6. Eingeschlossene dünne Luftsäulen erzeugen beim Schwingen leicht hohe Obertöne. Inwiefern liegt hierin der Grund dafür, daß man z. B. Trompeten aus Röhren anfertigt, die im Verhältnis zu ihrer Länge ziemlich dünn sind, bei Orgelpfeifen dagegen im allgemeinen entgegengesetzt verfährt? — 7. Inwiefern ist der Längenunterschied der beiden Schläuche (Fig. 334) von der Wellenlänge des Stimmgabeltones abhängig? — 8. Wv. Wellenzüge müssen in der Luft durch das Tönen einer Stimmgabel entstehen? — 9. Wie erklärt sich somit die Ersch., daß der Ton einer senkrecht vor das Ohr gehaltenen Stimmgabel abwechselnd viermal stärker und viermal schwächer wird, wenn man die Gabel einmal um ihre Längsachse dreht?

IV. Abschnitt.

Die Lehre vom Lichte.

(O p t i k.)

(I. Lehrstufe, §§ 25—29.)

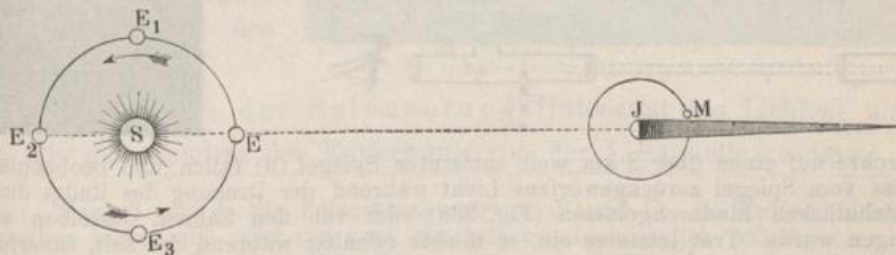
A. Geschwindigkeit und Stärke des Lichtes.

§ 96. **Geschwindigkeit des Lichtes.** Schon Galilei nahm an, daß das Licht eine bestimmte Zeit nötig habe, um sich durch

den Raum fortzupflanzen und versuchte die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen. Aber erst im Jahre 1676 gelang es dem Astronomen Römer, die Lichtgeschwindigkeit aus den Verfinsterungen eines Jupitermondes zu berechnen. Zur Beobachtung diente der dem Jupiter am nächsten stehende Mond, da er eine sehr kurze Umlaufszeit hat (annähernd nur $42\frac{1}{2}$ Stunden) und bei jedem Umlaufe durch den Kernschatten des Jupiters geht.

Fig. 336 stelle die Lage dar, welche die Sonne (S), die Erde (E), der Ju-

Fig. 336.



piter (J) und dessen erster Mond (M) im Weltraume gegeneinander einnehmen; die beiden Kreise mögen die Bahnen andeuten, in denen die Erde sich um die Sonne und der Mond sich um den Jupiter bewegt. Bewegt sich die Erde von E oder E₂ aus weiter, so bleiben die Entfernungen der Erde vom Jupiter offenbar zunächst unverändert, sie nehmen jedoch (von E aus) um so schneller zu und (von E₂) um so schneller ab, je mehr sich die Erde den Stellungen E₁ und E₃ nähert. Bewegt sich die Erde dagegen von E₁ aus weiter, so wird ihre Entfernung vom Jupiter während eines Mondumlaufes um 600 000 Meilen größer. Zwischen zwei aufeinander folgenden Austritten verstrichen nun in diesem Falle beinahe 15 Sek. mehr, als die Berechnung ergeben hatte. Das Licht hatte demnach 15 Sek. nötig, um die Erde einzuholen und einen um 600 000 Meilen größeren Weg zurückzulegen. Hiermit stimmte das Ergebnis der von E₁ aus angestellten Beobachtungen überein, denn der Austritt erfolgte hier, wo die Erde sich während eines Mondumlaufes dem Jupiter um 600 000 Meilen näherte, 15 Sek. früher, als bei gleichbleibender Entfernung der Erde vom Jupiter.

Das Licht legt in einer Sekunde einen Weg von ungefähr 40 000 geographischen Meilen oder 300 000 km zurück.

Nahezu dieselbe Geschwindigkeit fand 1728 der Astronom Bradley aus der von ihm entdeckten Aberration des Lichtes der Fixsterne. Diese Erscheinung besteht darin, daß die Fixsterne zu verschiedenen Zeiten des Jahres nicht immer genau an derselben Stelle im Weltraume gesehen werden, sondern in derjenigen Richtung von ihrem wirklichen Orte ein wenig verschoben erscheinen, in welcher die Erde sich im Augenblicke der Beobachtung um die Sonne bewegt. Bradley erklärte dies daraus, daß das Licht, indem es durch das zur Beobachtung dienende Fernrohr hindurchgeht, von der Achse des Rohres um einen sehr kleinen Winkel abgelenkt wird, ähnlich wie die Spur eines Regentropfens, welcher auf der Fensterscheibe eines im Fahren begriffenen Eisenbahnwagens hinabgleitet, von der senkrechten Richtung abweicht, sodaß also nach genauer Einstellung des Fernrohres die in der Richtung der Achse desselben hindurchgehenden Strahlen ebenso wenig ihren wirklichen Ausgangspunkt erkennen lassen, wie ein in der Richtung der Spur des Tropfens nach den Wolken sehendes Auge den richtigen Ausgangspunkt des Tropfens erblickt. Wie sich nun aus der Fahrgeschwindigkeit und dem Winkel, welchen die Spur des Tropfens mit der Senkrechten bildet, die Länge des in 1 Sek. vom Tropfen in Wirklichkeit zurückgelegten senkrechten Weges bestimmen lassen würde, wenn der Tropfen durch die Berührung mit der

Scheibe nicht im Fallen aufgehalten wäre, so läßt sich auch aus der Bahngeschwindigkeit der Erde und dem Aberrationswinkel (scheinbare Verschiebung des Gestirns aus seiner wirklichen mittleren Stellung) die Geschwindigkeit des Lichtes berechnen.†)

Die Geschwindigkeit des Lichtes irdischer Lichtquellen ist zuerst 1849 von Fizeau gemessen worden. Durch die Zahnücken eines sehr schnell umlaufenden Zahnrades (R, Fig. 337) liefs man Lichtstrahlen mit Hilfe zweier

Fig. 337.

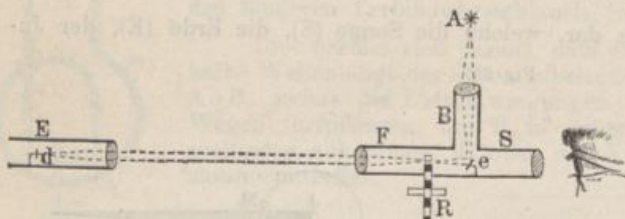


Fig. 338.



Fernrohre auf einen über 8 km weit entfernten Spiegel (d) fallen und beobachtete, ob das vom Spiegel zurückgeworfene Licht während der Drehung des Rades durch die Zahnücken hindurchgelassen (Fig. 338) oder von den Zähnen desselben aufgefangen wurde. Trat letzteres ein, so mußte offenbar während der Zeit, innerhalb welcher das Licht seinen Weg zum Spiegel hin und wieder zurück durchlaufen hatte, an die Stelle der Lücke, durch die der Strahl hindurchgegangen war, ein Zahn getreten sein. (Die von der Lichtquelle A ausgehenden Strahlen traten seitlich in ein Fernrohr ein und wurden durch einen unter 45° gegen die Achse des Fernrohres FS geneigten Spiegel reflektiert.) Dadurch, daß man nun aus der Zahl der Zähne und der Umdrehungsgeschwindigkeit des Rades den außerordentlich kleinen Zeitraum berechnete, welcher verfloß, während ein Zahn des Rades an die Stelle der benachbarten Lücke trat, und daß man den während dieser Zeit vom Lichte zurückgelegten Weg genau bestimmte, ergab sich nahezu die obige Zahl für die Geschwindigkeit des Lichtes.

Übungsstoff. 1. Führe bekannte Erschn. an, aus denen geschlossen werden kann, daß das Licht sich viel schneller fortpflanzt als der Schall. — 2. An einem 10 km entfernten Orte werde eine Kanone abgefeuert. Wie lange dauert es, bis man das Pulver aufblitzen sieht und wie lange, bis der Knall gehört werden kann? — 3. Wievielmals so groß ist die Geschw. des Lichtes als die des Schalles? — 4. Wv. Zeit hat das Licht nötig, um vom Monde und von der Sonne zu uns zu gelangen, wenn der Mond 50 000 Meilen, die Sonne 20 Millionen Meilen von der Erde entfernt ist? — 5. Fizeau beobachtete bei der Bestimmung der Geschw. des Lichtes, daß ein Zahnrad mit 720 Zähnen und 720 Lücken von Zahnbreite in 1 Sek. 12,6 Umläufe machen mußte, damit das Licht zum ersten Male verschwand. a. Der wievielte Teil von 1 Sek. war demnach nötig, damit an Stelle einer Lücke der nächstfolgende Zahn trat? b. Welchen Weg hatte das zurückgekehrte Licht zu durchlaufen, wenn der Spiegel d vom Fernrohre 8633 m entfernt war? c. Welcher Weg ergab sich hieraus für 1 Sek.? d. Um wv. war diese Geschw. gegen die oben angegebene zu groß? (Spätere Versuche führten zu der oben angegebenen Zahl.)

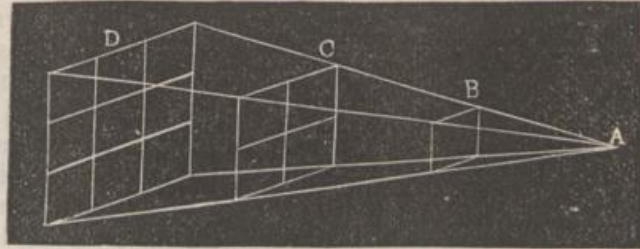
§ 97. Stärke der Beleuchtung. Photometer. Die tägliche Erfahrung lehrt, daß die Stärke der Beleuchtung mit der Entfernung von der Lichtquelle abnimmt. Dies ist durch Fig. 339

†) Die Bahngeschw. der Erde ist 29,5 km, der Aberrationswinkel 20,45 Bogensekunden, die Geschw. des Lichtes also gleich $\frac{29,5}{\tan 20,45'} = \frac{29,5}{0,0001} = 295\,000$ km. Für die Astronomie ist die Aberration des Lichtes auch insofern von Wichtigkeit, als sie einen direkten Beweis für die Bewegung der Erde um die Sonne bietet.

veranschaulicht, nach welcher die von A ausgehende Lichtmenge infolge der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes in der 2- oder 3fachen Entfernung

sich auf eine 4- oder 9mal so große Fläche verteilt und demnach auf gleichgroße Flächen nur der vierte oder neunte Teil des Lichtes fällt.

Fig 339.



Die Stärke der Beleuchtung (Intensität des Lichtes) nimmt ab, wie das Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle zunimmt.

Wenn J und J_1 die Beleuchtungsstärken, E und E_1 die Entfernungen von derselben Lichtquelle oder von zwei gleichstarken Lichtquellen bedeuten, so ist in Zeichen:

$$J : J_1 = E_1^2 : E^2.$$

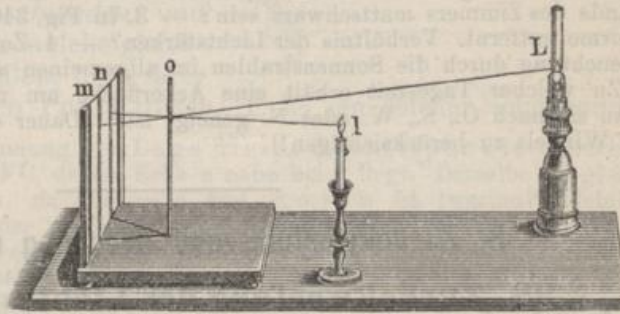
Bem. Die Ausdrücke Stärke der Beleuchtung und Helligkeit dürfen nicht ohne weiteres für einander gesetzt werden. Sind die beleuchteten Flächen von verschiedener Beschaffenheit (etwa verschieden gefärbt oder die eine glatt und die andere rau), so kann ihre Helligkeit bei gleichem Abstände von derselben Lichtquelle verschieden sein.

Instrumente, welche unter Anwendung des genannten Gesetzes dazu dienen, die Stärke zweier Lichtquellen miteinander zu vergleichen, werden **Photometer** oder **Lichtmesser** genannt.

Bei dem Photometer von Rumford (Fig. 340) werden die zu vergleichenden Flammen

Fig 340.

so aufgestellt, daß die beiden Schatten m und n des Stabes o nebeneinander fallen und auf dem hellen Schirm gleichdunkel erscheinen. Da sie dann von den ihnen nicht zugehörigen Flammen gleichstark beleuchtet



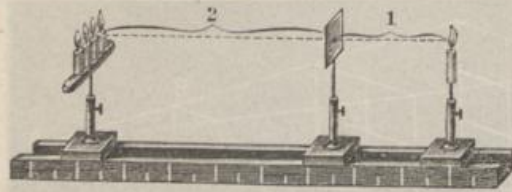
werden, so empfängt auch die Fläche des Schirmes von beiden Lichtquellen gleiche Lichtmengen, und die Lichtstärken beider Flammen verhalten sich dann wie die Quadrate ihrer Entfernungen vom Schirme.

Die richtige Beurteilung wird hierbei dadurch erschwert, daß die Schatten meist verschieden gefärbt erscheinen.

Um die Lichtstärken verschiedener Lichtquellen in Zahlen ausdrücken zu können, bezieht man sie auf die Lichtstärke von sogen. Normalkerzen (in Deutschland z. B. auf das Licht einer 2 cm dicken Paraffinkerze, deren Flamme 5 cm hoch ist).

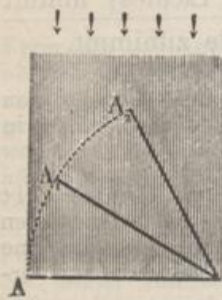
Das Photometer von Bunsen (Fig. 341) besteht aus einem Papierschirm, in dessen Mitte sich ein mit flüssigem Stearin gemachter Fettfleck befindet. Der Fleck erscheint hell oder dunkel, je nachdem der Schirm stärker von der Rückseite oder von der Vorderseite beleuchtet wird; er verschwindet, wenn die Beleuchtung von beiden Seiten gleichstark ist. Man verschiebt demnach auf der mit einer Centimeterteilung versehenen Latte den Schirm so lange, bis der Fleck verschwindet, und vergleicht dann die Entfernung beider Lichtquellen.

Fig. 341.



Bem. Durch Versuche mit dem Bunsenschen Photometer läßt sich das oben angeführte Gesetz über die Beleuchtungsstärke leicht bestätigen.

Fig. 342.



Die Beleuchtungsstärke ist nicht nur von der Entfernung der Lichtquelle, sondern auch von der Größe des Neigungswinkels der beleuchteten Fläche abhängig, d. h. des Winkels, den die Strahlen mit der Fläche bilden (Fig. 342). Je mehr sich dieser Winkel einem rechten nähert, desto mehr Strahlen fallen auf die Fläche.

Die Beleuchtungsstärke ist um so geringer, je schräger die Lichtstrahlen auffallen.†)

Übungsstoff. 1. Wievielmals so stark wird die Beleuchtung einer Fläche, wenn man die Lichtquelle von 2 m auf 0,5 m nähert? — 2. Warum müssen bei genauen Messungen der Lichtstärke mittelst der oben dargestellten Photometer die Wände des Zimmers mattschwarz sein? — 3. In Fig. 340 sei L 36, l nur 8 cm vom Schirme entfernt. Verhältnis der Lichtstärken? — 4. Zu welcher Tageszeit muß die Beleuchtung durch die Sonnenstrahlen im allgemeinen am stärksten sein, u. w.? — 5. Zu welcher Tageszeit erhält eine Ackerfläche am meisten Licht und Wärme, wenn sie nach O., S., W. oder N. geneigt ist? (Dauer der Bestrahlung und Größe des Winkels zu berücksichtigen!)

B. Zurückwerfung und Brechung des Lichtes.

§ 98. Zurückwerfung des Lichtes durch gekrümmte Spiegel. In § 27 und 29 berücksichtigten wir nur solche Erscheinungen, welche entstehen, wenn die vom Lichte getroffenen Grenzflächen zweier Körper eben sind oder doch als ebene Flächen angesehen werden können. Von dieser Beschränkung sehen wir jetzt ab und dehnen unsere Betrachtung auf die einfachste gekrümmte Fläche, die Kugelfläche, aus.

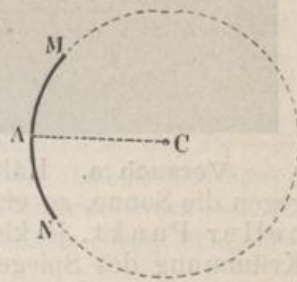
†) Trigonometrisch: $J_1 : J_2 = \sin w_1 : \sin w_2$, wenn w_1 und w_2 die Neigungswinkel der Flächen A_1B und A_2B bezeichnen. (Man denke sich parallel zu AB Ebenen durch A_1 und A_2 gelegt, welche von denselben Strahlen getroffen werden, wie A_1B und A_2B).

Spiegel, deren Flächen so gekrümmt sind, daß sie Abschnitte von Kugeln bilden, heißen **Kugelspiegel** oder **sphärische Spiegel**.¹⁾ Je nachdem die spiegelnde Fläche hohl oder erhaben ist, unterscheidet man **Hohl- oder Konkavspiegel**²⁾ und **erhabene oder Konvexspiegel**.³⁾

Bei den Kugelspiegeln wird das Einfallslot eines Strahles von dem Kugelhalbmesser gebildet, der den Einfallspunkt des Strahles trifft. (Kugelradien stehen senkrecht auf den in ihren Endpunkten an die Kugeloberfläche gelegten Berührungsebenen.) — Außerdem sind folgende besondere Bezeichnungen von Wichtigkeit:

Die von der Mitte eines Kugelspiegels bis zum Mittelpunkte der Kugel gehende gerade Linie heißt **Achse des Spiegels** (AC, Fig. 343). Der Mittelpunkt der Kugel wird **Krümmungsmittelpunkt** des Spiegels genannt. Strahlen, welche durch diesen Punkt gehen, heißen **Hauptstrahlen**.

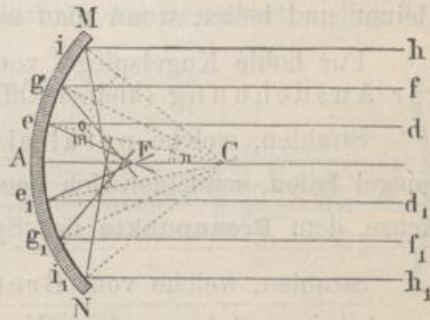
Fig. 343.



1. Hohle Kugelspiegel (sphärische Konkavspiegel).

Der Spiegel MN (Fig. 344) werde parallel zur Achse AC von Sonnenstrahlen getroffen. Um zunächst die Richtung der zurückgeworfenen Strahlen zu bestimmen, denken wir uns nach den Fußpunkten der Strahlen die Einfallslote Ce, Cg u. s. w. gezogen. Da die Achse AC des Spiegels mit jedem der Strahlen und seinem Einfallslot in derselben Ebene liegt, so müssen alle Strahlen nach ihrer Zurückwerfung die Achse schneiden, und zwar müssen diejenigen, welche gleichweit von der Achse einfallen, nach ihrer Zurückwerfung denselben Punkt treffen. F sei ein solcher Schnittpunkt.

Fig. 344.



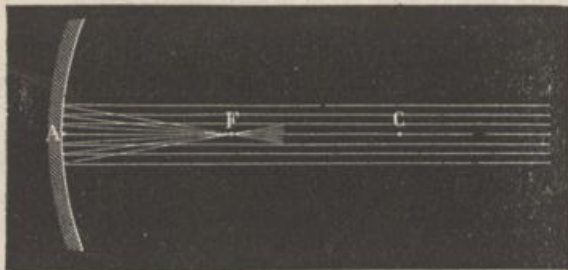
Zur genaueren Bestimmung der Lage dieser Schnittpunkte betrachten wir zunächst das Dreieck eFC, dessen Ecke e nahe bei A liegt. Dasselbe ist gleichschenkelig, denn $\sphericalangle m = n$, da $\sphericalangle m = o$ und $\sphericalangle o = n$ ist (warum?); folglich $FC = Fe$. Je näher nun der Strahl de der Achse des Spiegels liegt, um so mehr wird Fe nahezu = FA, um so mehr also auch $FC = FA$ oder F die Mitte zwischen A und C. Dies gilt für alle ebenso nahe einfallenden Strahlen. Je weiter aber der Strahl von der Achse AC entfernt liegt, desto mehr muß $Fe > FA$ werden. Denn stellt man sich vor, der Strahl de ginge allmählich in die Lage fg und hi über, so würden immer neue gleichschenkelige Dreiecke entstehen und zwar mit unveränderter Basis, aber mit wachsenden Basiswinkeln, also auch mit wachsenden Schenkeln. Die Spitzen dieser Dreiecke, d. h. die Punkte, in denen die zurückgeworfenen Strahlen die Achse schneiden, müssen somit dem Spiegel um so näher rücken, je weiter der einfallende Strahl von der Achse entfernt ist.

Bei schwächerer Krümmung des Spiegels würde das Wachsen der Winkel wegen der größeren Entfernung des Punktes C offenbar langsamer erfolgen. Die Schnittpunkte der Strahlen würden dann mehr in der Mitte von AC

1) σφαίρα (sphaira), die Kugel; 2) concavus, hohl; 3) convexus, gewölbt.

zusammenfallen und bei kleiner Öffnung des Spiegels nur einen einzigen Punkt bilden (Fig. 345). Gingen die Strahlen umgekehrt von F aus, so würde der zunächst

Fig. 345.



entstehende Strahlenkegel durch den Spiegel entgegengesetzt in ein Bündel paralleler Strahlen umgewandelt werden. Welchen Einfluss müßte es auf die Richtung der Strahlen ausüben, wenn man den leuchtenden Punkt dem Spiegel näherte oder vom Spiegel etwa bis zum Krümmungsmittelpunkte entfernte? — Bestätigung:

Versuch a. Hält man einen hohlen Kugelspiegel (nach Fig. 345) gegen die Sonne, so erscheint mitten vor dem Spiegel ein um so kleinerer heller Punkt, je kleiner die spiegelnde Fläche und je schwächer die Krümmung des Spiegels ist. Papier entzündet sich an dieser Stelle. — Von demselben Punkte aus entsteht im verdunkelten Zimmer durch das Licht einer kleinen, aber möglichst hellen Kerzenflamme auf einem weißen Papierschirm ein heller Schein, der die Gestalt und auch nahezu die Größe des Spiegels hat. Dieser Lichtschein wird größer, und matter, wenn man die Flamme dem Spiegel mehr nähert, dagegen kleiner und heller, wenn man sie weiter vom Spiegel entfernt.

Für hohle Kugelspiegel von flacher Krümmung und geringer Ausdehnung (kleiner Öffnung) gelten somit folgende Sätze:

Strahlen, welche parallel zur Achse auf einen hohlen Kugelspiegel fallen, schneiden sich nach ihrer Zurückwerfung in der Mitte der Achse, dem Brennpunkte des Spiegels.

Strahlen, welche vom Brennpunkte ausgehen, werden parallel zur Achse zurückgeworfen. Hauptstrahlen fallen in sich selbst zurück.

Entstehung von Bildern durch Hohlspiegel.

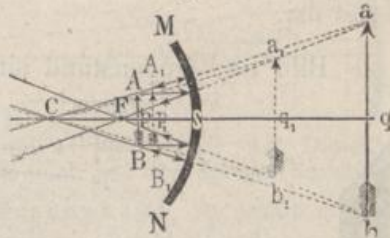
AB (Fig. 346—348) sei ein Gegenstand, von dem Licht auf den Spiegel MN fällt; C sei der Krümmungsmittelpunkt, F der Brennpunkt (FS also die Brennweite) des Spiegels. Es soll untersucht werden, 1) ob und was für ein Bild entsteht, 2) welchen Einfluss es auf das Bild ausübt, wenn der Gegenstand seine Lage gegen den Spiegel ändert. — Zu diesem Zwecke genügt es, den Verlauf je zweier Strahlen zu verfolgen, welche von den Endpunkten des Gegenstandes ausgehen, und von denen der eine Strahl den Krümmungsmittelpunkt des Spiegels trifft, der andere mit der Achse des Spiegels parallel läuft. Ersterer wird in sich selbst, letzterer nach dem Brennpunkte zurückgeworfen.

1. Der Gegenstand befinde sich **innerhalb der Brennweite** (Fig. 346, folg. Seite). In diesem Falle *divergieren* die von demselben Punkte ausgehenden Strahlen nach ihrer Reflexion und rufen daher den Ein-

druck hervor, als kämen sie von den hinter den Spiegel gelegenen Punkten a und b , in denen ihre Verlängerungen sich schneiden. Wegen dieser scheinbaren Vereinigung der von denselben Punkten ausgehenden Strahlen kann somit wie beim ebenen Spiegel nur ein *aufrechtes, scheinbares Bild* entstehen.

Denkt man sich nun, der Gegenstand AB würde dem Spiegel in der Richtung der Achse etwa bis A_1B_1 genähert, so behält das parallele Strahlenpaar seine Lage bei, während die mit den Krümmungsradien zusammenfallenden Strahlen sich der Achse nähern. Dadurch rücken die scheinbaren Schnittpunkte der Strahlen dem Spiegel näher (a_1 und b_1) und das Bild wird kleiner. Was würde eintreten, wenn man den Gegenstand weiter vom Spiegel entfernte? Vergleich mit einem ebenen Spiegel! — Bestätigung durch den Versuch.

Fig. 346.



Befindet sich ein Gegenstand innerhalb der Brennweite eines hohlen Kugelspiegels, so erblickt ein vor dem Spiegel befindliches Auge hinter demselben ein aufrechtes, scheinbares Bild.

2. Der Gegenstand befinde sich ausserhalb der Brennweite (Fig. 347 und 348). Die von A und B ausgehenden Strahlen, von denen 1 und 3 wie vorhin mit der Achse parallel laufen, 2 und 4 durch C gehen, *konvergieren* nach ihrer Reflexion, und da sie sich in a und b schneiden, so entsteht ein *umgekehrtes, wirkliches Bild*.

Fig. 347.

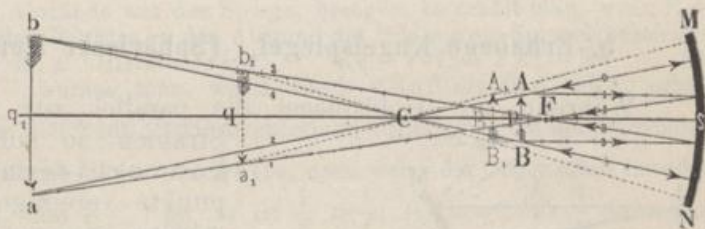
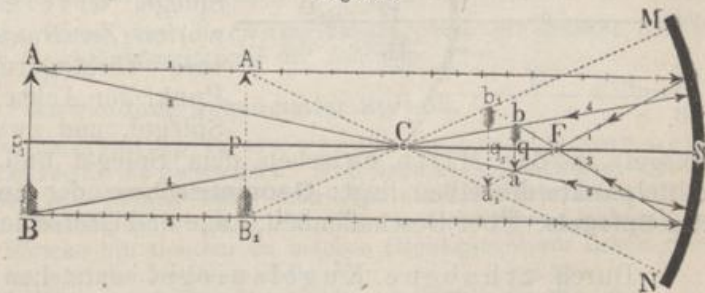


Fig. 348.



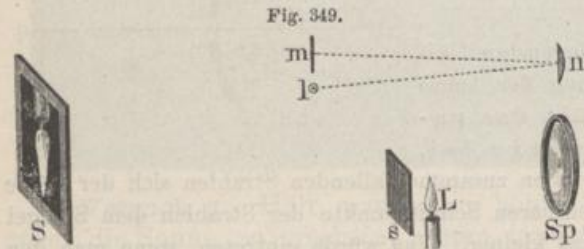
Wie würde die Lage des Bildes sich ändern, wenn man den Gegenstand (Fig. 347)

1. in der Richtung der Achse vom Brennpunkte weiter entfernte, 2. dem Brennpunkte mehr näherte? — Erkläre Fig. 348 und beurteile, welchen Einfluss es auf die Lage des Bildes ausübt, wenn der Gegenstand seine Lage gegen den Spiegel ändert. Bestätigung durch den Versuch.

Von einem ausserhalb der Brennweite befindlichen Gegenstande entsteht vor einem hohlen Kugelspiegel ein umgekehrtes, wirkliches Bild.

In Fig. 349 bezeichnet s einen Schirm, welcher die direkte Beleuchtung des Schirmes S verhindert; l , m und n deuten die Anordnung der Teile an für den Fall, daß die Flamme im Krümmungsmittelpunkte des Spiegels sich befindet; l stellt die Flamme, n den Spiegel und m den Schirm zum Auffangen des Bildes dar.

Bild und Gegenstand sind gleichgroß und gleichweit vom Spiegel entfernt, wenn der Gegenstand sich im Krümmungsmittelpunkte befindet. Das Bild wird um so größer und entfernt sich um so weiter vom Spiegel, je mehr man den Gegenstand dem Brennpunkte nähert; es wird

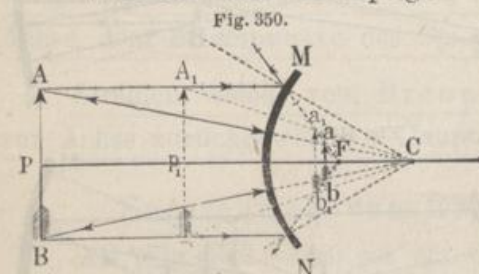


hingegen um so kleiner und nähert sich dem Brennpunkte um so mehr, je weiter man den Gegenstand vom Spiegel entfernt.

Die Undeutlichkeit der Bilder, welche bei einem hohlen Kugelspiegel dadurch entsteht, daß die in der Nähe des Spiegelrandes einfallenden Strahlen die Achse in kürzerem Abstände vom Spiegel schneiden als die mittleren Strahlen, wird **sphärische Abweichung** genannt. Spiegel mit **parabolischer Krümmung** sind frei von diesem Fehler (Blendscheiben in den Laternen der Lokomotiven, siehe ferner Fig. 378.)

b. Erhabene Kugelspiegel. (Sphärische Konkavspiegel.)

Während ein Hohlspiegel die parallel zur Achse auffallenden Strahlen so zurückwirft, daß sie konvergieren und sich im Brennpunkte vereinigen (**Sammelspiegel**), werden sie von einem erhabenen Spiegel divergierend zurückgeworfen (**Zerstreuungsspiegel**, Fig. 350).



Ihre Verlängerungen treffen einen Punkt der Achse, welcher hinter dem Spiegel, und zwar (wie beim Hohlspiegel) in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Krümmungsmittelpunkte desselben liegt: **Geometrischer oder negativer Brennpunkt des Spiegels**. Über Beschaffenheit, Lage und Größe der Bilder ergibt sich:

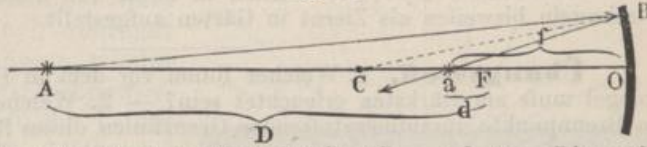
Durch erhabene Kugelspiegel entstehen nur aufrechte, scheinbare Bilder (zwischen dem negativen Brennpunkte und dem Spiegel). Diese Bilder werden um so kleiner, je weiter man Gegenstand und Spiegel voneinander entfernt.

In den Figuren 346, 347, 348 und 350 ist $\triangle abC \sim \triangle ABC$. Hieraus folgt für die Größe der Bilder die Proportion: $ab : AB = e : E$, wenn e und E diejenigen Strecken der verlängerten Achse bezeichnen, um welche Bild und Gegenstand vom Krümmungsmittelpunkte C entfernt sind. (Proportion in Worten?)

Ableitung eines allgemeinen Gesetzes für Kugelspiegel mit kleiner Öffnung.

Hohlspiegel: In Fig. 351 stelle AB einen von A ausgehenden, Ba den vom Spiegel zurückgeworfenen Strahl dar, C sei der Krümmungsmittelpunkt und F der Brennpunkt. Es ist $AC : aC = AB : aB$ (da der Dreieckswinkel ABA durch BC halbiert ist), oder wenn B der Achse sehr nahe liegt, annähernd $AC : aC = AO : ao$. Diese Abstände lassen sich sowohl auf den Brennpunkt als auch auf den Spiegel beziehen:

Fig. 351.



1. Bezieht man die Abstände auf den Brennpunkt, so erhält man für obige Proportion nach der Figur $(D-f) : (f-d) = (D+f) : (f+d)$ oder nach Umstellung der Glieder $(D+f) : (D-f) = (f+d) : (f-d)$, woraus durch Addition und Subtraktion der Glieder desselben Verhältnisses folgt:

$$2D : 2f = 2f : 2d \quad \text{oder} \quad D : f = f : d, \text{ also } Dd = f^2 \quad \text{oder} \quad d = \frac{f^2}{D}.$$

Hiernach läßt sich die Lage des Bildes berechnen. — In Worten:

Die Brennweite ist das geometrische Mittel zwischen den Entfernungen des Brennpunktes vom Gegenstande und vom Bilde.

In der Gleichung $d = \frac{f^2}{D}$ hat man zur Berechnung der Bildweite für den Fall, daß der Gegenstand (vom Brennpunkte aus) nicht an der vom Spiegel abgewandten Seite, sondern an der dem Spiegel zugewandten Seite (also innerhalb der Brennweite) liegt, D negativ zu setzen; dadurch wird auch d negativ, das Bild liegt also mit dem Gegenstande vom Brennpunkte aus in derselben Richtung.

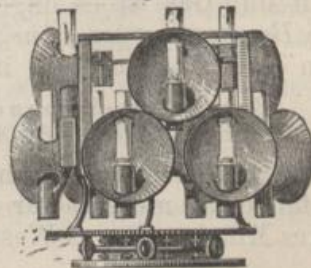
2. Werden die Abstände auf den Spiegel bezogen, so erhält man, wenn E den Abstand des leuchtenden Punktes, e den Abstand des Bildes vom Spiegel bezeichnet: $(E-2f) : (2f-e) = E : e$. Hieraus folgt: $Ee - 2ef = 2Ef - Ee$ oder $2Ee = 2ef + 2ef$, woraus man, wenn durch $2Eef$ dividiert wird, erhält: $\frac{1}{f} = \frac{1}{E} + \frac{1}{e}$. In dieser Gleichung (Reciprokenformel) ergibt sich bei der Berechnung der Bildweite für subjektive Bilder e negativ, denn wenn der Gegenstand innerhalb der Brennweite liegt, also $E < f$ ist, so ist $\frac{1}{E} > \frac{1}{f}$; folglich muß $\frac{1}{e}$ subtrahiert werden. — Für *Konkavspiegel* ist außerdem f negativ zu setzen. In Worten:

Der reciproke Wert der Brennweite ist gleich der Summe aus den reciproken Werten der Gegenstandsweite und der Bildweite.

Anwendung gekrümmter Spiegel.

Von den gekrümmten Spiegeln werden im praktischen Leben namentlich *Hohlspiegel* angewandt. Man benutzt sie entweder, um den nahe vor einem Lichte befindlichen Raum möglichst stark zu erleuchten (Blendscheiben in Laternen, Flurlampen u. s. w.), oder um das Licht einer Lichtquelle auf eine möglichst weite Strecke hin sichtbar zu machen (Hohlspiegel vor Lokomotiven, auf Leuchttürmen u. s. w.). Im ersteren Falle ist die Regelmäßigkeit der Krümmung weniger wichtig, im letzteren sind nur parabolische Krümmungen brauchbar, da die von der Lichtquelle ausgehenden Strahlen sämtlich parallel zurückgeworfen werden müssen. Auf Leuchttürmen wurden seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts feststehende und drehbare Spiegelapparate (Fig. 352) angewandt, welche jedoch in neuester Zeit immer mehr durch noch vollkommnere Apparate ersetzt worden sind (§ 101, Fig. 368). Der sicheren Unterscheidung wegen

Fig. 352.



erfolgt die Drehung der Apparate mit verschiedener Geschwindigkeit (Blick- oder Blinkfeuer; in Fig. 352 stehen neun Lampen in drei Gruppen, sodafs je drei ihr Licht immer gleichzeitig nach derselben Richtung senden).

Erhabene Spiegel werden in Form von hohlen, inwendig geschwärtzten Glaskugeln bisweilen als Zierat in Gärten aufgestellt.

Übungsstoff. 1. Welcher Raum vor dem in Fig. 344 dargestellten Hohlspiegel mufs am stärksten erleuchtet sein? — 2. Welche Gestalt haben die beiden im Brennpunkte zusammenstofsenden Grenzlinien dieses Raumes in einer durch letzteren in der Richtung der Achse des Spiegels gelegten Ebene? (Brennlinie.) — 3. Welche Gestalt hat demnach die den Raum begrenzende Fläche? (Brennfläche, sichtbar in aufsteigendem dichten Rauche, auch in Obertassen, welche halb mit Wasser gefüllt sind, das durch Milch ein wenig getrübt worden ist.) Erkl.! — 4. Einem Spiegel werde im Dunkeln eine Flamme aus grösster Entfernung immer mehr genähert. Wie ändern sich die Lichtwirkungen, wenn der Spiegel eben, erhaben oder hohl ist? — 5. Mit Hilfe eines Hohlspiegels und einer sehr stark leuchtenden Flamme kann man im verdunkelten Zimmer bewirken, dafs von einem versteckt aufgestellten Blumenstraufe etwa auf einer Blumenvase ein täuschend ähnliches, wirkliches Lichtbild entsteht. Wie ist dies auszuführen? (Siehe Fig. 349.) — 6. Mittelst eines Hohlspiegels will man einen Lichtschein möglichst weit hinwerfen, ein andermal eine ziemlich grofse, nahe gelegene Fläche dadurch erhellen. Wo mufs man die Flamme anbringen? Praktische Fälle! — 7. Am Gemäuer von Brücken ist bei direktem Sonnenlichte bisweilen ein eigentümliches Spiel unregelmäfsig gekrümmter Lichtstreifen sichtbar. Erkl.! — 8. Wie lassen sich im Zimmer durch Sonnenstrahlen „zitternde Kringeln“ an die Wand malen? — 9. Wie läfst sich durch direktes Sonnenlicht der Krümmungshalbmesser (r) eines Hohlspiegels bestimmen? — 10. Bei welchen Aufstellungen von Spiegel, Flamme und Schirm entstehen wirkliche Bilder, wenn $r = 30$ cm ist (Frage 9)?

§ 99. Brechungsexponent. Totale Reflexion. Luftspiegelung.

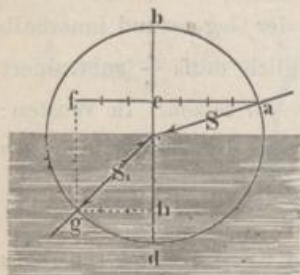
In Fig. 353 sei S ein in c aus Luft in Wasser übergehender Lichtstrahl, bc sein Einfallslot. Beschreibt man dann um c mit dem Radius ca einen Kreis und zieht ae und gh parallel zum Wasserspiegel, so entstehen die beiden rechtwinkligen Dreiecke aec und ghc , in denen die dem Einfallslot und dem Brechungswinkel gegenüberliegenden Katheten ae und gh in einem bestimmten Verhältnis zu einander stehen, das nach genauen Versuchen für jede Richtung des einfallenden Strahles dasselbe ist.

Dies gilt auch für alle anderen durchsichtigen Körper. So ist z. B. das Brechungsverhältnis für Luft und Wasser ungefähr $4:3$, d. h. wenn man ae in vier gleiche Teile teilt, so enthält gh nur drei solcher Teile; für Luft und Gas ist es ungefähr $3:2$. Die beiden Brüche $\frac{4}{3}$ und $\frac{3}{2}$ werden die *Brechungsexponenten* für den Übergang aus Luft in Wasser und für den Übergang aus Luft in Gas genannt.

Brechungs-Exponenten: Für den Übergang aus Luft in Weingeist ungefähr 1,37, Terpentinöl 1,48, Schwefelkohlenstoff 1,65, Diamant 2,49.

Da Lichtstrahlen um so stärker gebrochen werden, je schräger sie einfallen, so mufs es für den Übergang aus einem dichteren in ein dünneres Mittel (z. B. aus Wasser in Luft, Fig. 354, folg. Seite), wobei die Strah-

Fig. 353.



len sich immer stärker vom Einfallslotte entfernen, eine Grenze geben, an welcher die gebrochenen Strahlen die Grenzfläche beider Mittel streifen. Für diesen Einfallswinkel (Grenzwinkel) ist der Brechungswinkel demnach 90° . Alle noch schräger einfallenden Strahlen müssen wieder in das dichtere Mittel zurückgeworfen werden. Die Grenzfläche beider Mittel muß daher, vom dichteren Mittel aus schräg genug betrachtet, wie ein Spiegel erscheinen. Bestätigung:

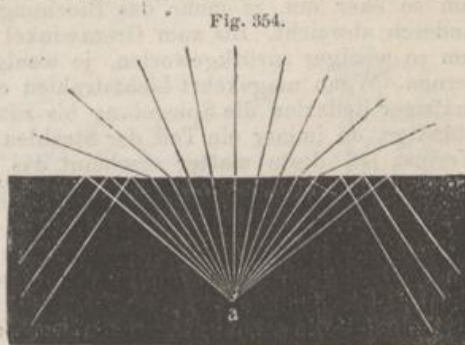


Fig. 354.

Versuch. Hält man ein mit Wasser oder einer anderen durchsichtigen Flüssigkeit gefülltes Glas (Fig. 355) so hoch, daß man von unten schräg gegen den Flüssigkeitsspiegel sehen kann, so erscheint derselbe wie ein Quecksilber-spiegel: von einem in das Wasser eingetauchten Stabe ist ein deutliches Spiegelbild sichtbar.

Fig. 355.



Derjenige Einfallswinkel, bei welchem der Austritt eines Lichtstrahles in ein dünneres Mittel nicht mehr stattfinden kann, wird der Grenzwinkel genannt.

Lichtstrahlen, welche ein dünneres Mittel treffen, werden bei Überschreitung des Grenzwinkels sämtlich in das dichtere Mittel zurückgeworfen: Vollständige Zurückwerfung oder totale Reflexion.

Die totale Reflexion wurde von Kepler (1611) entdeckt, während das Brechungsgesetz der Holländer Snell (1620) auffand. Eine genaue Bestimmung der Brechungsexponenten, deren Kenntnis für die zweckmäßige Konstruktion optischer Instrumente unentbehrlich ist, lehrte erst Fraunhofer (1814). Die Brechungsexponenten werden ermittelt durch die Messung der Ablenkung, welche ein Lichtstrahl in einem Prisma der betreffenden Substanz erleidet. †)

†) Trigonometrischer Ausdruck für das Brechungsgesetz: Der Sinus des Einfallswinkels und der Sinus des Brechungswinkels stehen in einem bestimmten Verhältnis zu einander. Nach der Figur ist, wenn w den Einfallswinkel, w_1 den Brechungswinkel und r den Radius des Kreises bezeichnet, $\frac{ea}{r} = \sin w$, $\frac{gh}{r} = \sin w_1$, mithin $\frac{\sin w}{\sin w_1} = \frac{ea}{gh} = \frac{4}{3}$, allgemein $\frac{\sin w}{\sin w_1} = n$. Der Einfallswinkel kann von 0 bis 90° wachsen. Ist nun $w = 0$, so muß auch $w_1 = 0$ sein (da $\sin w = n \cdot \sin w_1 = 0$), d. h. der senkrecht einfallende Strahl geht ungebogen in das andere Mittel über. Ist $w = 90^\circ$, so hat $\sin w$ seinen größten Wert: $\sin w = 1$; setzen wir diesen Wert in obige Gleichung für $\sin w$ ein, so ergibt sich $\frac{1}{\sin w_1} = n$, also $\sin w_1 = \frac{1}{n}$. Derjenige Winkel, dessen Sinus $= \frac{1}{n}$ ist, ist also der Grenzwinkel. Für den Übergang aus Luft in Wasser ist $n = \frac{4}{3}$, der Grenzwinkel (w_1) also derjenige, dessen Sinus $= \frac{1}{4/3} = \frac{3}{4}$ ist. Hiernach ist $w_1 = 48^\circ 35'$, für Luft und Kronglas ist $n = \frac{3}{2}$, $\sin w_1$ also $= \frac{1}{3/2} = \frac{2}{3}$, $w_1 = 42^\circ$.

Der Grenzwinkel für den Übergang von Lichtstrahlen aus Wasser in Luft ist $48^{\circ} 35'$, aus Glas (Kronglas) in Luft 42° . Die totale Reflexion tritt überhaupt um so eher ein, je mehr das Brechungsvermögen des einen Mittels von dem des anderen abweicht. Bis zum Grenzwinkel werden Lichtstrahlen vom dünneren Mittel um so weniger zurückgeworfen, je weniger die Strahlen sich vom Einfallslot entfernen. Wenn umgekehrt Lichtstrahlen ein dichteres Mittel treffen, so ist bei regelmäßiger Reflexion die Spiegelung bis zum größten Einfallswinkel (90°) eine unvollständige, da immer ein Teil der Strahlen in den Körper eindringt. Je größer dieser Verlust ist, desto matter erscheint das Bild. (Vergleich zwischen einem Bilde im Spiegel und im Wasser.)

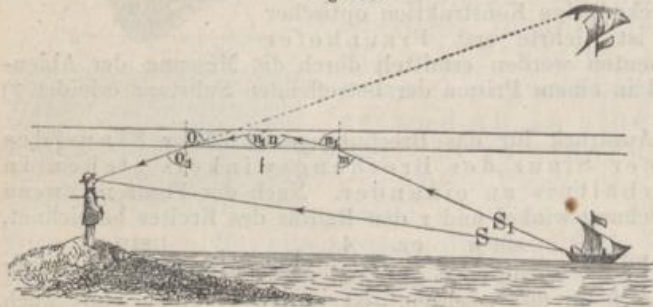
Aus der totalen Reflexion erklärt sich der zuweilen beobachtete *Glanz* und die *Undurchsichtigkeit* von Körpern, die an sich durchsichtig sind. Der Glanz muß um so stärker sein, je größer das Brechungsvermögen des Körpers ist, denn um so kleiner ist der Grenzwinkel und um so mehr Licht kann also ohne Verlust zurückgeworfen werden. Unter den festen Körpern zeichnet sich in dieser Beziehung besonders der Diamant aus, dessen Glanz man noch dadurch erhöht, daß man die Zahl der vollkommen spiegelnden Flächen durch den Schliff vergrößert. Undurchsichtigkeit kann durch vollständige Zurückwerfung der Strahlen entstehen, wenn die Strahlen in einem Körper unzählige Male in die Luft, welche die Zwischenräume des Körpers ausfüllt, zurückgeworfen werden. Gepulvertes Glas ist aus diesem Grunde undurchsichtig; gießt man aber eine Flüssigkeit darauf, welche das Licht ungefähr ebenso stark bricht (etwa Petroleum), so wird es wieder durchsichtig.

Die totale Reflexion findet eine Anwendung beim Gebrauche von Mikroskopen, auf denen man ein Glasprisma so befestigt, daß das Bild des betrachteten Gegenstandes zum Nachzeichnen auf einem neben dem Instrumente liegenden Blatte Papier sichtbar wird (Zeichenprisma). In gleicher Weise wird bei den vollkommensten Leuchtapparaten auf Leuchttürmen durch große Glasprismen bewirkt, daß die Lichtstrahlen parallel auf das Meer fallen (siehe Fig. 368).

Auf der totalen Reflexion beruht auch die Entstehung der *Luftspiegelungen*, welche bisweilen auf den Meeren der Polargegenden und in heißen Sandwüsten vorkommen.

Auf den Meeren der Polargegenden erscheint bisweilen hoch in der Luft das umgekehrte Bild eines fernen Schiffes (Fig. 356).*) Diese

Fig. 356.



Einfallsloten. Dadurch wird ihre Richtung immer flacher, und es tritt schließlich eine totale Reflexion ein. Die bis dahin aufwärts gerichteten Strahlen gehen dann wieder abwärts, sodafs der Beobachter den Eindruck erhält, als ob sie von einem hoch gelegenen Punkte herkämen.

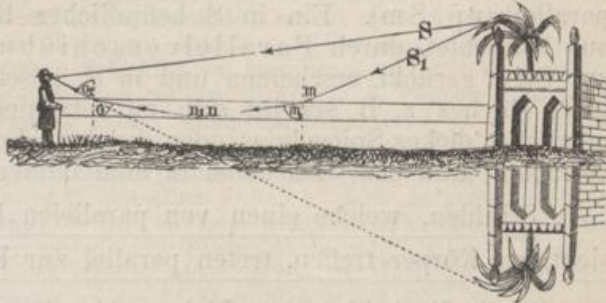
*) In Fig. 356 und 357 ist der Einfachheit wegen vor und nach der totalen Reflexion nur eine einmalige Brechung angegeben. Die Entfernung, in welcher Gegenstand und Bild dem Beobachter erscheinen, hat man sich bedeutend größer vorzustellen, als die Figur nach den Gröfsenverhältnissen der dargestellten Teile schliessen läfst.

Erscheinung tritt nur dann ein, wenn die unteren, auf dem Meere lagernden Luftschichten bedeutend kälter und daher viel dichter sind als die höheren Schichten. Gelangen nämlich die von dem Gegenstande ausgehenden, schräg aufwärts gerichteten Strahlen (S_1) in dünnere Schichten, so werden sie wiederholt gebrochen und entfernen sich mehr und mehr von ihren

In heißen Sandwüsten sind oft Bilder sichtbar, welche wie bei einem Wasserspiegel unter dem Gegenstande erscheinen (Fig. 357), sodafs es den Eindruck hervorrufft, als sei der Gegenstand von Wasser umgeben.

Diese Art der Luftspiegelung wird dadurch hervorgerufen, dafs die Dichte der Luft infolge der starken Erhitzung des sandigen Bodens nicht nach oben, sondern nach unten hin abnimmt, sodafs die anfangs schräg abwärts gerichteten Lichtstrahlen nach wiederholter Brechung durch totale Reflexion sich schräg aufwärts wenden. Die total reflektierende Luftschicht glänzt dabei wie ein Spiegel. Da der Beobachter die oberen Teile der entfernten Gegenstände deutlich erkennt, ohne den Boden, auf welchem sie stehen, sehen zu können, und auch das Blau des Himmels in der spiegelnden Fläche erblickt, so ist die Täuschung eine sehr vollständige.

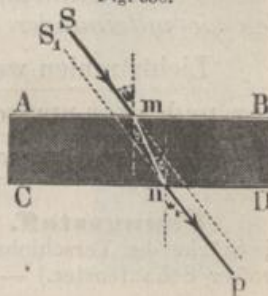
Fig. 357.



Übungsstoff. 1. Die Lichtstärke der in Gewässern sichtbaren Spiegelbilder hängt nicht nur von der Helligkeit der Beleuchtung, sondern auch von der Richtung ab, in welcher man ins W. hineinsieht; inwiefern? Erkl.! — 2. In Aquarien sieht man die Fische, wenn man von unten schräg gegen die Oberfläche des W. blickt, über dem W. Erkl.! — 3. Manche Pflanzenblätter zeigen einen hellen Silberglanz, wenn man sie in W. taucht; zieht man sie wieder aus dem W. heraus, so sind sie kaum benetzt. Wie erklärt sich dies? — 4. Die Risse in geborstenen Fensterscheiben erscheinen im direkten Sonnenlichte stark glänzend. Grund! — 5. Warum sind es bei durchsichtigen Edelsteinen namentlich die vom Auge abgewandten Flächen, welche den starken Glanz erzeugen? — 6. Kleine Luftblasen glänzen im W. wie Perlen; desgl. Tautropfen im direkten Sonnenlichte an der Sonnenseite. Erkl.! (Luft in W. und W. in Luft.) — 7. Vgl. die totale Reflexion mit der bekannten Ersch., welche eintritt, wenn man einen dünnen Stein mit der Hand kräftig und möglichst flach auf eine Wasserfläche wirft. — 8. Durchsichtige Körper sind in einer Flüssigkeit nicht zu erkennen, wenn beide das Licht gleichstark brechen (z. B. ein Glasstab in einer Mischung von Schwefelkohlenstoff und Terpentin); sie treten aber um so deutlicher hervor, je verschiedener das Lichtbrechungsvermögen beider K. ist. Wie wird sich hiernach ein Diamant von ebenso geschliffenem Glase leicht unterscheiden lassen? — 9. Warum ist Seifenschaum um so undurchsichtiger, je kleiner die Blasen sind, während doch eine einzelne Seifenblase durchsichtig ist? — 10. Warum müssen die Lichtstrahlen, welche die beiden Luftspiegelungen (Fig. 356 und 357) hervorrufen, beim Übergange in die entgegengesetzte Richtung eine sehr flache Lage haben? — 11. Warum müssen die Erschn. verschwinden, wenn man sich den Gegenständen mehr und mehr nähert?

§ 100. Brechung des Lichtes beim Durchgange durch Platten und Prismen. Um die Erscheinungen kennen zu lernen, welche eintreten, wenn Lichtstrahlen nach ihrem Durchgange durch durchsichtige Körper sich in dem ersten Mittel weiter fortbewegen, betrachten wir zunächst den Durchgang des Lichtes durch eine durchsichtige Platte mit parallelen Grenzflächen. Der Strahl S, Fig. 358, treffe die Platte im Punkte m; n sei der Punkt,

Fig. 358.



in welchem er wieder austritt. Sind w und o , w_1 und o_1 die zugehörigen Einfallswinkel, so ist $\sphericalangle o = o_1$ und folglich $w = w_1$ (warum?). Der austretende Strahl ist somit dem einfallenden Strahl parallel ($np \parallel Sm$). Ein in S befindlicher Körper muß daher, von p aus betrachtet, durch Parallelverschiebung der Strahlen ein wenig zur Seite gerückt erscheinen und in S_1 gesehen werden. — Die Schrift eines Buches z. B. scheint sich zu verschieben, wenn man sie durch möglichst dickes Spiegelglas oder durch mehrere Scheiben dünnen Glases betrachtet und das Glas dabei in eine immer schrägere Lage bringt.

Strahlen, welche einen von parallelen Ebenen begrenzten, durchsichtigen Körper treffen, treten parallel zur Einfallrichtung wieder aus.

Sind die beiden von Lichtstrahlen getroffenen Grenzflächen eines durchsichtigen Körpers nicht parallel, so können die Strahlen auch

Fig. 359.

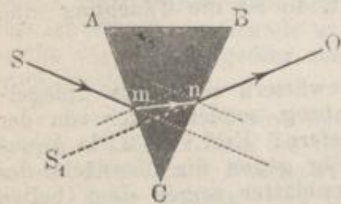
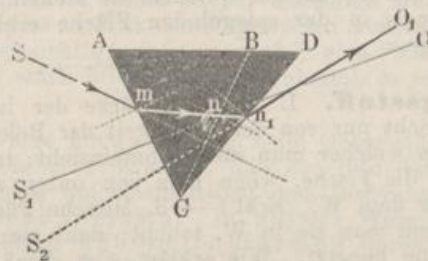


Fig. 360.



nicht parallel zur Einfallrichtung wieder austreten; sie werden vielmehr so gebrochen, daß sie sich von der

Kante des brechenden Körpers desto mehr abwenden, je größer der Winkel

Fig. 361.



ist, den die Grenzflächen miteinander bilden. Ein in S , Fig. 359, befindlicher Körper würde, von O aus durch das Glas betrachtet, nach S_1 verschoben erscheinen. Diese Verschiebung muß offenbar um so mehr betragen, je größer der von den beiden Grenzflächen gebildete Winkel (Fig. 360) und je stärker das Lichtbrechungsvermögen der Substanz des durchsichtigen Körpers ist. — Bestätigung durch einen Versuch

nach Fig. 361.

Jeder durchsichtige Körper mit zwei gegeneinander geneigten ebenen Grenzflächen wird Prisma genannt. Die Linie, in der diese Grenzflächen sich schneiden, heißt die brechende Kante und der Winkel, den sie miteinander bilden, der brechende Winkel des Prismas.

Lichtstrahlen werden durch ein Prisma von der brechenden Kante weg und zwar um so stärker abgelenkt, je größer der brechende Winkel und das Brechungsvermögen des Prismas ist.

Übungstoff. 1. Welchen Einfluss übt die Dicke einer Glasscheibe auf die Stärke der Verschiebung der durch sie betrachteten Gegenstände aus? (Scheiben großer Schaufenster.) — 2. Ferner bei gleicher Dicke des Glases die Richtung, in

der man durch die Scheibe sieht? — 3. Durch Fensterscheiben erscheinen die Gegenstände gewöhnlich etwas verzerrt; solche Erschn. zeigen geschliffene Spiegelglasscheiben nicht. Erkl.! — 4. Legt man unter ein geschliffenes Trinkglas, das halb mit W. gefüllt ist, ein Blatt bedrucktes Papier, so erscheint die Schrift, wenn man sie von oben durch das W. hindurch betrachtet, um so stärker verschoben, je schräger man das Glas zu sich herüberkippt. Erkl.! — 5. Ein senkrecht gehaltener Stab erscheint, durch ein mit ebenen Schlißflächen versehenes und mit W. gefülltes Trinkglas betrachtet, mehrfach seitlich verschoben. Erkl.! — 6. Welche Lage muß ein vor das Auge gehaltenes Prisma haben, wenn ein Gegenstand a. nach unten b. nach oben, c. nach rechts, d. nach links verschoben erscheinen soll? — 7. Zwei gleiche Glasprismen mit kleinen brechenden Winkeln seien so aufeinander gelegt, daß ihre brechenden Kanten a. nach derselben Seite, b. nach entgegengesetzten Seiten gerichtet sind. Ablenkung? — 8. Von zwei gleichen Hohlprismen sei das eine mit W., das andere mit Terpentinöl oder Schwefelkohlenstoff gefüllt. Welches von beiden Prismen wird das Licht stärker ablenken? — 9. Nach Anleitung von Fig. 353 und 358 ist der Durchgang zweier Lichtstrahlen durch Glas für Einfallswinkel von 30° und 60° durch Zeichnung darzustellen.

§ 101. Brechung des Lichtes durch sphärische Linsen.

Die wesentlichen Teile aller auf Lichtbrechung beruhenden Instrumente sind sogen. *Linsen*, d. h. *Glaskörper*, welche entweder von zwei kugelförmigen Flächen oder von einer kugelförmigen und einer ebenen Fläche begrenzt sind. Man unterscheidet:

1. Sammell- oder Konvexlinsen und zwar heißt eine Linse *doppeltkonvex* (1) wenn beide Flächen nach außen gewölbt sind, *eben- oder plankonvex* (2), wenn eine Fläche nach außen gewölbt und die andere eben ist, *konkav-konvex* (3); wenn eine Fläche nach innen, die andere stärker als diese nach außen gewölbt ist.

Fig. 362.



2. Zerstreungs- oder Konkavlinsen, und zwar *doppeltkonkave* (4), welche von zwei hohlen Flächen begrenzt sind, *eben- oder plankonkave* (5), die eine hohle und eine ebene Grenzfläche haben, *konvex-konkave* (6), bei denen eine Fläche nach außen, die andere stärker als diese nach innen gewölbt ist.

Fig. 363.



Die Mittelpunkte der Kugelflächen, von denen die Grenzflächen der Linsen Teile bilden, werden **Krümmungsmittelpunkte** genannt. — Eine gerade Linie, welche durch die Krümmungsmittelpunkte der beiden Grenzflächen geht, heißt **Achse der Linse**.

Wird eine doppeltkonvexe Linse (Fig. 363) durch kreisförmige Schnitte parallel zur Achse in mehrere Teile zerlegt, so kann man den mittleren Teil als von parallelen ebenen Flächen begrenzt, die übrigen Teile als ringförmig gebogene Prismen betrachten, deren Seitenflächen um so stärker gegeneinander geneigt sind, je näher sie dem Rande der Linse liegen. Hieraus folgt,

dafs von parallel einfallenden Strahlen, welche mit der Achse gleich gerichtet sind, 1) der Achsenstrahl ungebrochen hindurchgeht, 2) alle übrigen Strahlen die Achse schneiden und um so stärker gebrochen werden, je weiter sie von der Achse entfernt sind. — Strahlen, welche bei ihrem Ein- und Austritte parallele Flächenteile der Linse treffen, erleiden nur eine um so geringere Parallelverschiebung, je weniger ihre Richtung von der Richtung der Achse abweicht und je dünner die Linse ist. Ähnliches gilt auch für alle anderen Linsen.

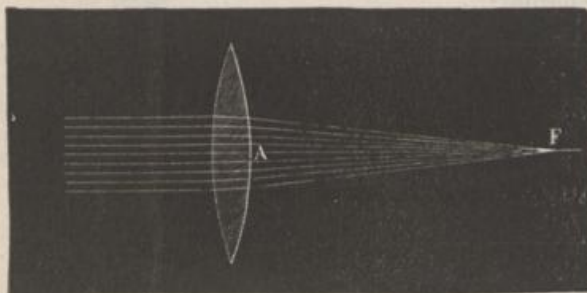
Derjenige Punkt einer Linse, durch welchen die Lichtstrahlen ohne Richtungsänderung hindurchgehen, heifst optischer Mittelpunkt; die durch denselben gehenden Strahlen heifsen Hauptstrahlen.

Der optische Mittelpunkt liegt bei Linsen mit gleicher Krümmung in der Mitte, bei allen anderen näher an der stärker gekrümmten Fläche, und zwar bei plankonvexen und plankonkaven in der Mitte der ebenen Fläche selbst, bei konkavkonvexen und konvex-konkaven Linsen außerhalb der Linse.

1. Lichtbrechung durch Sammellinsen.

Versuch a. Läßt man Sonnenstrahlen parallel zur Achse durch eine Konvexlinse gehen (Fig. 364), so

Fig. 364.



entsteht hinter der Linse ein sehr heller Punkt (**Brennpunkt**). Dieser ist um so weiter von der Linse entfernt, je flacher sie ist, und um so schärfer begrenzt, je kleiner (namentlich bei stark gekrümmten Linsen) die Öffnung der Linse ist. Papier entzündet sich in diesem Punkte. Welche Richtung würden die Strahlen durch die Linse erhalten, wenn sie von F ausgingen? — Gehen die Strah-

len nur durch den mittleren Teil kugelförmig gekrümmter Linsen, so gelten für sie folgende Gesetze:

Strahlen, welche parallel zur Achse durch eine Sammellinse gehen, werden so abgelenkt, dafs sie sich im Brennpunkte der Linse vereinigen; Hauptstrahlen ändern ihre Richtung nicht.

Strahlen, welche vom Brennpunkte einer Sammellinse ausgehen, werden durch die Linse so gebrochen, dafs sie parallel zur Achse austreten.

Genaue Untersuchungen lehren, dafs der Vereinigungspunkt derjenigen Strahlen, welche in der Nähe des Randes durch eine Konvexlinse gehen, ähnlich wie beim hohlen Kugelspiegel, der Linse etwas näher liegt als der Vereinigungspunkt der mittleren Strahlen: **Sphärische Abweichung**. Diese Abweichung ist um so beträchtlicher, je stärker die Linsen gekrümmt sind; am geringsten ist sie bei plankonvexen Linsen, welche somit die beste Form haben.

Versuch b. Im verdunkelten Zimmer läßt sich mit Hilfe eines weifsen Schirmes ferner nachweisen, 1) dafs die Strahlen nach ihrem Durchgange durch eine Konvexlinse um so stärker *divergieren*, je mehr der leuchtende Punkt sich innerhalb der Brennweite der Linse nähert (Fig. 365, folg. Seite), 2) dafs sie aber um so stärker *konvergieren*, je mehr der leuchtende Punkt sich aufser-

halb der Brennweite von der Linse entfernt. Ist der leuchtende Punkt um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so sind die Strahlenkegel auf beiden Seiten der Linse gleich (Fig. 366).

Liegt der Ausgangspunkt der durch eine Sammellinse gehenden Strahlen in der Brennweite, so wird die Strahlenzerstreuung durch die Linse nur abgeschwächt; liegt er auserhalb der Brennweite, so vereinigen sich die Strahlen hinter der Linse in einem um so näher gelegenen Punkte, je weiter der leuchtende Punkt entfernt ist.

Bei Linsen hängt die Lage des Brennpunktes nicht allein von der Größe des Krümmungshalbmessers, sondern auch von der Natur des Glases ab. Sind die beiden Grenzflächen einer Linse gleichstark gekrümmt, so fällt bei den gewöhnlichen Glaslinsen (Brechungsindex n) der Brennpunkt mit dem Krümmungsmittelpunkt beinahe zusammen. Die Brennweite ist gleich dem Krümmungsradius der Linse. Bei den plankonvexen Linsen ist der Brennpunkt doppelt

Fig. 365.

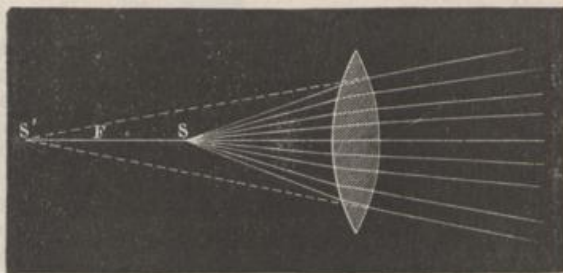
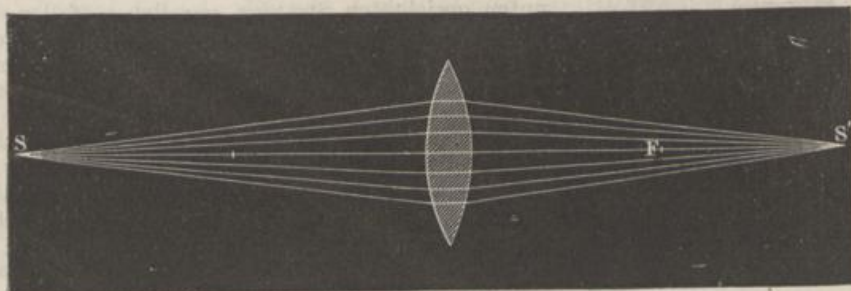


Fig. 366.



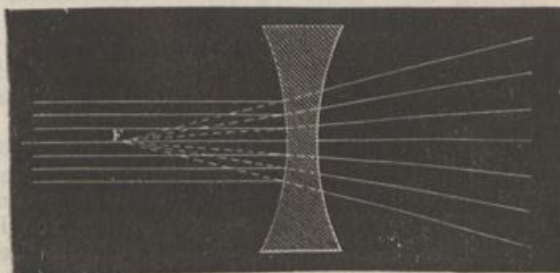
so weit entfernt.

2. Lichtbrechung durch Zerstreuungslinsen.

Eine Konkavlinse (Fig. 367) sei in ähnlicher Weise, wie Figur 363 darstellt, aus mehreren

Fig. 367.

Teilen zusammengesetzt. Wie lässt sich die Ablenkung der parallel zur Achse einfallenden Strahlen erklären? Was ist über die Stärke der Beleuchtung eines hinter der Linse aufgestellten Schirmes anzuführen? — Bestätigung:



Versuch c. Lässt man auf eine Konkavlinse parallel zur Achse Sonnenstrahlen fallen, so entsteht auf einem weissen Schirm hinter der Linse ein heller Kreisring, welcher größer ist als die Linse und einen dunkleren Kreis,

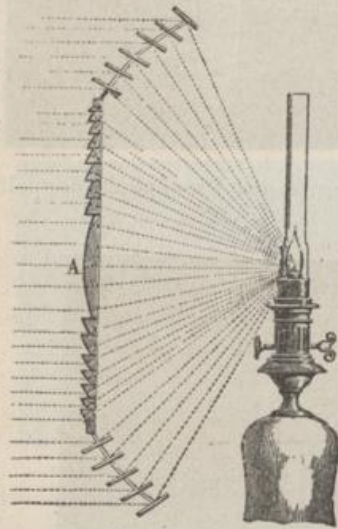
dessen Durchmesser dem der Linse entspricht, konzentrisch umschließt: die Linse zerstreut die Strahlen. Je weiter man Linse und Schirm voneinander entfernt, desto größer und lichtmatter wird der Ring.

Fig. 367 stellt zugleich dar, daß die nahe der Achse parallel einfallenden und durch die Linse gebrochenen Strahlen, nach rückwärts verlängert, sich in einem vor der Linse gelegenen Punkte, dem sogen. geometrischen Brennpunkte, treffen.

Strahlen, welche parallel zur Achse durch eine Zerstreuungslinse gehen, werden so abgelenkt, als ob sie vom geometrischen Brennpunkte der Linse ausgingen; Hauptstrahlen ändern ihre Richtung nicht.

Die Parallelrichtung von Lichtstrahlen durch Brechung ist für die Küstenbeleuchtung sehr wichtig geworden, indem man die früher gebräuchlichen Spiegelapparate (Fig. 352) immer mehr durch Linsen- und Prismenapparate ersetzt hat (Fig. 368).

Fig. 368.



Letztere bestehen aus einem sehr weiten, nahezu tonnenförmigem Mantel, welcher aus großen Glaslinsen und gekrümmten Prismen so zusammengesetzt ist, daß jede Linse (A) mit den über und unter ihr angebrachten Prismen eine einzige treppenförmig geschliffene Linse von bedeutender Ausdehnung darstellt. In der Mitte dieses Glasmantels, und zwar im Brennpunkte der Linsen, befindet sich eine sehr starke Lichtquelle. Damit auch die nach oben und unten gerichteten Strahlen parallel ausfallen, läßt man sie auf zahlreiche, kreisförmig angeordnete Spiegel (in der Figur angedeutet) oder bei vollkommenerer Einrichtung auf sehr stumpfwinklige Glasprismen fallen. Letztere bewirken eine totale Reflexion. Leuchtapparate dieser Art werden nach ihrem Erfinder Fresnelsche (spr. Fränellsche) Apparate genannt. — Die deutsche Küste ist jetzt von der russischen bis zur holländischen Grenze mit zahlreichen Leuchttürmen versehen, welche in solchen Abständen voneinander aufgestellt sind, daß ihre Sichtbarkeitskreise bei mittlerer Durchsichtigkeit der Luft sich 10 bis 12 Meilen von der Küste schneiden.

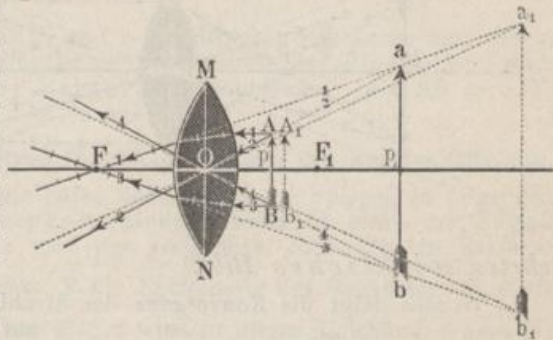
Übungsstoff. 1. Hinter einem Wassertropfen entsteht im direkten Sonnenlichte ein kleiner, sehr heller Schein (Lichtkugeln der Schuhmacher), hinter einer mit W. gefüllten Glasröhre eine Lichtlinie. Erkl.! — 2. Glasziegel haben bisweilen linsenförmig gekrümmte Stellen. Welche Gefahr kann dadurch für ein Gebäude entstehen, dessen Dach derartige Ziegel enthält? — 3. In dem gläsernen Ölbehälter einer Petroleumlampe erscheint der Docht viel breiter als er wirklich ist; w.? — 4. In ein verdunkeltes Zimmer dringe ein Bündel paralleler Sonnenstrahlen. Welche Ersch. wird sich zeigen, wenn man die Strahlen a. durch eine Konvexlinse, b. durch eine Konkavlinse hindurchgehen läßt? (Die geom. Form des von den Strahlen hell erleuchteten Raumes und die Veränderung dieser Form ist anzugeben). — 5. Welche Ersch. wird man wahrnehmen, wenn man den Ausschnitt des Schirmes (Fig. 361) betrachtet und dabei eine Sammel- oder eine Zerstreuungslinse vor dem Auge bewegt? — 6. Welche Arten von Linsen und Spiegeln haben ähnliche Lichtwirkungen? — 7. Wie läßt sich die Brennweite einer Konvexlinse durch einen Versuch bestimmen? (Fig. 364 und 366.)

§ 102.

1. Bilder durch Sammellinsen.

AB, Fig. 369 und 371, sei ein Gegenstand, von welchem Lichtstrahlen auf die Linse MN fallen; F und F_1 seien die beiden Brennpunkte der Linse. Um Lage und Gröfse des Bildes zu bestimmen, betrachten wir den Lauf zweier Strahlenpaare, welche den mittleren Teil der Linse treffen und von denen zwei Strahlen (1 und 3) der Achse parallel sind, die beiden anderen (2 und 4) durch den optischen Mittelpunkt O gehen (Hauptstrahlen). Erstere werden so gebrochen, dafs sie den Brennpunkt treffen; von letzteren kann bei geringer Dicke der Linse angenommen werden, dafs sie ungebrochen durch dieselbe hindurchgehen.

Fig. 369.



1. Befindet sich der Gegenstand **innerhalb der Brennweite**, so müssen die von demselben Punkte ausgehenden Strahlen hinter der Linse *divergieren*, da die von A und B aus parallel zur Achse gezogenen und bis zu den Linien Fa und Fb verlängert gedachten Geraden kleiner sind als die Strecke OF. Betrachtet man den Gegenstand durch die Linse, so erhält man demnach den Eindruck, als kämen die Strahlen von den Schnittpunkten (a und b) ihrer nach rückwärts gerichteten Verlängerungen. Wegen dieser scheinbaren Vereinigung der von denselben Punkten ausgehenden Strahlen kann auch nur ein *aufrechtes scheinbares Bild* entstehen, das den Gegenstand an derselben Seite der Linse weiter entfernt und vergrößert darstellt.

Würde AB etwa bis A_1B_1 von der Linse entfernt, ohne seine Lage gegen die Achse zu ändern, so behalten die mit der Achse parallel laufenden Strahlen (1 und 3) ihre Lage bei, die durch O gehenden Strahlen (2 und 4) aber nähern sich der Achse. Dadurch rücken die scheinbaren Schnittpunkte der Strahlen weiter von der Linse weg (a_1 und b_1) und das Bild wird größer. — Bestätigung durch den Versuch nach Fig. 370.

Fig. 370.

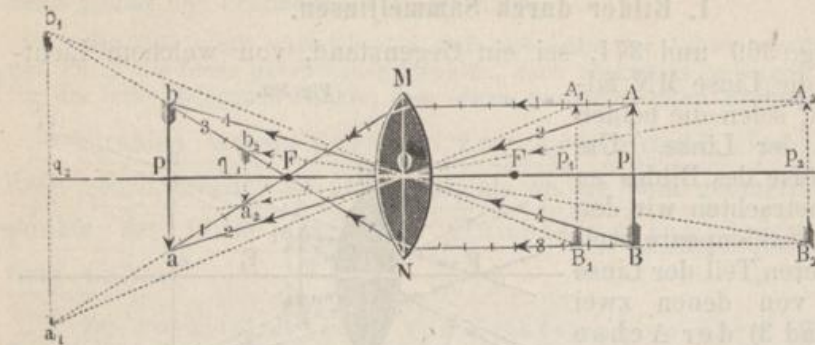


Betrachtet man durch eine Sammellinse einen in der Brennweite derselben befindlichen Gegenstand, so erblickt man vor der Linse ein aufrechtes scheinbares Bild des Gegenstandes.

Das Bild ist um so größer und um so weiter von der Linse entfernt, je mehr man den Gegenstand dem Brennpunkte der Linse nähert.

2. Der Gegenstand (AB) befindet sich **ausserhalb** der Brennweite

Fig. 371.

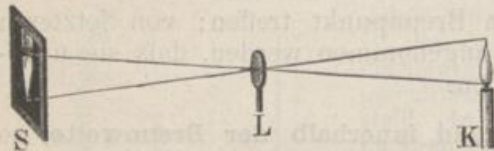


der Linse. Da die von demselben Punkt ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse **konvergieren**, so entsteht ein **umge-**

kehrtes, wirkliches Bild.

Woraus folgt die Konvergenz der Strahlen? — Welchen Einfluss muss dies auf die Lage und Grösse des Bildes ausüben? — Nur bei welchem der beiden Strahlenpaare kann die in der Figur angedeutete Parallelverschiebung des Gegenstandes eine Änderung der Lage bewirken; inwiefern? — Bestätigung durch den in Fig. 372 angedeuteten Versuch.

Fig. 372.



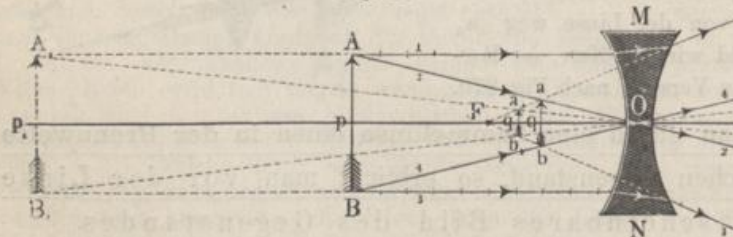
Von einem Gegenstande, welcher sich vor einer Sammellinse **ausserhalb der Brennweite** befindet, entsteht hinter der Linse ein **umgekehrtes, wirkliches Bild.**

Bild und Gegenstand sind gleichgröss und gleichweit von der Linse entfernt, wenn der Gegenstand um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt ist. Das Bild wird um so grösser und entfernt sich um so weiter von der Linse, je mehr man den Gegenstand dem Brennpunkte nähert; es wird dagegen um so kleiner und nähert sich dem Brennpunkte um so mehr, je weiter man den Gegenstand von der Linse entfernt.

2. Bilder durch Zerstreuungslinsen.

Da durch eine Zerstreuungslinse gleich gerichtete Strahlen schon so abgelenkt werden, dass sie sich immer weiter voneinander entfernen, so müssen

Fig. 373.



Strahlen, welche von einem Punkte ausgehen, also schon vor der Linse divergieren, durch die Linse stets noch stärker zer-

streut werden. Zerstreuungslinsen können demnach (wie erhabene Spiegel) nur **aufrechte, scheinbare Bilder** hervorrufen.

Erkläre Fig. 373. — Bestätigung durch den Versuch.

Betrachtet man einen Gegenstand durch eine Zerstreuungslinse, so entsteht ein aufrechtes, scheinbares Bild; der Gegenstand erscheint um so stärker verkleinert, je weiter er von der Linse entfernt ist.

Wenn in Fig. 369, 371 und 373 E und e die Strecken der Achse bezeichnen, um welche Gegenstand und Bild vom optischen Mittelpunkte der Linse entfernt sind, so ergibt sich über die Größe der Bilder die Proportion $ab:AB = e:E$. Begründe dieselbe und sprich sie in Worten aus!

Ableitung eines allgemeinen Gesetzes für dünne Linsen mit kleiner Öffnung.

Obige Sätze lassen sich, wie die Sätze über sphärische Spiegel, in folgenden Ausdruck zusammenfassen: *Die reciproke Brennweite ist gleich der Summe aus der reciproken Gegenstandsweite und der reciproken Bildweite*; in Zeichen: $\frac{1}{f} = \frac{1}{E} + \frac{1}{e}$, wenn f die Brennweite, E die Entfernung des Gegenstandes, e die des Bildes von der Linse bedeutet. (Für $E < f$ wird in dieser Gleichung e negativ; vgl. Seite 245.)

Beweis: Fig. 374 stelle eine sehr dünne Konvexlinse mit kleiner Öffnung dar, F sei ein Brennpunkt der Linse, O der optische Mittelpunkt, A ein leuchtender Punkt, a das Bild desselben, dessen Lage (wie oben) durch die Strahlen ACa und Aa bestimmt ist. Zieht man zunächst ac || zur Achse und verbindet c mit A, so läßt sich beweisen, daß $OF_1 = OF$, wenn F_1 den Punkt bezeichnet, in welchem ca die Achse schneidet, daß mithin Bild und Gegenstand vertauscht werden können, also F_1 der andere Brennpunkt der Linse ist. Es ist nämlich

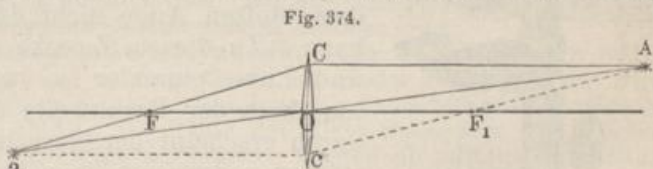


Fig. 374.

$Oa:OA = Oc:OC$, da $\triangle Oac \sim \triangle OAC$.
 Folglich $(Oa + OA):OA = (Oc + OC):OC$
 oder $aA:OA = cC:OC$.
 Nun ist auch $aA:OA = ac:OF_1$, weil $\triangle aAc \sim \triangle OAF_1$.
 Mithin $cC:OC = ac:OF_1$.
 Da nun ferner $cC:OC = ac:FO$, weil $\triangle Cae \sim \triangle CFO$,
 so ist $ac:OF_1 = ac:FO$, also $OF_1 = FO$.

Zu der Gleichung des obigen Gesetzes gelangt man durch die Proportionen:

$aO:OA = ac:CA$ (Grund?) und
 $aO:OA = cF_1:F_1A$ (Grund?).
 Folglich $ac:CA = cF_1:F_1A$ oder, wenn C, also auch c, der Achse sehr nahe liegt, nach obiger Bezeichnung annähernd
 $e:E = f:(E-f)$, woraus sich nach Auflösung und Division durch eEf das Gesetz ergibt.

Für subjektive Bilder erhält man, wie bei den Kugelspiegeln, e negativ. Für Konkavlinsen ist in der Reciprokengleichung außerdem f negativ zu setzen.

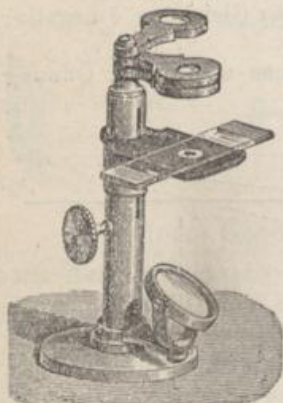
Übungsstoff. 1. Warum kann man die scheinbaren Bilder nicht mittelst eines Schirmes auffangen? — 2. Wie erkennt man, indem man durch eine Sammellinse die Schrift eines Buches betrachtet, ob letztere in- oder außerhalb der Brennweite der Linse liegt? — 3. Wie werden entfernte Gegenstände erscheinen, wenn man a. eine Zerstreuungslinse, b. eine Sammellinse zwischen das Auge und den Gegenstand hält (normalsichtiges Auge und richtige Haltung der Linsen vorausgesetzt),

und an welcher Seite der Linsen entstehen dabei die Bilder? — 4. Warum darf hierbei nur die Zerstreuungslinse dem Auge beliebig genähert werden? — 5. Unter einem Wassertropfen erscheint ein Gegenstand (etwa kleine Schrift) heller und größer. Erkl.! — 6. Eine ziemlich weite Probierröhre mit kugelig gewölbtem Boden soll mit Zuhilfenahme von W. so eingerichtet werden, daß sie als Vergrößerungsglas dienen kann; desgl. ein Stückchen starkes Papier mit etwa 5 mm weiter, kreisrunder Öffnung und ein Wassertropfen. Ausführung und Erkl.! — 7. Durch eine ganz mit W. gefüllte Probierröhre erscheint kleine Schrift sehr nahe vor der Röhre bei bestimmter Haltung entweder nur höher oder breiter. Erkl.! — 8. Wie groß ist die Brennweite einer Bikonvexlinse, wenn von einer 60 cm von derselben entfernten Flamme 40 cm hinter der Linse ein Bild entsteht!

C. Die optischen Instrumente und das Auge.

§ 103. **Lupe und Mikroskop.** Eine Lupe besteht entweder

Fig. 375.



nur aus einer einzigen Sammellinse von kurzer Brennweite, oder es sind mehrere derartige Linsen miteinander verbunden. Man benutzt sie zur Betrachtung kleiner Gegenstände, welche man mit dem bloßen Auge nicht deutlich genug erkennen kann. Zu diesem Zwecke nähert man Gegenstand und Lupe einander so weit, daß ersterer sich innerhalb der Brennweite der Lupe befindet. Dadurch erscheint der betrachtete Gegenstand um so stärker vergrößert, je näher er dem Brennpunkte liegt (vgl. Fig. 369). — Lupen, welche mit einem Stativ und mit einem Beleuchtungsspiegel versehen sind, werden **einfache Mikroskope**¹⁾ genannt (Fig. 375).

Stärke der Vergrößerung einer Lupe. Nach Fig. 369 ist das Bild sovielmals so groß als der betrachtete Gegenstand, wievielmals die *Gegenstandsweite* (E) in der *Bildweite* (e) enthalten ist ($\frac{e}{E}$). Letztere kann höchstens gleich der deutlichen Sehweite sein (24 cm für ein gesundes Auge). — Da der Gegenstand bei dieser Entfernung dem Brennpunkte der (dicht vor das Auge gehaltenen) Lupe schon sehr nahe liegen muß, so erhält man die Vergrößerung *annähernd*, wenn man die deutliche Sehweite (24 cm) durch die Brennweite dividiert. Beträgt z. B. die Brennweite 4 cm, so ergibt sich eine 6fache (lineare) Vergrößerung. — *Genauer*es läßt sich aus der Gleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{E} - \frac{1}{e}$ (Seite 257) ableiten. Multipliziert man mit e , so erhält man $\frac{e}{f} = \frac{e}{E} - 1$ oder: $\frac{e}{E} = \frac{e}{f} + 1$, wonach sich die vorhin berechnete Vergrößerung als um 1 zu klein erweist.

Die Brennweite einer einfachen Lupe ist gewöhnlich ungefähr 6 cm, die stärkste Vergrößerung also etwa eine 5fache (lineare). Stärkere brauchbare (höchstens 20fache) Vergrößerungen lassen sich besser durch ein System von mehreren Linsen (Fig. 375) als durch eine einzelne Linse erreichen, da die sphärische Abweichung dadurch geringer und das Gesichtsfeld größer wird als bei einer einfachen Lupe mit gleicher Brennweite.

Die zusammengesetzten Mikroskope bestehen in ihrer einfachsten Einrichtung aus zwei Sammellinsen, welche an den beiden Enden

¹⁾ *μικρός* (mikrós), klein und *σκοπεῖν* (skopein), schauen.

einer innen geschwärzten Messingröhre befestigt sind. Die eine dieser beiden Linsen (O, Fig. 376) soll von dem kleinen Gegenstande AB ein möglichst großes wirkliches Bild (ab) erzeugen und wird daher dem Gegenstande soweit genähert, daß der Abstand etwas mehr als die Brennweite der Linse beträgt; die andere (o) dient als Lupe zur Betrachtung des entstandenen Bildes. Jene wird *Objektiv*-,¹⁾ diese *Okularlinse*²⁾ genannt. Die Brennweite der Objektivlinse ist bedeutend kleiner als die der Okularlinse.

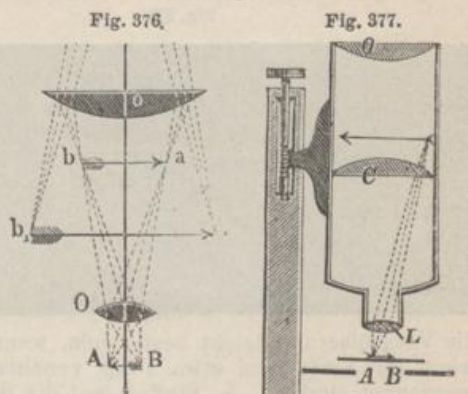


Fig. 377 stellt eine vollkommene Einrichtung dar, bei welcher die Röhre des Mikroskopes noch eine sogen. Kollektivlinse³⁾ (C) enthält. Beide zusammen werden als Okular bezeichnet, während die Objektivlinse oder das zu stärkeren Vergrößerungen dienende Linsensystem kurz *Objektiv* genannt wird. Die Kollektivlinse hat den Zweck, die vom Gegenstande kommenden Strahlen, ehe sie sich vereinigen, zu einem etwas kleineren, aber deutlicheren Bilde zu sammeln und das Gesichtsfeld zu vergrößern. Im Okular ist da, wo das wirkliche Bild entsteht, ein quer gerichteter, schwarzer Blechring (Blende) angebracht, welcher alle Randstrahlen abhält. Die Röhre des Mikroskopes oder der in seiner Mitte durchbohrte Objekt-Tisch kann zur genauen Einstellung mittelst einer feinen Schraube am Stativ langsam auf- und abbewegt werden. Damit das Bild hell genug erscheint, wird der zu betrachtende Gegenstand durch einen kleinen Hohlspiegel (S) beleuchtet.

Die Güte eines Mikroskopes hängt weniger von der Stärke der Vergrößerung, als von der Klarheit und Schärfe der Bilder ab. Die Vergrößerung wird hauptsächlich durch das Objektiv bewirkt. Die gewöhnlichen, zur Fleischuntersuchung dienenden Mikroskope vergrößern nur 50—150 mal, während die stärksten eine 1500- bis 2000fache Linienvergrößerung bewirken. — Das Mikroskop ist wahrscheinlich von einem Holländer Jansen (um 1600) erfunden worden.

Das *Sonnenmikroskop* dient dazu, kleine Gegenstände auf einem Schirm stark vergrößert darzustellen. Es besteht aus einer Röhre, welche an einem Ende zur Erzeugung eines Bildes eine kleine Objektivlinse und am anderen Ende zur Beleuchtung des Gegenstandes eine größere Sammellinse enthält. Die Röhre wird im Fensterladen eines verdunkelten Zimmers so befestigt, daß direkte Sonnenstrahlen durch die Sammellinse einfallen können, wozu ein Spiegel zu Hilfe genommen wird (siehe Fig. 405). Da der Gegenstand sich nahe dem Brennpunkte der Objektivlinse befindet, so erscheint von ihm auf einem weißen Schirme ein großes, lichtstarkes Bild.

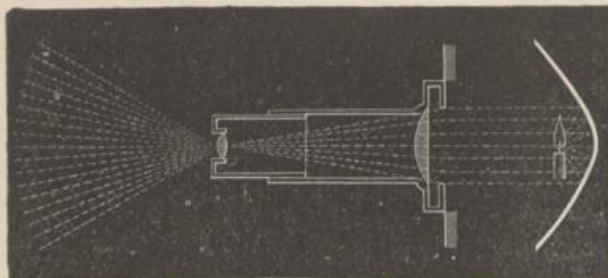
Statt des Sonnenlichtes läßt sich auch künstliches Licht anwenden (*Skiptikon*).

Bei der sogen. *Zauberlaterne* (*laterna magica*, Fig. 378, folg. Seite) werden auf Glas gemalte Bilder verkehrt hinter den röhrenförmigen Ansatz eines laternenartigen Blechkastens geschoben und durch eine hell brennende Flamme mit Hilfe eines Hohlspiegels beleuchtet. Zur Erzeugung des Lichtbildes dienen gewöhnlich 2 gegeneinander verschiebbare Konvexlinsen.

1) objectum, der Gegenstand; 2) oculus, das Auge; 3) colligere, sammeln.

Übungsstoff. 1. Warum muß bei einer Lupe der Gegenstand in die Brennweite und zwar dem Brennpunkte möglichst nahe und dicht vor das Auge gehalten werden? — 2. Inwiefern ist hierbei ein weitsichtiges Auge gegen ein kurzsichtiges im Vorteil? — 3. Der Rand der Lupe wird bei schwach vergrößernden Linsen nur durch die Einfassung,

Fig. 378.

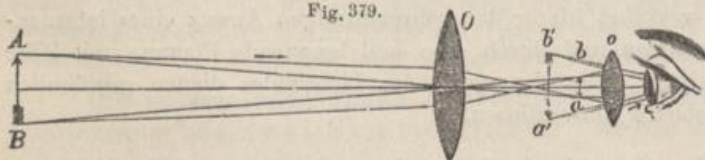


bei stärker vergrößernden durch eine besondere Blendscheibe verdunkelt. Zweck? — 4. Durch eine Lupe werde ein Millimetermaßstab betrachtet. Wie läßt sich hierbei

die Vergrößerung leicht bestimmen, wenn ein gleicher Maßstab daneben liegt, oder wenn mit Tinte zwei etwa 5 mm voneinander entfernte Punkte mitten auf die Lupe gezeichnet sind? — 5. Einfluß auf die Stärke der Vergrößerung einer Lupe, wenn diese bei gleicher Krümmung aus Diamant statt aus Glas hergestellt würde? (§ 99.) — 6. Warum muß bei einem zusammengesetzten Mikroskop der zu betrachtende Gegenstand außerhalb der Brennweite der Objektivlinse (dem Brennpunkte sehr nahe), das wirkliche Bild desselben dagegen innerhalb der Brennweite der Okularlinse liegen? — 7. Wie wird sich das Bild bewegen, wenn man den Gegenstand verschiebt, u. w.? — 8. Welche Flächenvergrößerung hat ein Mikroskop, das 100 mal linear vergrößert? — 9. Welchen Einfluß muß die Stärke der Vergrößerung auf die Lichtstärke des Bildes ausüben, u. w.? — 10. Die Vergrößerung eines Mikroskopes läßt sich dadurch bestimmen, daß man einen auf Glas geritzten Maßstab (Mikrometer), dessen Teilstriche etwa 0,1 mm voneinander abstehen, durch das Mikroskop betrachtet und einige Teilstriche in der Höhe des Objektisches aufzeichnet. Wie hat man weiter zu verfahren? — 11. Zur bequemen Messung der betrachteten Gegenstände legt man auf die Blende des Okulars ein Mikrometer, dessen Vergrößerungswert sich zunächst dadurch bestimmen läßt, daß man auf den Objektisch ein zweites, ebenso eingerichtetes Mikrometer legt und beide zugleich betrachtet. Gesetzt, es fallen dabei die Abstände von 10 aufeinander folgenden Teilstrichen auf einen solchen Abstand des unteren Mikrometers (siehe Frage 10): wie groß ist dann ein betrachteter Gegenstand, wenn er den Raum zwischen zwei benachbarten Teilstrichen des oberen Mikrometers ausfüllt?

§ 104. Fernrohre. Während die Mikroskope den Zweck haben, nahe gelegene, kleine Gegenstände stark zu vergrößern, dienen die Fernrohre dazu, von weit entfernten Gegenständen Bilder zu erzeugen, sodafs die Gegenstände dem Auge genähert und dadurch deutlicher erscheinen. Da man die zu betrachtenden Gegenstände nicht wie beim Mikroskope nach Belieben beleuchten kann, so sucht man die erforderliche Lichtstärke der Bilder bei den Fernrohren dadurch zu erreichen, daß man große Objektive anwendet, denn je größer der Durchmesser des Objektivs ist, desto mehr Strahlen können von denselben Punkten des Gegenstandes ins Fernrohr gelangen.

Fig. 379.



1. Das astronomische oder Keplersche Fernrohr (Fig. 379) dient zur Betrachtung der Gestirne und er-

zeugt ein umgekehrtes Bild. Es besteht, wie das zusammengesetzte

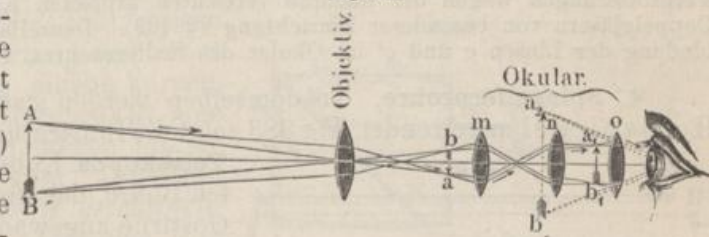
Mikroskop, im wesentlichen aus zwei Sammellinsen, nämlich aus einer *Objektivlinse* (O) von großer und einer *Okularlinse* (o) von kleiner Brennweite. Okular- und Objektivlinse können zur genauen Einstellung gegeneinander verschoben werden.

Das im Fernrohre entstehende wirkliche Bild (ab) des Gegenstandes (AB) erscheint durch die Okularlinse vergrößert (a'b'). Wie beim Mikroskop befindet sich im Okular gewöhnlich noch eine Kollektivlinse, durch welche das objektive Bild zwar etwas kleiner, aber deutlicher wird. Der Durchmesser der Objektivlinse kann über 50 cm betragen, die Vergrößerung eine mehrtausendfache sein.

Das astronomische Fernrohr gibt von allen Linsenfernrohren die hellsten und klarsten Bilder. Es wurde von Kepler (1611) erfunden.

2. Das terrestrische oder Erdfernrohr (Fig. 380) wird zur Betrachtung irdischer Gegenstände angewandt. Damit diese im Rohre aufrecht erscheinen, ist das aus 3 (oder 4) Linsen bestehende Okular ähnlich wie ein *zusammengesetztes Mikroskop* eingerichtet.

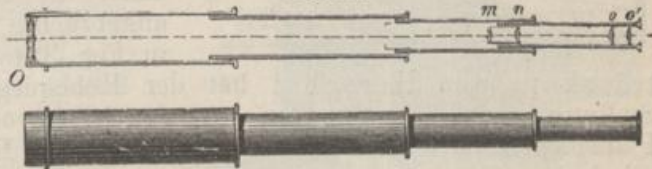
Fig. 380.



Die dem Objektiv am nächsten gelegene Linse (m) des Okulars hat den Zweck, die Richtung der Strahlen so zu ändern, daß das vom Objektiv erzeugte umgekehrte Bild ab des Gegenstandes wieder aufrecht wird. Um ein möglichst klares Bild zu erhalten, läßt man die Strahlen noch durch eine Kollektivlinse (n) gehen. Das auf diese Weise entstandene, aufrechte Bild (a,b,) erscheint durch die dem Auge am nächsten gelegene Linse o (oder bei noch vollkommenerer Einrichtung durch zwei flachere Linsen o und o', Fig. 381) wie durch eine Lupe vergrößert (a₂b₂, Fig. 380).

Zum bequemeren Transport auf Reisen wird das Erdfernrohr gewöhnlich aus mehreren ineinander verschiebbaren Röhren zusammengesetzt (Fig. 381). Die Linsen des Okulars haben eine unveränderliche Stellung gegeneinander. — Die Vergrößerung des Erdfernrohres ist gewöhnlich eine 20- bis 30fache, selten eine mehrhundertfache.

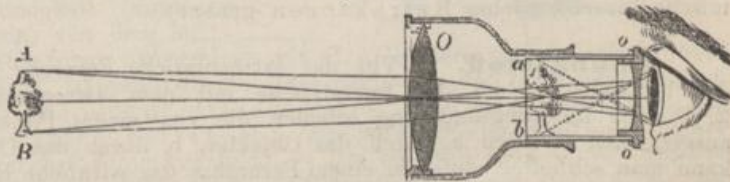
Fig. 381.



Das Erdfernrohr ist 1645 von einem Mönch des Klosters Rheit in Böhmen, Namens Schyrl, erfunden worden.

3. Das holländische oder Galileische Fernrohr (Fig. 382) dient wie das Erdfernrohr zur Betrachtung irdischer Gegenstände, unterscheidet sich aber von jenem wesentlich durch sein einfaches, eigenartiges Okular. Das Okular wird nämlich von einer *Zerstreuungslinse* (o) gebildet, die vor der Stelle angebracht ist, an

Fig. 382.



welcher die durch das *Objektiv* (O) hindurchgegangenen Strahlen sich zu einem wirklichen Bilde vereinigen würden. Dadurch werden die Strahlen wieder zerstreut und die Gegenstände erscheinen wie beim Erdfernrohre in ihrer wirklichen Lage.

Die kleineren Fernrohre von dieser Einrichtung werden *Operngläser* oder *Theaterperspektive*, die größeren *Feldstecher* genannt. Erstere gewähren eine 2- bis 3fache, letztere höchstens eine 20- bis 30fache Vergrößerung.

Das holländische wurde von allen Fernrohren zuerst erfunden, und zwar wurde ein Brillenmacher Lippershey 1608 durch eine zufällige Entdeckung auf diese wichtige Erfindung geführt. Kurze Zeit darauf stellte Galilei, ohne jene Einrichtung zu kennen, ein Fernrohr von gleicher Beschaffenheit her und verwendete es zu seinen astronomischen Beobachtungen.

Bem. Die Objektivlinsen in Mikroskopen und Fernrohren bestehen bei starken Vergrößerungen wegen der dadurch erreichten größeren Klarheit der Bilder aus Doppelgläsern von besonderer Einrichtung (§ 109). Denselben Zweck hat die Verbindung der Linsen o und o' im Okular des Erdfernrohres, Fig. 381.

4. Spiegelfernrohre. In demselben werden statt der Objektivlinsen Hohlspiegel angewendet. Fig. 383 zeigt die Einrichtung des **Newtonschen Teleskopes**.

Fig. 383.

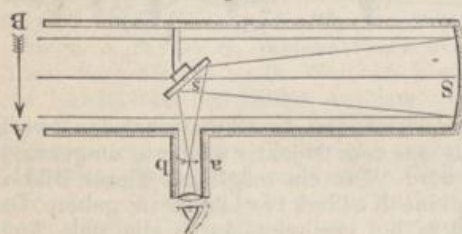
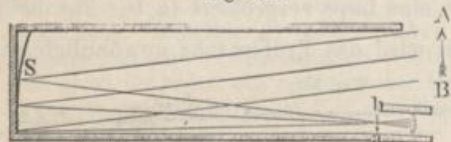


Fig. 384.



Es besteht aus einem weiten Rohre, das an dem vorderen, dem Gestirne zugewandten Ende offen ist und am anderen Ende einen großen *Hohlspiegel* (S) enthält, welcher die einfallenden Strahlen wieder zurückwirft. Bevor diese sich zu einem Bilde vereinigen können, fallen sie auf einen kleinen, im Innern des Rohres angebrachten ebenen Spiegel (s), welcher gegen die Achse des Rohres unter 45° geneigt ist und daher die Strahlen in das seitlich angebrachte *Okular* wirft. — In dem in Fig. 384 dargestellten Spiegelfernrohre von Herschel hat der Hohlspiegel selbst eine schräge Stellung, sodass die Strahlen von demselben ohne Vermittelung eines Planspiegels nach dem am unteren Rande der Rohröffnung befindlichen *Okular* zurückgeworfen werden.

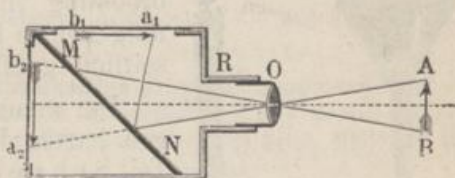
Newton gab dem 1663 von Gregory in England erfundenen Spiegelfernrohre die beschriebene Einrichtung. Das von Herschel (1789) hergestellte Fernrohr hatte einen Durchmesser von $1\frac{1}{2}$ m und eine 7000fache Vergrößerung. Statt der Metallspiegel werden neuerdings mit noch größerem Erfolge versilberte Glasspiegel angewandt. — Die Spiegelfernrohre werden auch *Reflektoren*, große astronomische Linsenfernrohre *Refraktoren* genannt.

Übungsstoff. 1. Vgl. das astronomische Fernrohr mit dem Mikroskope, das holländische und das terrestrische mit dem astronomischen Fernrohre. — 2. Welche Richtungsänderung erleiden die von einem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen a. durch das Objektiv, b. durch das Okular? — 3. Woraus kann man schließen, daß bei einem Fernrohre das wirkliche Bild dem Brennpunkte der Objektivlinse sehr nahe liegen muß? — 4. Welche Lage muß beim Mikroskop wie beim astronomischen Fernrohre das wirkliche Bild gegen die Okularlinse haben, u. w.? — 5. Die Linsen m und n (Fig. 380) sind um die Summe ihrer Brennweiten

voneinander entfernt; zwischen denselben wird eine Blende angebracht, wo und w.? — 6. Gehört die Kollektivlinse eines optischen Instrumentes ihrer Wirkung nach zum Objektiv oder zum Okular; w.? — 7. Warum müssen Fernrohre und Mikroskope für verschiedene Personen meist auch verschieden eingestellt werden? — 8. Beim Mikroskop haben Okular und Objektiv eine unveränderliche Lage gegeneinander. Wie ist daher die genaue Einstellung auszuführen? — 9. Inwiefern hängt es mit der Richtung, welche den Strahlen durch die Okularlinse erteilt wird, zusammen, daß das Gesichtsfeld beim Galileischen Fernrohre verhältnismäßig kleiner ist als beim Keplerschen? — 10. Angenommen, man blickte mit dem einen Auge durch ein Fernrohr, mit dem andern direkt nach einem Ziegeldache und sähe zu, wieviel Ziegelsteine auf einen Stein des Bildes fallen. Wie ließe sich dadurch die Stärke der Vergrößerung des Instrumentes annähernd bestimmen?

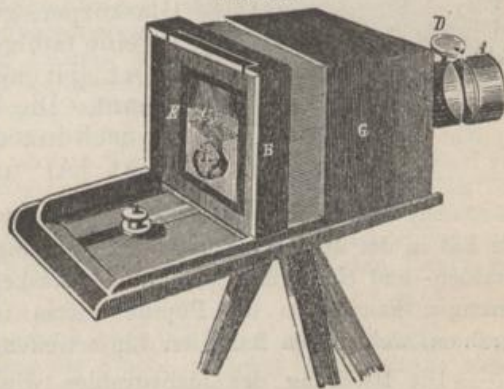
§ 105. Die Camera obscura und das Auge. Als Camera obscura oder Dunkelkammer bezeichnet man einen innen geschwärzten Kasten (Fig. 385), dessen Vorderwand zur Erzeugung eines objektiven Bildes in einem kurzen, verschiebbaren Ansatzrohre (R) eine Sammellinse (O) und dessen hintere oder obere Wand zum Auffangen dieses Bildes eine *matt geschliffene Glasscheibe* enthält. Soll das Bild auf der oberen Wand des Kastens entstehen, so bringt man in letzterem einen unter 45° geneigten Planspiegel an. Diese Einrichtung gestattet, das Bild bequem nachzuzeichnen.

Fig. 385.



Die Camera obscura ohne Spiegel und mit einem Linsensystem als Objektiv findet hauptsächlich beim Photographieren eine nützliche Anwendung. Die mattgeschliffene Glasscheibe wird nach genauer Einstellung durch eine andere ersetzt, welche mit einer dünnen, durch Jod- und Bromsilber gegen Licht sehr empfindlich gemachten Kollodiumschicht

Fig. 386.



oder mit Bromsilbergelatine überzogen ist. Das Bild wird erst dann sichtbar, nachdem die Platte im verdunkelten Zimmer mit einer dazu geeigneten Flüssigkeit (Eisenvitriol und Pyrogallussäure) übergossen worden ist. Hierbei scheidet sich nämlich an den vom Lichte getroffenen Stellen aus jenen Silber-salzen um so mehr metallisches Silber als äußerst feines schwarzes Pulver aus, je stärker das Licht eingewirkt hatte, sodafs diese Stellen mehr oder weniger dunkel erscheinen. Die Deutlichkeit des Bildes wird dadurch erhöht, daß man die Platte durch Übergießen mit einer geeigneten Flüssigkeit (unterschwefligsaurem Natron) von dem im Lichte unverändert gebliebenen Silbersalzen reinigt. (Letztere sind in unterschwefligsaurem Natron löslich, während die Substanz der durch das Licht verdunkelten Stellen darin unlöslich ist.) — Auf diesem Bilde sind die Verhältnisse von Licht und Schatten vertauscht, die hellen Stellen des Gegenstandes sind dunkel und umgekehrt (*negatives Bild*). — Um ein Bild zu erhalten, welches Licht und Schatten richtig darstellt, wird die Glastafel mit ihrer Bildseite auf ein Blatt Papier gelegt, das mit Chlorsilber für Licht empfindlich gemacht ist (photographisches Papier), und abermals dem Sonnenlichte ausgesetzt. Da die dunkelsten

Stellen der Glasplatte am wenigsten, die hellsten am meisten Licht durchlassen, so kehren sich die Verhältnisse zwischen Licht und Schatten wieder um und das entstehende Bild stellt dieselben richtig dar (*positives Bild*, Fig. 387).



Fig. 387.

1838 erfand Daguerre in Frankreich die Kunst, auf versilberten Kupferplatten Lichtbilder zu erzeugen. Fast gleichzeitig (1839) wurde von dem Engländer Talbot das noch jetzt beim Photographieren angewandte (seitdem allerdings sehr vervollkommnete) Verfahren erfunden, Lichtbilder auf Papier herzustellen.

Der vollkommenste aller optischen Apparate ist das

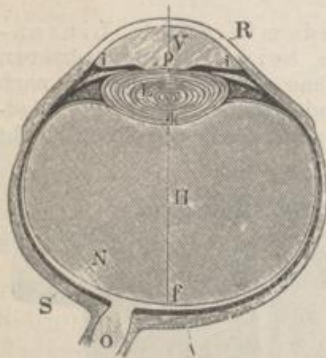
Fig. 388.



Auge, dessen Einrichtung mit derjenigen der Camera obscura eine gewisse Ähnlichkeit hat. Wie bei dieser umschließt das Auge einen dunklen Raum, auf dessen Rückwand von Gegenständen, die sich vor dem Auge befinden, durch Lichtbrechung in verschieden dichten Mitteln kleine, umgekehrte Bilder entstehen. (*Nachweis an dem seitlich geöffneten Auge eines Rindes, Fig. 388).

schlossen. Letztere ist stärker gewölbt.

Fig. 389.



Der menschliche Augapfel wird von einer sehnigen harten Haut, deren hinterer, undurchsichtiger Teil Sehnenhaut (S) und deren vorderer, durchsichtiger Teil Hornhaut (R) genannt wird, umschlossen. Da, wo die harte Haut in die Hornhaut übergeht, wird der Innenraum des Augapfels durch die Krystalllinse (L) in zwei Teile geschieden, die als vordere und hintere Augenkammer bezeichnet werden (V und H). Die vordere Kammer ist mit einer wässrigen Flüssigkeit, die hintere mit einer gallertartigen Masse, dem sogen. Glaskörper, gefüllt. Dicht vor der Krystalllinse ist eine farbige Haut, die sogen. Regenbogenhaut (ii) als scheibenförmige Blende ausgespannt. Die Wand der hinteren Augenkammer ist nach innen mit zwei dünnen Häuten, Aderhaut (A) und Netzhaut (N), ausgekleidet.

Die Regenbogenhaut ist bei verschiedenen Personen verschieden gefärbt. Sie hat in der Mitte eine kreisrunde Öffnung, die Pupille (P), welche sich durch strahlen- und ringförmig angeordnete Muskeln der Regenbogenhaut erweitern oder verengen kann. Da die Pupille mitten vor der Krystalllinse liegt, so werden Strahlen, welche den Rand der Linse treffen würden, nicht durchgelassen.

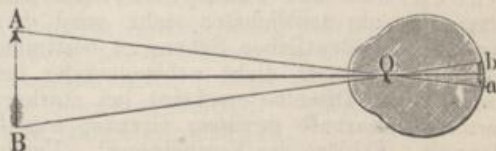
Die Brechung der Lichtstrahlen wird namentlich durch die farblose und äußerst durchsichtige Krystalllinse bewirkt. Diese ist ein linsenförmiger Körper, dessen hintere Fläche stärker gekrümmt ist als die vordere. Sie wird von einer klaren Haut (Linsenkapsel), welche nach dem Rande hin ringsum mit dem vorderen Teile der Aderhaut verwachsen ist, ganz umschlossen. Letztere bildet um die Krystalllinse herum eine strahlenförmig gefaltete, schwarze Einfassung (Strahlenkörper), durch welche die Linse in ihrer Lage gehalten wird. Die Regenbogenhaut ist eine Fortsetzung der Aderhaut.

Die Aderhaut breitet sich innerhalb der ganzen hinteren Augenkammer aus. Sie ist tiefschwarz gefärbt und enthält zahlreiche feine Blutgefäße, die das Auge ernähren. Die schwarze Farbe derselben ist für die Deutlichkeit des Bildes wichtig, indem sie eine nachteilige Zurückwerfung des Lichtes im Innern des Auges verhindert.

Die Netzhaut ist das eigentliche Organ zur Aufnahme der Lichtreize. Sie wird durch eine Ausbreitung des Sehnerven, welcher an einer etwas seitlich gelegenen Stelle vom Gehirn her ins Auge eintritt, gebildet und hat einen sehr zusammengesetzten Bau (in der Figur nicht angedeutet). An der Eintrittsstelle des Sehnerven ist die Netzhaut für Licht empfindungslos (blinder Fleck), während an derjenigen Stelle, auf welcher das Bild eines Gegenstandes entsteht, wenn wir unser Auge auf denselben richten, Lichteindrücke am deutlichsten wahrgenommen werden. Diese Stelle (gelber Fleck) liegt da, wo eine durch den Scheitel der Hornhaut und die Mitte der Pupille gelegte Gerade (Augenachse) die Netzhaut trifft. Der Sehnerv übermittelt die auf die Netzhaut wirkenden Lichtreize dem Gehirn.

Da das Auge aus verschiedenen lichtbrechenden Körpern zusammengesetzt ist, so läßt sich der Gang der Lichtstrahlen nicht in so einfacher Weise darstellen, wie bei künstlichen optischen Apparaten. Wir wollen uns daher bei allen späteren Betrachtungen vorstellen, das Auge enthielte nur ein einziges lichtbrechendes Mittel (Fig. 390). Denkt man sich dann von den Endpunkten des Gegenstandes (AB) nach den entsprechenden Punkten des Bildes (ab) gerade Linien gezogen, so geben diese die Richtung der Strahlen an. Der Punkt (O), in welchem diese Linien sich schneiden, wird Kreuzungspunkt genannt; er bildet den optischen Mittelpunkt des Auges und liegt beim wirklichen Auge im Innern der Krystalllinse, nahe vor der hinteren Fläche derselben.

Fig. 390.



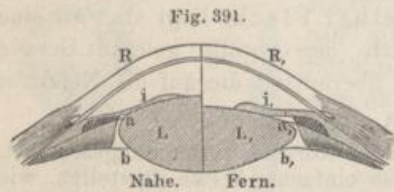
Übungstoff. 1. Vgl. das Auge mit der Camera obscura. (Die größere Vollkommenheit der Einrichtung ist hervorzuheben.) — 2. Welchen Einfluss hat die Weite der Blende im Ansatzrohr der Camera obscura auf die Lichtstärke und Schärfe des negativen Bildes, sowie auf die Schnelligkeit, mit welcher das Bild entsteht? — 3. Durch welche wichtige Eigenschaft unterscheidet sich die Blende des Auges von allen Blenden optischer Instrumente? — 4. Mit welcher von den in Fig. 362 dargestellten Linsen hat der vordere Teil des Auges, welcher außen von der Hornhaut, innen von der Linse begrenzt wird, Ähnlichkeit? — 5. Bei den im W. lebenden höheren Tieren ist die Krystalllinse des Auges viel stärker gekrümmt als bei den Landtieren (bei Fischen nahezu kugelig); w.? — 6. Betrachtet man von 2 etwa um Fingerlänge voneinander entfernten Punkten den rechten Punkt mit

dem linken oder den linken mit dem rechten Auge, während man das andere Auge geschlossen hält, so sind bei Annäherung der Fläche zunächst beide Punkte sichtbar. Entfernt man darauf die Fläche weiter vom Auge, so verschwindet der Punkt, auf den das Auge nicht gerichtet war, zunächst vollständig; er wird aber bei zunehmender Entfernung wieder sichtbar. Wie erklärt sich diese Ersch.? — 7. Ständen rechts oder links 2 Punkte etwa 2 cm voneinander, so würde bei gleichem Verfahren zuerst der innere und darauf auch der äußere Punkt verschwinden u. s. w. Erkl.!

§ 106. Das Sehen. Frühere Versuche haben ergeben, daß die Bilder, welche durch eine Sammellinse entstehen, nur in bestimmten

Abständen von Linse und Schirm deutlich erscheinen, sowie dafs diese Abstände bei einer bestimmten Linsenkrümmung von der Entfernung der Gegenstände abhängig sind (§ 102). Wären demnach Lage und Krümmung der lichtbrechenden Teile des Auges unveränderlich, so könnte ein deutliches Bild auf der Netzhaut nur von solchen Gegenständen entstehen, welche in einer ganz bestimmten Entfernung vom Auge sich befinden; nähere oder weiter entfernte Gegenstände müßten undeutlich erscheinen. Obgleich man nun nur in einer bestimmten Entfernung ohne Anstrengung am deutlichsten zu sehen vermag, so kann sich das Auge doch sehr verschiedenen Entfernungen anpassen. (**Akkommodationsvermögen.**)

Die Akkommodation wird hauptsächlich durch eine Gestaltveränderung



der Krystalllinse bewirkt. Beim Nahesehen ist besonders die vordere Fläche der Krystalllinse stärker gewölbt, beim Sehen in die Ferne ist sie mehr abgeflacht (Fig. 391). Dabei findet im ersteren Falle zugleich eine Verengung, im letzteren eine Erweiterung der Pupille statt.

Das Akkommodationsvermögen ist jedoch nicht unbegrenzt. Die beiden äußersten Entfernungen, für welche eine Anpassung des Auges möglich ist, heißen **Nähepunkt** und **Fernpunkt**; die Entfernung, in welcher ein Auge ohne Anstrengung am deutlichsten sieht, wird **deutliche Sehweite** genannt. Um die Grenzen des deutlichen Sehens zu bestimmen, braucht man nur durch 2 feine, in einem Kartenblatt dicht nebeneinander befindliche Öffnungen eine Nadelspitze zu betrachten. Dieselbe erscheint bei starker Annäherung doppelt, bei weiterer Entfernung innerhalb gewisser Grenzen nur einfach, in größerer Entfernung wieder doppelt. Erkläre die Erscheinung! (Versuch von Scheiner, 1619.)

Bei **normalsichtigen Augen** ist 1. der Abstand des **Nähepunktes** 10 bis 12 cm (in geringerer Entfernung strengt das Sehen sehr an); 2. die **deutliche Sehweite** ungefähr 24 cm; 3. der **Abstand des Fernpunktes** sehr groß.

Bei **kurzsichtigen Augen** ist die deutliche Sehweite kleiner als bei normalsichtigen; der **Fernpunkt** liegt dem Auge zu nahe. Dies wird durch eine zu starke Krümmung der Krystalllinse oder (nach neueren Untersuchungen) dadurch hervorgerufen, dafs die **Augenachse** von vorn nach hinten zu lang ist. Das Bild von einem

Fig. 392.

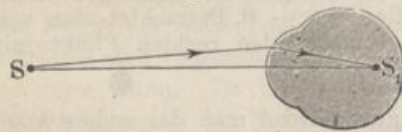


Fig. 393.



in der normalen Sehweite befindlichen Gegenstände entsteht dann schon vor der Netzhaut (Fig. 392). Kurzsichtige müssen daher die Gegenstände, um sie deutlich zu erkennen, den Augen mehr nähern (vergl. Fig. 371: Verschiebung von A_2B_2 nach AB; ab entspricht dem Netzhautbilde), oder sie müssen **Konkavlin**sen als Brillen tragen (Fig. 393).

Da durch **Konkavlin**sen die Strahlen zerstreut werden, so gelangen in die mit einer Brille versehenen kurzsichtigen Augen um so weniger Lichtstrahlen, je schärfer die Brille ist und je weiter sie von den Augen absteht. Hierdurch wird die Licht-

stärke des Netzhautbildes vermindert. Kurzsichtige müssen daher die Brille den Augen möglichst nähern.

Bei weitsichtigen (übersichtigen) Augen ist die deutliche Sehweite gröfser als bei normalen; der Nähepunkt liegt zu weit vom Auge weg. Dies hat seinen Grund in einer zu starken Abflachung der Krystalllinse oder in einer Verkürzung der Augenhaxe. Die Strahlen, welche von einem in der normalen Sehweite befindlichen

Fig. 394.

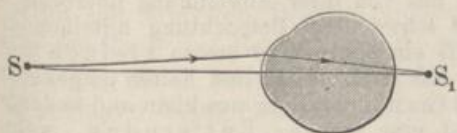
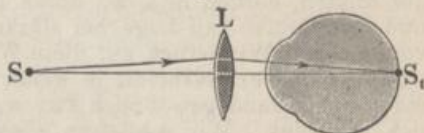


Fig. 395.



Gegenstände ausgehen, treffen mithin die Netzhaut schon vor ihrer Vereinigung zu einem Bilde (Fig. 394). Damit das Bild auf die Netzhaut fällt, müssen Weitsichtige die Gegenstände in gröfserer Entfernung betrachten (vgl. Fig. 371: Verschiebung von A_1B_1 nach AB) oder Konvexlinsen als Brillengläser tragen (Fig. 395).

Da Konvexlinsen die Strahlen sammeln, so wird das Netzhautbild um so lichtstärker, je weiter die Brille von den Augen absteht. Weitsichtige sehen daher besser, wenn die Brille von den Augen möglichst entfernt ist.

Die Kurzsichtigkeit wird von jüngeren Leuten häufig durch andauernde Akkommodation der Augen für die Nähe (beim Lesen, Zeichnen u. s. w.) erworben, während Weitsichtigkeit mit zunehmendem Alter infolge einer Erschlaffung der Muskeln, welche die Akkommodation bewirken, eintritt. — Die Brillen¹⁾ wurden gegen Ende des 13. Jahrhunderts in Italien erfunden.

Schwinkel. Die tägliche Erfahrung lehrt, dafs nicht nur die Deutlichkeit, sondern auch die Gröfse, in der uns ein Gegenstand erscheint, sich mit der Entfernung ändert (Beispiele!). Da nun das Sehen auf dem Zu-

Fig. 396.

standekommen von Bildern auf der Netzhaut beruht, so muß jene Erscheinung durch eine Veränderung in der Gröfse dieser Netzhautbilder hervorgerufen werden. Fig. 396 zeigt, dafs nicht nur Gegenstände von gleicher Gröfse ungleichgrofse Bilder auf der Netzhaut erzeugen können, sondern dafs auch das Umgekehrte eintreten kann. Die Gegenstände erscheinen uns hiernach gleichgrofs, wenn die von ihren Endpunkten durch den optischen Mittelpunkt des Auges gehenden Strahlen denselben Winkel (**Schwinkel**) einschließen; sie erscheinen in anderer Gröfse, wenn dieser Winkel sich ändert.

Die scheinbare Gröfse eines Gegenstandes ist durch den Schwinkel bestimmt.

¹⁾ beryllus = Beryll, ein Edelstein.

Durch verschiedene optische Instrumente wird bewirkt, daß Gegenstände, deren Sehwinkel für die deutliche Beobachtung zu klein sind, in der deutlichen Sehweite unter größeren Sehwinkeln erscheinen. Ist ein Gegenstand mäfsig erleuchtet, so kann man ihn noch wahrnehmen, wenn der Sehwinkel kaum den hundertsten Teil eines Grades beträgt. Hell leuchtende Sterne sind noch unter viel kleineren Sehwinkeln zu erkennen.

Zur Beurteilung der wirklichen Gröfse und Entfernung der Gegenstände sind gewisse Erfahrungen nötig. Diese sammeln wir schon von frühester Jugend an, indem wir nach den Gegenständen hingehen, ihre Abstände abschreiten, messen u. s. w., durch Betasten uns von ihrer Ausdehnung überzeugen und ihre Gröfse und Lage bei stärkerer und schwächerer Beleuchtung miteinander vergleichen. Wir lernen auf diese Weise, daß ein Gegenstand um so kleiner und undeutlicher erscheint, je weiter er von uns entfernt ist, und halten umgekehrt einen Gegenstand gewöhnlich für weit entfernt, wenn er uns klein und undeutlich erscheint. Wir schliessen ebenfalls auf eine große Entfernung, wenn zwischen uns und dem betrachteten Gegenstände zahlreiche andere Gegenstände sich befinden, da wir im allgemeinen auf großen Strecken mehr Dinge wahrnehmen als auf kleinen.

Bei dieser Beurteilung der Gröfse und Entfernung der Gegenstände sind wir jedoch allerlei Täuschungen ausgesetzt. So halten wir z. B. Berge bei nebligem Wetter leicht für weiter entfernt und für höher als sie wirklich sind; sind dieselben im Winter mit Schnee bedeckt und ist die Luft klar, so halten wir sie für zu niedrig und zu nahe (Täuschungen im Hochgebirge). Sonne und Mond erscheinen uns viel größer, wenn sie aufgehen, als wenn sie hoch am Himmel stehen, obgleich der Sehwinkel in beiden Fällen derselbe ist; im ersteren Falle trifft unser Blick zahlreiche, ihrer Entfernung nach bekannte Gegenstände, wodurch wir verleitet werden, die Himmelskörper uns entfernter und größer vorzustellen, als wenn sie höher am Himmel stehen.

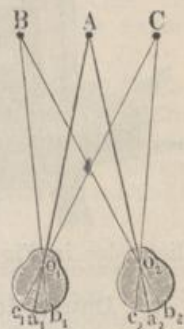
Übungsstoff. 1. Wie läßt sich bei einer Camera obscura bewirken, daß das Bild unter Beibehaltung desselben Objectivs und bei derselben Stellung der Rückwand wieder deutlich erscheint, wenn der Gegenstand sich nähert oder entfernt. Erkläre die Undeutlichkeit! — 2. Wie erzielt man dieselbe Lichtstärke des Bildes bei sehr ungleichen Entfernungen des Gegenstandes? — 3. Wie lassen sich diese Erfahrungen auf Vorgänge im Auge anwenden? — 4. Warum ist bei im W. lebenden Tieren eine starke Krümmung für die Hornhaut zwecklos, für die Krystalllinse aber notwendig? (Kuglige Krystalllinse der Fische.) — 5. Sind Fische in der Luft weit-, normal- oder kurzsichtig? Grund! — 6. Desgl. der Mensch unter W.? Grund! — 7. Wie entsteht das Bild des eigenen Kopfes, wenn man einer anderen Person ins Auge sieht? (Augenspiegel.) — 8. Welche Erschn. zeigen Baumreihen, Eisenbahnschienen u. dgl. in der Ferne hinsichtlich ihres gegenseitigen Abstandes? Erkl.! — 9. Warum erscheinen große Gewässer vom Ufer aus gewöhnlich zu schmal? — 10. Wie mag die Meinung entstanden sein, das W. ziehe die Kugeln der Geschütze an? — 11. Hohe Türme erscheinen uns gewöhnlich zu niedrig, wenn aber zugleich ein Mensch darauf sichtbar ist, in ziemlich richtiger Gröfse; w.? — 12. Wie läßt sich bei Gegenständen von bekannter Länge oder Höhe (Pferd eines Kavalleristen) durch Visieren über die Endpunkte eines in gleicher Richtung gehaltenen kurzen Stabes annähernd die Entfernung beurteilen?

§ 107. Das Sehen. (Fortsetzung). Daß wir die Gegenstände aufrecht sehen, obgleich die Netzhautbilder umgekehrt sind, erklärt sich in folgender Weise. Da wir von frühester Jugend an durch unseren Tastsinn darüber belehrt werden, wissen wir, daß wir zur Betrachtung der einzelnen Teile eines Gegenstandes unser Auge dahin richten müssen, wo dieselben sich wirklich befinden, also nach oben, wenn der Punkt hoch, nach unten, wenn er tief liegt u. s. w. Wir verlegen demnach die Ursachen der Lichteindrücke in der Richtung nach aufsen, in welcher die Strahlen

ins Auge fallen und sehen gerade deshalb die Gegenstände aufrecht, weil die Netzhautbilder umgekehrt sind.

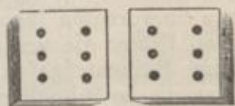
Das Einfachsehen. Wenn wir einen Gegenstand (A, Fig. 397) betrachten, so richten wir beide Augen so, daß ihre *Achsen* (a_1o_1 und a_2o_2) in ihrer Verlängerung den betrachteten Gegenstand treffen. Dadurch entstehen beide Netzhautbilder auf entsprechenden Stellen der Netzhaut (in a_1 und a_2). Dasselbe gilt von den Bildern derjenigen nicht betrachteten Gegenstände (z. B. B oder C), welche in derselben Entfernung etwas weiter nach links oder rechts liegen; von der linken Seite entstehen beide Bilder rechts (in b_1 und b_2), von der rechten links von der Achse (in c_1 und c_2). Wir sehen in solchen Fällen die Gegenstände *einfach*. Liegen dagegen die betrachteten Gegenstände hintereinander, etwa in A und dem Schnittpunkte der beiden Linien Bb_2 und Cc_1 , so würden die Bilder des näheren Gegenstandes, wenn man die Augen wie vorhin nach A richtete, in c_1 und b_2 , also auf 2 einander nicht entsprechenden Stellen der Netzhaut entstehen. Wir sehen dann den Gegenstand *doppelt*. (Bestätigung durch einen Versuch mit 2 Stäbchen).

Fig. 397.



Das Körperlichsehen. Die beiden Netzhautbilder, welche uns einen Gegenstand einfach erscheinen lassen, können nicht genau übereinstimmen, da die Augen wegen ihres gegenseitigen Abstandes eine verschiedene Lage zu dem betrachteten Gegenstande einnehmen. So sind z. B. von einem nahe vor dem Auge befindlichen schmalen Gegenstande (Würfel, Fig. 398, Buch bei Betrachtung des Rückens) zwar beide Seiten zugleich sichtbar, schließt man aber abwechselnd das eine und das andere Auge, so überzeugt man sich leicht, daß jedes nur eine Seitenfläche des Gegenstandes sieht.

Fig. 398.

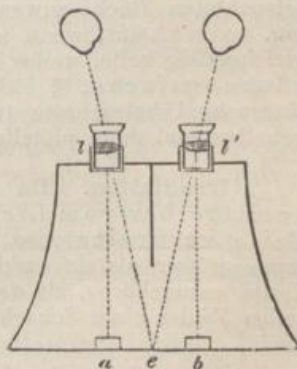


In der Verschiedenheit der Netzhautbilder liegt demnach der Grund, daß uns die Gegenstände nicht als flache Bilder, sondern als Körper erscheinen. Unser Urteil über die Körperlichkeit wird noch durch die Verteilung von Licht und Schatten unterstützt.

Blindgeborene, welche später durch eine Operation sehend werden, sind erst nach längerer Übung imstande, die Körperlichkeit und Entfernung von Gegenständen zu beurteilen. Sehr weit entfernte Gegenstände sehen wir flächenartig (Mondscheibe).

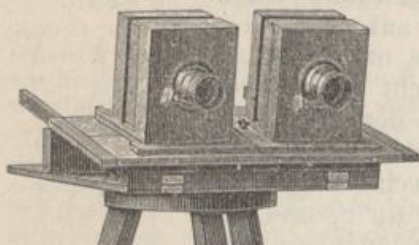
Daß das Körperlichsehen auf der Vereinigung verschiedener Netzhautbilder beruht, läßt sich durch das **Stereoskop** (Fig. 399) nachweisen. Dasselbe besteht aus einem Kasten, in dessen Deckel zwei kurze Röhren so befestigt sind, daß sie um den gegenseitigen Abstand der beiden Augen auseinander liegen. Jede dieser Röhren enthält ein Glasprisma mit kleinem brechenden Winkel. Die brechenden Kanten dieser keilförmigen Gläser sind gegeneinander gerichtet.

Fig. 399.



Wird auf den Boden des Kastens ein den beiden Netzhautbildern entsprechendes Doppelbild gelegt, dessen beide Hälften einen und denselben Gegenstand so darstellen, wie ihn die Augen einzeln erblicken würden, so sieht man nicht zwei Bilder, sondern einen Körper. Die Art, wie diese Wirkung zustande kommt, zeigt Fig. 399. Die Strahlen, welche von zwei entsprechenden Punkten (a und b) der beiden Punkte ausgehen, werden beim Durchgange durch die beiden Gläser nach außen hin so gebrochen, daß ihre nach rückwärts gerichteten Verlängerungen sich in einem Punkte schneiden. Die Bilder erscheinen auf diese Weise durch Brechung der Strahlen so gegeneinander verschoben, daß sie zusammenfallen. Dadurch entsteht der Eindruck, als ob der dargestellte Körper selbst an ihre Stelle getreten wäre.

Fig. 400.



Zur Herstellung stereoskopischer Bilder dient der in Fig. 400 dargestellte photographische Apparat mit einer Doppelcamera.

Dauer der Lichteindrücke. Gewisse Erscheinungen beweisen, daß die Lichteindrücke, besonders wenn das Licht stark ist, noch eine Zeitlang *nachempfunden* werden. Man erblickt z. B. feurige Linien, wenn eine glühende Kohle schnell bewegt wird; der Blitz erscheint als Zickzacklinie, obwohl er nur ein blendender Funke ist. Die Farben eines schnell gedrehten Kreiselers scheinen in einander überzugehen u. s. w.

Auf der Nachempfindung beruhen auch die optischen Täuschungen, welche sich mittelst der sogen. Wundertrommeln (Stroboskope¹) und ähnlicher Apparate hervorrufen lassen. Stellen die durch die Ausschnitte der Trommel betrachteten Bilder die verschiedenen Stellungen eines sich bewegenden Körpers in natürlicher Reihenfolge dar, so scheint dieser die Bewegungen wirklich auszuführen, und zwar um so schneller, je schneller man dreht. Das Stroboskop läßt sich demnach zweckmäßig zur Veranschaulichung eines schnell sich abspielenden Bewegungsvorganges verwenden, z. B. der Wellenbewegung (Quinckes Wellenbilder).

Nachbilder. Wenn man das Auge nach einem starken Lichtreize (Blick in die Sonne) schließt oder auf einen dunklen Hintergrund richtet, so dauert der Reizzustand noch eine Zeitlang an, hierbei geht der zurückbleibende helle Schein durch verschiedene Farben hindurch: *positive Nachbilder*. — Dauert ein starker Lichteindruck lange an, so ermüdet die Netzhaut an der vom Lichte gereizten Stelle. Dies giebt sich dadurch zu erkennen, daß anstatt des betrachteten, hell erleuchteten Gegenstandes ein dunkler Fleck vor dem Auge erscheint, wenn man es von dem Gegenstande ab- und einer mäßig erleuchteten Fläche zuwendet: *negatives Nachbild*. War der Gegenstand farbig, so erscheint, wenn man das Auge von der betrachteten Farbe weg auf eine gleichmäßig helle, weiße Fläche wendet, das Nachbild in einer anderen Farbe (Ergänzungsfarbe, § 108), z. B. grün, wenn man längere Zeit einen roten Gegenstand betrachtete (rote Papierstreifen oder rote Blumen auf weißes Papier gehalten und dann plötzlich entfernt).

Irradiation. Da der Reizzustand der Netzhaut sich von der unmittelbar vom Lichte getroffenen Stelle auf die angrenzenden Teile verbreitet, so erscheinen sehr helle Gegenstände auf dunklem Grunde etwas größer als sie wirklich sind. Die Mondsichel z. B. scheint einem größeren Kreise anzugehören, als der übrige nur matt erleuchtete Teil der Mondscheibe; die hellen Felder eines Schachbrettes erscheinen größer als die dunklen.

¹) *στροβέλν* (strobein), im Kreise drehen.

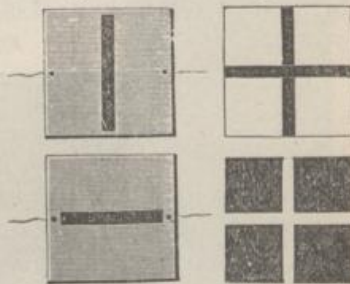
Auf ähnlichen Einwirkungen beruhen die **Kontraste**, d. h. die Veränderungen, welche nebeneinander befindliche Beleuchtungen oder Farben aufeinander ausüben. Eine helle Fläche z. B. erscheint vor einem helleren Hintergrunde dunkler als vor einem dunkleren; Grau sieht auf Weiß dunkler aus als auf Schwarz, auf blauem Grunde gelblich, auf hellgrünem rötlich. Auf Schnee erscheinen die Schatten im gelblichen Lichte der Abendsonne bläulich, bei lebhaftem Abendrot die benachbarten Teile des blauen Himmels grünlich u. s. w. Ein sehr bemerkenswertes Beispiel von Kontrastwirkung sind die **Sonnenflecke**, die nur durch den Kontrast zu der außerordentlichen Helligkeit der Sonnenscheibe dunkel erscheinen.

Manchen Augen fehlt teilweise oder vollständig die Fähigkeit, Farben zu unterscheiden (**Farbenblindheit**). Denjenigen Personen, welche gar keine Farben empfinden, erscheinen alle Farben grau, die gelbe und grüne Farbe am hellsten (**totale Farbenblindheit**). Fehlt nur für gewisse Farben die Empfindung, so bezeichnet man den Zustand als **Rotblindheit**, **Blaubindheit** u. s. w.

Übungsstoff. 1. Warum ist es schwierig, eine Nähnadel einzufädeln, wenn man das eine Auge schließt? — 2. Welche Anwendungen findet das Stereoskop? — 3. Welche optische Täuschung ruft eine tönende Saite, Stimmgabel u. s. w. hervor? — 4. Von 2 Kreiseln sei der eine längs, der andere quer farbig gestreift. Welcher Unterschied giebt sich zu erkennen, wenn beide schnell umlaufen? Erkl.! — 5. In welcher Weise läßt sich durch ein Kartenblatt eine optische Täuschung hervorrufen, wenn auf der einen Seite eine senkrechte, auf der anderen eine wagerechte Linie (Fig. 401), oder auf der einen ein Käfig und auf der anderen ein Vogel gezeichnet ist? — 6. Wenn man ein Blatt Papier, auf welches mehrere nahe aneinander gelegene, kräftig ausgezogene Kreise gezeichnet sind, mit einiger Geschw. kreisförmig verschiebt, so scheinen die Kreise sich zu drehen. Worauf ist diese Ersch. zurückzuführen? — 7. Aus einem dunklen Blatte Papier seien schmale Streifen (etwa in Kreuzform, Fig. 402) ausgeschnitten; diese, sowie das Blatt selbst seien auf eine hell beleuchtete Fensterscheibe geklebt. Scheinbares Gröfsenverhältnis? — 8. Inwiefern kann die Farbe der Bekleidung (z. B. schwarze und weiße Handschuhe) eine Täuschung über die Gröfse der bekleideten Körperteile hervorrufen?

Fig. 401.

Fig. 402.



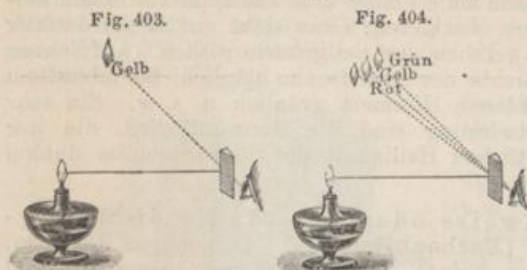
D. Farbenzerstreuung des Lichtes.

§ 108. Zerlegung des Lichtes. Ergänzungsfarben.

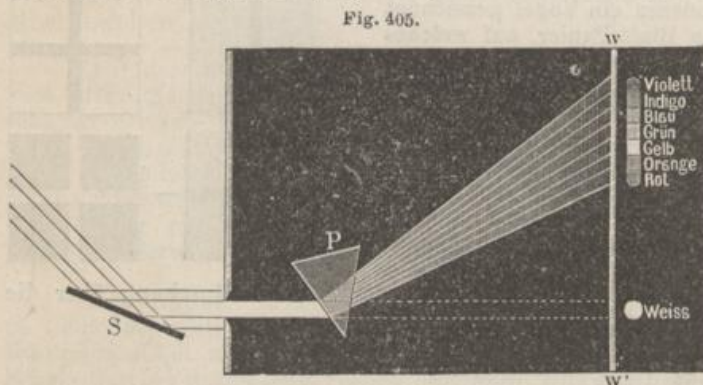
Helle Gegenstände zeigen bei der Betrachtung durch Prismen und stark gekrümmte Linsen einen farbigen Saum; das Sonnenlicht bricht sich farbig in den Tautropfen oder im Wasserstrahl eines Springbrunnens, das Licht heller Flammen in den Glasprismen, mit welchen die Kronleuchter verziert werden. Diese Erscheinungen deuten darauf hin, daß Sonnenlicht sowohl als künstliches Licht verschiedenfarbige Strahlen enthält, welche zusammen einen bestimmten Lichteindruck hervorrufen, ähnlich wie in einem musikalischen Klang Töne von verschiedener Höhe und Beschaffenheit enthalten sind, durch deren Zusammenklingen der eigentümliche Charakter des Tones, den man durch das ausdrucksvolle Wort **Klangfarbe** bezeichnet, bestimmt wird. ¶

***Versuch a.** Betrachtet man eine Spiritusflamme, deren Docht mit Kochsalzlösung getränkt ist, im verdunkelten Zimmer durch ein

Prisma mit großem brechenden Winkel, so erscheint die Flamme stark verschoben und einfarbig gelb (Fig. 403). — Benetzt man den Docht mit einer Lösung von kohlensaurem Lithium oder Chlorlithium, so erblickt man neben der gelben noch eine rote Flamme u. s. w. (Fig. 404.)



einem regenbogenfarbigen Bande verbreitert, in welchem die rote Farbe am wenigsten, die violette am stärksten abgelenkt ist. 2. Lässt man durch eine kleine Öffnung im Fensterladen direktes Sonnenlicht in das stark verdunkelte Zimmer dringen, so entsteht auf einem der Öffnung gegenüber aufgestellten weissen Schirme ein weisses Sonnenbild; werden aber die Strahlen durch ein Prisma stark abgelenkt, so entsteht ein regenbogenfarbiger Streifen (Fig. 405). In diesem Streifen lassen sich 7 Farben: *Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo* und *Violett* (oder 3 Grundfarben: *Rot, Gelb und Blau*) unterscheiden, welche allmählich ineinander übergehen (Fig. 406). Die Strahlen, welche das Rot erzeugen, sind am wenigsten, diejenigen, durch welche das Violett hervorgerufen wird, am stärksten gebrochen.



richtung) mit der Hand nach dem Stande der Sonne gedreht werden kann (sogen. Heliostat).

Die Zerlegung des Lichtes in seine Farben wird **Farbenzerstreuung**, das durch die Zerlegung entstehende farbige Bild **Spektrum**¹⁾ genannt.

Das **weisse Licht** besteht aus Strahlen von verschiedener Brechbarkeit, welche nach ihrer Zerstreuung verschiedene Farben (**Spektralfarben**) hervorrufen. Die am stärksten brechbaren Strahlen erzeugen die violette, die am schwächsten brechbaren die rote Farbe.

Versuch c. Werden sämtliche Strahlen des Sonnenlichtes nach ihrer Zerstreuung mittelst einer Konvexlinse vereinigt (Fig. 407, folg. Seite), so erhält man wieder weisses Licht.

Bem. Eine schnell gedrehte, kreisförmige Scheibe, auf welcher die Farben des Spektrums möglichst rein in Kreisabschnitten aufgetragen sind (Fig. 408, folg. Seite), erscheint nicht in reinem Weiss; warum?

¹⁾ spëcio, sehen, schauen.

Versuch d. Läßt man die Strahlen irgend einer dieser Strahlengattungen durch einen in dem Schirme S_1 befindlichen Spalt auf ein zweites Prisma fallen, so findet abermals eine Brechung statt, wobei jedoch die Farbe unverändert bleibt.

Fig. 407.

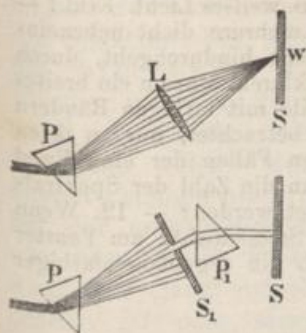


Fig. 408.



Fig. 406.



Durch Vereinigung aller Spektralfarben entsteht wieder Weifs. — Die Spektralfarben sind einfache Farben; das sie erzeugende Licht ist einfaches Licht.

Versuch e. Verdeckt man bei der Vereinigung der Spektralfarben (Fig. 407) eine Farbe, so entsteht statt weissen Lichtes eine Mischfarbe und zwar Grün, wenn man die roten Strahlen, Rot, wenn man die grünen ausschließt, ferner Blau, wenn man Orange, Violett, wenn man Gelb ausschließt und umgekehrt. — Durch Vereinigung von Rot und Grün, Orange und Blau, Gelb und Violett entsteht wieder Weifs.

Bem. Wird einer der farbigen Kreisabschnitte (Fig. 408) durch ein darauf befestigtes schwarzes Stück Pappe verdeckt, so treten bei schneller Drehung der Scheibe die vorhin angeführten Erscheinungen um so reiner hervor, je mehr die Farben der Scheibe mit den Spektralfarben übereinstimmen.

Weifs entsteht nicht allein durch Mischung aller Spektralfarben, sondern auch dadurch, dafs nur 2 Farben des Spektrums (Rot und Grün, Orange und Blau, Gelb und Violett) miteinander vereinigt werden.

Zwei Farben, welche einander zu Weifs ergänzen, werden Ergänzungsfarben oder Komplementärfarben genannt.

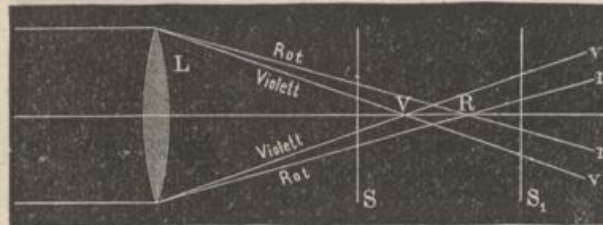
Die Zusammensetzung des weissen Lichtes wurde von Newton (1666) nachgewiesen. Er unterschied die genannten sieben Farben im Sonnenspektrum nach Analogie der Töne der Tonleiter.

Übungstoff. 1. Warum ist zu dem durch Fig. 405 veranschaulichten Versuche ein gekrümmter Spiegel unbrauchbar? — 2. Warum ist ferner ein auf der Vorderseite versilberter Glasspiegel einem auf der Rückseite geschwärzten Spiegel vorzuziehen? — 3. Einfluß der Entfernung des Schirmes (w, Fig. 405) vom Prisma

auf die Größe und Lichtstärke des Spektrums? Grund! — 4. Welchen Vorteil bietet demnach die Anwendung eines Prismas, das aus einem das Licht möglichst stark brechenden Stoffe besteht? — 5. Einfluss der Größe des brechenden Winkels? — 6. Wie erklärt es sich, daß die rote Farbe bei Versuch a (Fig. 404) von der brechenden Kante des Prismas ab-, bei Versuch b₁ (Fig. 405) dagegen derselben zugewandt erscheint? — 7. Wenn man bei Versuch b₂ das Prisma schnell hin- und herbewegt, so sieht man in der Mitte des farbigen Streifens weißes Licht. Erkl.! — 8. Welche Ersch. wird sich zeigen, wenn man zwei oder mehrere dicht nebeneinander liegende schmale Öffnungen, durch welche Sonnenlicht hindurchgeht, durch ein Prisma betrachtet? Erkl.! — 9. Versuche hiernach zu erklären, warum ein breites Strahlenbündel nahe hinter dem Prisma nur ein weißes Bild mit farbigen Rändern liefert, desgl. warum eine weiße Fläche durch ein Prisma betrachtet, nur an ihren Rändern farbig erscheint. — 10. Warum sieht in solchen Fällen der eine Rand rötlichgelb, der andere blauviolett aus? — 11. Warum kann die Zahl der Spektralfarben als eine mehr oder weniger willkürliche bezeichnet werden? — 12. Wenn eine etwa halb mit W. gefüllte Trinkflasche im direkten Sonnenlichte am Fenster steht, so ist auf dem Fußboden des Zimmers gewöhnlich ein regenbogenfarbiger Lichtschein sichtbar. Erklärung!

§ 109. Chromatische Abweichung. Achromatische Prismen und Linsen. Da mit der Brechung des Lichtes zugleich eine Farbenzerstreuung eintritt, so müssen die durch einfache Linsen erzeugten Bilder außer derjenigen Undeutlichkeit, welche durch zu starke Brechung der Randstrahlen hervorgerufen wird (sphärische Abweichung, Seite 252), noch eine andere Undeutlichkeit zeigen, welche durch die ungleiche Brechung der das Licht zusammensetzenden farbigen Strahlen entsteht. Die Bilder erhalten dadurch farbige Ränder (Fig. 370, bei starker Vergrößerung). Dies erklärt sich daraus, daß die Brennweite einer Linse für die einzelnen Strahlengattungen nicht genau dieselbe ist (Fig. 409), wie sich durch folgenden Versuch nachweisen läßt.

Fig. 409.

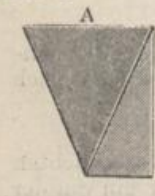


derselben (auf S₁) violett gefärbt.]

Versuch a. Läßt man im verdunkelten Zimmer Sonnenstrahlen durch eine Sammellinse hindurchgehen, so ist der äußere Rand des Strahlenkegels innerhalb der Brennweite der Linse (auf dem Schirm S) rot, außerhalb

Die durch eine einfache Linse erzeugten Bilder haben infolge der Farbenzerstreuung farbige Ränder: **Chromatische**¹⁾ **Abweichung.**

Fig. 410.



Versuch b. Werden 2 Prismen aus verschiedenen Glassorten, ein *Kron-* und ein *Flintglasprisma*, von denen ersteres (Fig. 410, A) einen nahezu doppelt so großen brechenden Winkel hat, als letzteres (B), in

¹⁾ χρομα (chrōma), Farbe.

umgekehrter Lage zu einem Prisma vereinigt, so erscheinen die Ränder der durch sie betrachteten Gegenstände zwar verschoben, aber nicht farbig.

Dies erklärt sich daraus, daß Kronglas die Strahlen zwar ebenso stark bricht, aber viel weniger zerstreut als Flintglas (siehe die Spektren, Fig. 411). Infolgedessen ist die brechende Kraft jener beiden Prismen ungleich, die Farbenzerstreuung aber gleich. Die Ablenkung der Strahlen, welche durch das eine der beiden Prismen hindurchgehen, wird daher bei der entgegengesetzten Lage der Prismen durch das andere Prisma nur teilweise, die Farbenzerstreuung aber ganz aufgehoben. Das Ergebnis ist also eine Lichtbrechung ohne Farbenzerstreuung. — Dasselbe läßt sich auch dadurch erreichen, daß man eine Konvexlinse von Kronglas (Fig. 412) mit einer schwächer gekrümmten Konkavlinse von Flintglas zu einer Sammellinse verbindet.

Fig. 411.

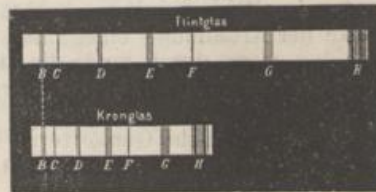
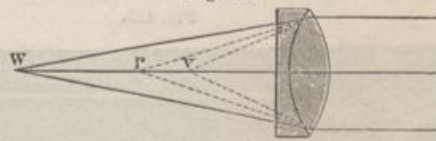


Fig. 412.



Denkt man sich in Fig. 410 das Prisma B an die linke Seite gelegt, so entspricht das Doppelprisma der unteren Hälfte der in Fig. 412 dargestellten Doppel- linse. Durch die Konvexlinse allein würden die violetten Strahlen in v, die roten in r vereinigt werden; die Konkavlinse bewirkt, daß diese beiden Brennpunkte in größerer Entfernung von der Linse zusammenfallen, indem sie die vorher stärker nach innen gebrochenen violetten Strahlen um ebensoviel stärker nach außen ablenkt.

Der Brechungsindex für Luft und Kronglas ist ungefähr $\frac{3}{2}$, für Luft und Flintglas $\frac{3}{2}$ (Flintglas enthält mehr Bleioxyd als Kronglas).

Eine Verminderung der chromatischen Abweichung läßt sich auch schon dadurch erreichen, daß man zwei Konvexlinsen von derselben Glassorte in passendem Abstände miteinander verbindet (siehe Fig. 381, o und o₁). Man denke sich in Fig. 412 die Konkavlinse durch eine konvexe Linse ersetzt; dann würden die beiden Brennpunkte r und v durch die zweite Konvexlinse (umgekehrt wie vorher) näher an die Linsen herangerückt und zwar der Brennpunkt der roten Strahlen stärker als der Brennpunkt der violetten, weil erstere durch jene Linse eine stärkere Brechung erleiden als letztere.

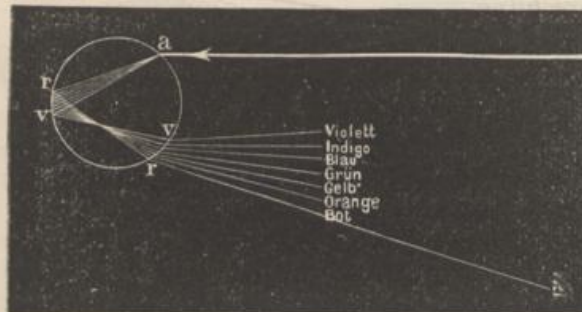
Aus Kron- und Flintglas zusammengesetzte Linsen geben Bilder ohne farbige Ränder und werden deshalb achromatische (farbenfreie) Linsen genannt. Die Herstellung wirklich brauchbarer Mikroskope und Linsenfernrohre ist erst durch die Erfindung achromatischer Linsen (1757) ermöglicht worden. Newton hielt die Herstellung achromatischer Linsen-Objektive noch für unmöglich und wandte deshalb zu seinen astronomischen Beobachtungen Spiegelfernrohre an.

Übungsstoff. 1. Wodurch wird die sphärische Abweichung des Lichtes beim menschlichen Auge verhütet? — 2. Betrachtet man über einen weißen K. hinweg (z. B. Stückchen Papier auf einer Spitze) einen viel weiter entfernten Gegenstand längere Zeit mit einem Auge, so erscheint der weiße K. rötlich umrandet; wann aber ohne solchen Rand? Inwiefern ist dies ein weiterer Grund für die Bedeutung des Akkommodationsvermögens? — 3. Warum haben die Lichtbilder, welche durch gekrümmte Spiegel entstehen, keine farbigen Ränder? — 4. Von zwei Lupen bestehe die eine aus einer einzelnen, die andere aus zwei einfachen konvexen Linsen; die Vergrößerung sei bei beiden dieselbe. Welche von denselben ist vorzu-

ziehen, u. w.? — 5. Wie ist diese Wirkung der zusammengesetzten Linse zu erklären? — 6. Zwei Prismen, von denen das eine aus Kron-, das andere aus Flintglas bestehe, seien nach Fig. 410 miteinander verbunden; ihre brechenden Winkel seien gleich. Optische Wirkung? — 7. Das Prisma A, Fig. 410, bestehe aus Flintglas, das Prisma B aus Kronglas. Optische Wirkung? — 8. Inwiefern läßt sich aus Versuch b schließen, daß die zerstreue Wirkung des Flint- und Kronglases der brechenden Wirkung dieser beiden Glassorten nicht proportional ist? — 9. Vgl. die Stärke der Krümmung einer Linse aus Flintglas mit der Krümmung einer Linse aus Kronglas, wenn durch beide die Strahlen gleichstark gebrochen werden. — 10. Desgl. die Stärke der Strahlenbrechung, wenn beide gleichstark gekrümmt sind. — 11. Ferner die Stärke der Farbenzerstreuung bei gleicher Krümmung der Linsen, und umgekehrt. — 12. Welche Glassorte ist hiernach zu den einfachen optischen Instrumenten (Lupen, Brillen u. dgl.) am besten geeignet?

§ 110. Die Farbenerscheinungen in der Atmosphäre.

Fig. 413.

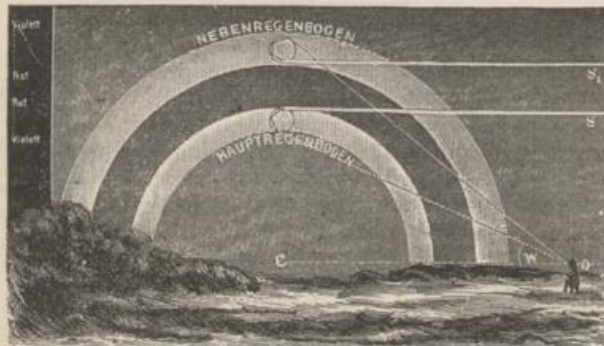


noch eine totale Reflexion (Fig. 413), sodass sie an der beleuchteten Seite desselben nach abermaliger Ablenkung wieder austreten und hier einen farbigen Glanz hervorrufen.

In welcher Farbe der Tropfen erscheint, hängt von der Stellung ab, die das Auge gegen den Tropfen einnimmt (siehe die Figur), während die Stärke des Farbeindrucks offenbar dadurch bedingt ist, wieviele gleichfarbige Strahlen ins Auge dringen. Die Zahl dieser Strahlen muß um so größer sein, je weniger die Richtungen derselben von einander abweichen.

Hierdurch läßt sich die bekannte Erscheinung des **Regenbogens**

Fig. 414.



(Fig. 414) erklären, welche wir wahrnehmen, wenn vor uns eine regnende Wolke und hinter uns die Sonne steht. Fiele nämlich ein einzelner Regentropfen nahe vor uns herab, so würde er, wenn wir ihn mit dem Auge verfolgen könnten, auf einer gewissen Strecke seines Weges wie ein Wassertropfen farbig glänzen, und

zwar würden (nach obiger Figur) sämtliche Farben des Spektrums vom Rot bis zum Violett nacheinander sichtbar werden. Diese Farbeindrücke können bei größserer Entfernung des Tropfens jedoch nur dann deutlich sein, wenn zahlreiche Strahlen derselben Farbe ins Auge dringen, also wenn das in den Tropfen eingedrungene Sonnenlicht so wieder austritt, daß die gleichfarbigen Strahlen parallel sind. Dies ist nur bei einer bestimmten Lage des Tropfens gegen Sonne und Auge möglich. Daß wir beim Regenbogen alle Farben gleichzeitig sehen, kann somit nur eine Folge sein von dem Zusammenwirken zahlreicher Tropfen, welche verschiedene Lagen gegen unser Auge einnehmen. Tropfen, welche gegen Sonne und Auge eine gleiche Lage haben, d. h. welche so liegen, daß die in sie eindringenden Strahlen des weissen Sonnenlichtes mit den ins Auge eintretenden farbigen Strahlen gleiche Winkel bilden, müssen auch gleiche Farbeindrücke hervorrufen.

Denken wir uns nun z. B. einen Tropfen, welcher rote Strahlen in unser Auge sendet, durch gerade Linien mit dem Mittelpunkte der Sonne und der Pupille unseres Auges verbunden und ebenfalls durch Sonne und Auge eine Gerade gelegt, so ist durch den entstehenden Winkel ($\sphericalangle w$) die gegenseitige Lage von Sonne, Tropfen und Auge bestimmt. Dieser Winkel ist offenbar derselbe für alle Regentropfen, welche einem Kreisbogen angehören, dessen Mittelpunkt auf einer durch die Sonne und das Auge gehenden geraden Linie (OC, Fig. 414) liegt.*) Die Größe dieses Winkels beträgt, wie sich berechnen läßt, für die roten Strahlen ungefähr 42° , für die violetten ungef. 40° , im Mittel also 41° .†) Jeder Farbenstreifen muß demnach die Form eines

*) Man denke sich zunächst, die Ebene, in welcher die angedeuteten Strahlen liegen, stehe (durch Drehung um eine durch C gehende senkrechte Achse) senkrecht auf der Bildfläche. Hierauf stelle man sich vor, sie werde um OC als Achse gedreht.

†) Bestimmung der Größe des Winkels w (Fig. 415): $\sphericalangle \frac{w}{2} = u - o$ (da u Außenwinkel des Dreiecks ist), folglich $\sphericalangle w = 2u - 2o$. Nun ist $\sphericalangle o = v - u$, mithin $\sphericalangle w = 2u - (2v - 2u) = 4u - 2v$.

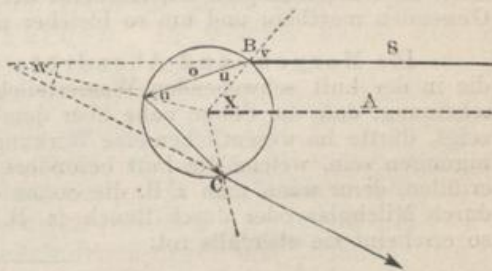
Fig. 415.

Es ist nun $\frac{\sin v}{\sin u}$ (Brechungsexponent n) für rote Strahlen = $\frac{108}{81}$, für violette = $\frac{109}{81}$. Für jeden Einfallswinkel läßt sich also der Brechungswinkel und aus beiden $\sphericalangle w$ berechnen. Führt man diese Rechnung für Strahlen aus, die in immer größerem Abstände von der Achse A parallel zu dieser einfallen, deren Einfallswinkel also von Null an zunimmt, so findet man:

1) daß $\sphericalangle w$ von Null bis zu einer bestimmten Grenze wächst und dann wieder abnimmt, daß bis dahin also die aus dem Tropfen austretenden gleichfarbigen Strahlen zweier benachbarten parallel einfallenden Sonnenstrahlen divergieren (unmerklicher Farbeindruck),

2) daß in der Nähe jener Grenze benachbarte Strahlen derselben Farbe bei ihrem Austritte immer schwächer divergieren und bei einem bestimmten

Einfallswinkel ($\sphericalangle v$, dessen Cosin. = $\sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$ oder dessen Sinus = $\sqrt{\frac{4 - n^2}{3}}$ nach



Kreisbogens haben, dessen scheinbarer Radius immer derselbe ist; sämtliche Farbstreifen müssen einander wie Teile konzentrischer Kreise umfassen, und zwar muß der violette Streifen den inneren, der rote den äußeren Bogen bilden, da nach Fig. 414 die violetten Strahlen bei ihrer größeren Brechbarkeit nur aus tieferen, d. h. dem Mittelpunkte des Regenbogens näher stehenden Tropfen ins Auge gelangen können. Der Mittelpunkt des Regenbogens liegt hiernach auf einer durch die Sonne und das Auge des Beobachters gehenden geraden Linie.

Der Glanz, in welchem uns der Regenbogen erscheint, hängt von der Anzahl der ins Auge gelangenden gleichfarbigen Strahlen, also von der Dicke der Regenwand ab.

Fig. 416.

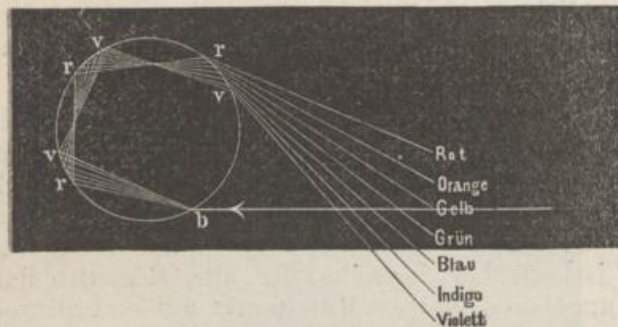


Fig. 416 dargestellte Tropfen falle vor den Augen nieder.)

Die farbigen Ringe (Höfe), welche man häufig um den Mond, seltener dagegen um die Sonne beobachtet, entstehen durch Brechung und farbige Zerstreuung des Lichtes in feinen Eisnadeln, die wie Prismen wirken. Sie sind am häufigsten und schönsten in den Polargegenden zu beobachten.

Blau- und Violett-Farbe des Himmels. Morgen- und Abendröte.

Die blaue Farbe des Himmels erklärt sich daraus, daß die Luft nicht vollkommen durchsichtig ist und vorzugsweise die blauen Strahlen zurückwirft. Dieses Blau scheint durch Wasserdämpfe wesentlich verstärkt, durch Wassertheilchen geschwächt zu werden, denn in den Tropengegenden, wo die Luft sehr reich an Wasserdämpfen ist, erscheint der Himmel tiefblau, während er in kälteren Gegenden mattblau und um so bleicher aussieht, je kälter die Luft ist.

Die Morgen- und Abendröte des Himmels scheint namentlich durch die in der Luft schwebenden Wassertheilchen hervorgerufen zu werden. — Die Erscheinung, daß die Sonne nahe über dem Horizonte sehr häufig rötliche Färbung zeigt, dürfte im wesentlichen eine Wirkung der Staubtheilchen und sonstiger Verunreinigungen sein, welche die Luft besonders in den unteren Schichten der Atmosphäre erfüllen, denn wenn man z. B. die Sonne durch eine mit Ruß bedeckte Glasscheibe, durch Milchglas oder durch Rauch (z. B. sogen. Höhenrauch) hindurch betrachtet, so erscheint sie ebenfalls rot.

Übungstoff. 1. Auf einer mit Tau benetzten Wiese erscheinen von einem bestimmten Standpunkte aus nur immer gewisse Tropfen farbig; w.? — 2. Wenn man sich einem farbig glänzenden Tautropfen mehr und mehr nähert, so ändert sich auch der Farbeindruck. Erkl.! — 3. Inwiefern hängt es von der Entfernung

(trigon. Rechnung) die benachbarten gleichfarbigen Strahlen parallel austreten; dieser Winkel ($\angle v$) ist für rote Strahlen gleich $59^{\circ} 23'$, $\angle w = 42^{\circ} 2'$, für violette Strahlen gleich $58^{\circ} 40'$, $\angle w = 40^{\circ} 16'$ (deutlicher Farbeindruck).

Bisweilen ist außerhalb des Regenbogens noch ein (etwas breiterer) Nebenregenbogen wahrzunehmen, dessen Glanz matter ist und dessen Farben in umgekehrter Ordnung aufeinander folgen. Dieser Regenbogen entsteht dadurch, daß die Sonnenstrahlen von der hinteren Fläche der Regentropfen zweimal zurückgeworfen werden. (Man denke sich, der in

des Tropfens ab, ob eine oder mehrere Farben in demselben sichtbar sind? — 4. Wie muß sich bei einem Regenbogen die durch einen einzelnen Tropfen der Regenwand hervorgerufene Farbenercheinung ändern, indem der Tropfen vor uns niederfällt, u. w.? — 5. Unter welcher Bedingung kann in dem Wasserstaube eines Springbrunnens oder eines Wasserfalles ein Regenbogen entstehen? — 6. Wie erklärt es sich, daß der Regenbogen an der äußeren Seite rot, an der inneren violett aussieht? — 7. Warum kann statt des Bogens kein gerader (senkrechter oder waagrechter) Farbenstreifen entstehen? — 8. Warum kann Beobachtern, welche weit voneinander entfernt sind, der Regenbogen nicht genau an derselben Stelle erscheinen? — 9. Wovon hängt es ab, wie hoch der Regenbogen am Himmel steht? — 10. Bei welcher Sonnenhöhe muß der obere Rand des Regenbogens mit dem Horizonte zusammenfallen? (Man denke sich die Ebene, in welcher S, S₁, OC u. s. w. liegen, Fig. 414, um O so gedreht, daß sich C abwärts bewegt.) — 11. Wann bildet der Regenbogen einen Halbkreis? (Einfluß der Jahreszeit!) — 12. Auf dem Gipfel sehr hoher Berge und vom Luftballon aus ist bisweilen ein nahezu vollständiger Kreis sichtbar. Erkl.! — 13. Inwiefern hängt es a. mit der Jahreszeit, b. mit der geogr. Lage eines Ortes zusammen, wie lange am Tage ein Regenbogen entstehen kann? — 14. Wie mag es sich erklären, daß die blaue Farbe des Himmels bei klarem Wetter im Sommer, besonders nach einem Regen, dunkler erscheint als im Winter? — 15. Wäre die Luft für alle Sonnenstrahlen vollkommen durchlässig, so müßte der Himmel farblos (schwarz) erscheinen; w.? (Erscheinungen im Hochgebirge.)

§ 111. Absorption des Lichtes. Natürliche Farben der Körper. Fluorescenz. Phosphorescenz. Vergleicht man die Lichtmengen miteinander, welche von den Körpern zurückgeworfen und durchgelassen werden, so ergeben sich mancherlei Unterschiede. Während z. B. ein gegen die Sonne gehaltener Spiegel die Lichtstrahlen ohne merkliche Abnahme der Lichtstärke zurückwirft, verschwindet der Lichtschein vollständig, wenn man den Spiegel durch eine mattschwarze Platte ersetzt. Beide Körper lassen kein Licht durch sich hindurch. Durch farblose Fensterscheiben wird das Tageslicht im Zimmer kaum merklich geschwächt, während farbige Scheiben die Zimmer verdunkeln. Hieraus geht hervor:

Die Körper vermögen das in sie eindringende und von ihnen zurückgehaltene (absorbierte) Licht ganz oder teilweise auszulöschen.

Die meisten Körper, von denen Licht in unser Auge gelangt, erscheinen uns in gewissen Farben. In welcher Farbe uns ein Körper im Tageslichte erscheint, hängt offenbar davon ab, welche von den farbigen Bestandteilen des in ihn eingedrungenen Lichtes ausgelöscht werden, denn nur der nicht ausgelöschte Teil kann, indem er zurückgeworfen oder durchgelassen wird, als Licht in unser Auge gelangen. Geeignete Versuche ergeben nun, daß ein farbiger Körper von dem im Sonnenlichte enthaltenen farbigen Strahlen ungleiche Mengen auslöscht, sodaß also der Farbeindruck durch das Zusammenwirken verschiedener Bestandteile des Lichtes entsteht, ähnlich wie durch verschiedene einfache Töne die Klangfarbe hervorgerufen wird.

Versuch. Läßt man das Sonnenspektrum auf farbiges Papier fallen, oder schaltet man nahe am Prisma eine farbige Glasscheibe in das Strahlenbündel ein, so erscheinen gewisse Farben verdunkelt, andere hell. — Schmale einfarbige Papierstreifen oder dergl. erscheinen auf schwarzem Grunde, durch ein stark brechendes Prisma betrachtet, mehrfarbig.

Die Farbe, welche ein Körper im Tageslichte zeigt, wird seine natürliche Farbe genannt.

Die natürliche Farbe eines Körpers ist durch die von ihm zurückgeworfenen oder durchgelassenen Strahlen bedingt. Die Körperfarben sind Mischfarben, deren Bestandteile das Auge in der natürlichen Farbe nicht zu erkennen vermag.

Ein durchsichtiger Körper erscheint uns im Tageslichte farbig, wenn er nur gewisse Strahlengattungen, farblos, wenn er alle farbigen Bestandteile des Lichtes in gleichem Verhältnisse durchläßt.

Ein undurchsichtiger Körper erscheint weifs, wenn er alle farbigen Bestandteile des Sonnenlichtes in gleichem Verhältnisse unregelmässig zurückwirft, farbig, wenn er nur gewisse Strahlengattungen zurückwirft, schwarz, wenn gar keine Strahlen zurückgeworfen, also alle Strahlen von ihm absorbiert werden.

Grau ist ein lichtschwaches Weifs; es entsteht, wenn der Körper von allen Strahlen des Sonnenlichtes in demselben Verhältnis eine gröfsere Menge absorbiert.

Betrachten wir farbige Körper in verschiedenem Lichte, so zeigt sich die überraschende Erscheinung, dafs die Farben der Körper sich mit dem Lichte ändern. Im gewöhnlichen Lampenlichte z. B. sieht Gelb beinahe wie Weifs aus, Blau wird darin leicht mit Grün verwechselt. Pflanzenblätter erscheinen bei bengalischer Beleuchtung in rotem Lichte beinahe schwarz, in gelbem grau, in grünem wieder grün u. s. w.

***Versuch.** Im vollständig dunklen Zimmer erscheinen die Farben einer Spektraltafel, bunter Bilder, Blumen oder dergl., wenn sie durch eine mit Kochsalzlösung gefärbte Weingeistflamme beleuchtet werden, mehr oder weniger grau; nur die gelbe Farbe verändert sich nicht u. s. w.

Ein Körper kann nur dann in seiner natürlichen Farbe erscheinen, wenn das ihn treffende Licht Strahlen dieser Farbe enthält. Im einfarbigen Lichte verschwinden alle Farbenunterschiede der Körper.

Die tägliche Erfahrung lehrt, dafs dunkle Körper sich im Sonnenlichte stärker erwärmen als helle. (Beispiele!) Da bei solcher Erwärmung Licht durch Absorption verschwindet, so liegt der Gedanke nahe, dafs aus dem vernichteten Lichte Wärme entstanden sein könne. Genaue Versuche lassen schliessen, dafs überall, wo Licht von einem Körper verschluckt wird, eine Verwandlung des absorbierten Lichtes und zwar in den meisten Fällen eine Verwandlung des Lichtes in Wärme stattfindet (vgl. § 146).

Fluorescenz und Phosphorescenz. Gewisse Körper vermögen Licht, das in sie eingedrungen ist, wieder auszustrahlen und zwar manche nur so lange, als die Bestrahlung andauert, andere auch noch nach der Bestrahlung. Zu ersteren gehören insbesondere verschiedene durchsichtige Flüssigkeiten. Petroleum z. B. strahlt im Sonnenlichte ein bläuliches Licht aus, desgl. Wasser, in welchem Rinde von Rofskastanien eine Zeitlang gelegen hat. Wirft man zerkleinerte Pflanzenblätter in Weingeist, so nimmt man in der nach einiger Zeit grün gefärbten Flüssigkeit beim Einfallen von Sonnenstrahlen (Strahlenkegel mittelst Linse) einen

blutroten Schimmer wahr. Das gelbliche Uranglas schimmert bei der gewöhnlichen Tagesbeleuchtung hellgrün, Flußspat blau u. s. w. Diese Körper besitzen die Eigenschaft, das in sie eingedrungene Licht zu verändern und erscheinen demnach im durchgehenden Licht in einer anderen Farbe. *Man bezeichnet diese Erscheinung als Fluorescenz; sie findet nur während der Bestrahlung des Körpers statt.*

Körper, welche noch nach der Bestrahlung fortzuleuchten vermögen, sind z. B. die sogen. Leuchtsteine (Lichtsauger), die dadurch hergestellt werden, daß man alkalische Erden (Kalk, Strontian oder Baryt) mit Schwefel glüht. Dieselben strahlen tagelang ein mattes Licht aus, wenn sie nur kurze Zeit dem Sonnenlichte ausgesetzt waren. Man verwendet sie zur Herstellung von leuchtenden Zifferblättern auf Taschenuhren, zu Feuerzeug-Behältern u. s. w. *Die Erscheinung des Selbstleuchtens eines Körpers nach der Bestrahlung wird Phosphorescenz genannt.*

Bem. Das Leuchten des Phosphors wird durch eine langsame Oxydation, also durch einen chemischen Vorgang hervorgerufen. Faulendes Holz phosphoresciert durch das leuchtende Wurzelgeflecht von Pilzen, welche darin wuchern, während das Leuchten des Meeres durch zahllose mikroskopische Organismen verursacht wird. — Die Fluorescenz hat ihren Namen von dem Mineral Flußspat (Fluorcalcium), die Phosphorescenz vom Phosphor.

Übungsstoff. 1. Welche K. verhalten sich gegen den Schall ähnlich wie undurchsichtige K. gegen das Licht? — 2. Inwiefern kann man sagen, daß wir an farbigen K. nur Reste vom Sonnenlichte erblicken? — 3. Vgl. die Entstehung der Körperfarben und Klangfarben miteinander. — 4. Einfluß auf das Spektrum des Sonnenlichtes, wenn man die Strahlen durch eine farbige Glasscheibe leitet, deren Farbe eine möglichst reine Spektralfarbe ist? — 5. In Wirklichkeit zeigt das Spektrum bei diesem Verfahren stets mehr oder weniger deutlich noch andere Farben; w.? — 6. Wie erklärt es sich, daß die Farbenunterschiede in einfarbigem Lichte verschwinden? — 7. Gegen eine von farbigen Glasstreifen umgebene durchsichtige und farblose Glasscheibe schein die Sonne. Welche Unterschiede werden sich dann zu erkennen geben, wenn man nach längerer Zeit die Hand dagegen hält? Erkl.! — 8. Was läßt sich daraus schließen, daß eine farblose durchsichtige Glasscheibe ebenso wie ein weißer K. sich in der Sonne nach und nach erwärmt? — 9. Wird sich ein mattschwarzer oder ein polierter schwarzer K. in der Sonne schneller erwärmen, u. w.? — 10. Legt man rotes und grünes Glas aufeinander, so ist es fast ganz undurchsichtig; w.? — 11. Unterschied in der Lichtwirkung einer grauen und einer farbigen Schutzbrille? (Einfluß auf die Farbeindrücke!) — 12. Wenn man einen gelben Farbstoff mit einem blauen mischt, so erhält man Grün. Inwiefern ist dies nach § 108 (Versuch e) auffällig, und wie erklärt sich die Abweichung? — 13. Vgl. die Fluorescenz und Phosphorescenz mit der Resonanz und dem Mitklingen.

§ 112. Reines Sonnenspektrum. Spektrum irdischer Körper. Spektralanalyse. Da das Sonnenlicht aus einer großen Anzahl verschiedenfarbiger Strahlen besteht, so muß das Sonnenspektrum aus ebensoviele Bildern zusammengesetzt sein, von denen jedes seine besondere Farbe hat. Diese Sonnenbilder müssen um so mehr übereinander fallen, je größer sie sind und je geringer die Zerstreuung der farbigen Strahlen ist. Man erhält daher nicht die reinen Spektralfarben, wenn man ein Sonnenspektrum nach Anleitung von Fig. 406 darstellt; zu diesem Zwecke muß man vielmehr ein **reines Spektrum** entwerfen, d. h. *ein solches, in welchem die einzelnen Farben nicht übereinander fallen.*

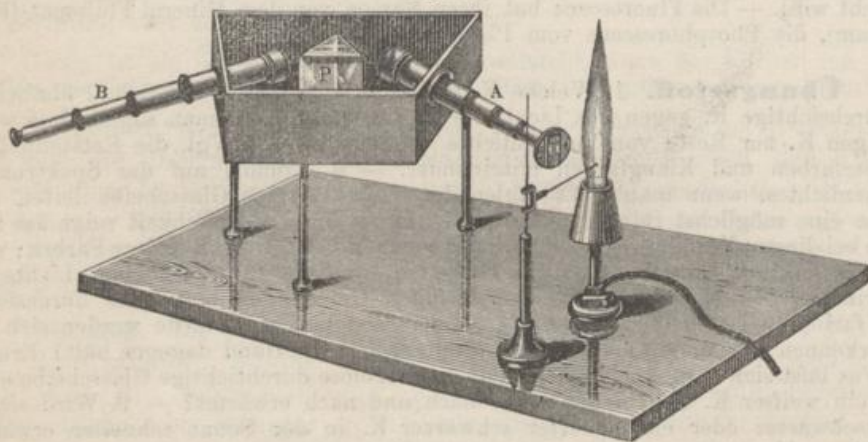
Versuch a. Um ein reines Spektrum zu entwerfen, läßt man die Sonnenstrahlen durch einen schmalen Spalt auf eine Sammellinse fallen,

welche vom Spalt um mehr als ihre Brennweite entfernt ist. Die durch die Linse konvergierend gemachten Strahlen werden durch ein mit seiner brechenden Kante parallel dem Spalt gestelltes Prisma so aufgefangen, daß die Ablenkung am kleinsten ist. Das entstehende Spektrum enthält zahlreiche feine, dem Spalt parallele dunkle Linien, unter denen einige besonders hervortreten (siehe die Spektraltafel, auf welcher die deutlichsten Linien mit den Buchstaben A bis H bezeichnet sind).

Die Entdeckung, daß das reine Sonnenspektrum dunkle Querlinien enthält, wurde 1802 von Wollaston gemacht, Fraunhofer bestimmte diese Linien genau (1814) und erkannte ihre Bedeutung für die Wissenschaft. Nach ihm werden dieselben **Fraunhofersche Linien** genannt.

Zur Untersuchung des Sonnenlichtes, sowie auch des Lichtes anderer Lichtquellen bedient man sich gewöhnlich eines sogen. **Spektralapparates** oder **Spektroskopes** (Fig. 417). Ein solcher Apparat besteht im wesentlichen aus einem oder

Fig. 417.



mehreren *Prismen*, einem *Spaltrohre* und einem *Fernrohre*. Das Prisma (P) ist in einem innen geschwärzten Kasten aufgestellt, in dessen Wandung an zwei einander gegenüberliegenden Stellen das Spaltrohr und das Fernrohr befestigt sind. Das Spaltrohr (A) ist vorn durch eine mit engem Spalt versehene Metallplatte, hinten durch eine Konvexlinse verschlossen, deren Brennpunkt mit dem Spalt zusammenfällt, sodafs die Strahlen, nachdem sie durch die Linse hindurchgegangen sind, eine parallele Richtung haben. — Durch das Fernrohr (B) wird das Spektrum in mäfsiger Vergrößerung betrachtet.

Zur Untersuchung des Lichtes glühender Körper stellt man vor dem Spalt eine nicht leuchtende Flamme (Bunsenbrenner) auf. Ein kleines Stativ dient zum Halten eines Platindrahtes, mit welchem man die zu erhaltenden Körper in die Flamme bringt.

Untersucht man mittelst des Spektroskopes das Licht irdischer Lichtquellen, so ergiebt sich folgendes:

a. Das Licht eines weifsglühenden festen oder flüssigen Körpers (etwa eines glühenden Platindrahtes) erzeugt ein **zusammenhängendes Spektrum**, das alle Farben des Sonnenspektrums enthält.

Das Licht weifsglühender Körper enthält alle Strahlengattungen.

Im Spektrum gelbglühender Körper, wie z. B. der glühenden Kohlentheilchen unserer Flammen, fehlt das blau-violette Ende fast ganz.

b. Das Licht glühender Gase oder Dämpfe erzeugt eine mehr oder minder große Anzahl durch dunkle Zwischenräume voneinander getrennter heller Linien oder Streifen: **Linien- oder Streifen-spektrum.**

In dem Lichte glühender Gase oder Dämpfe fehlen demnach gewisse Strahlengattungen.

Durch Natriumdämpfe z. B. entsteht eine sehr helle gelbe, durch Lithiumdämpfe eine deutliche rote und eine schwache orangefarbige Linie; das Spektrum der Kaliumdämpfe enthält eine rote und eine violette Linie (siehe die Spektraltafel). Wasserstoff zeigt eine rote und zwei blaue Linien. Das Spektrum des Sauerstoffes und des Stickstoffes ist aus einer größeren Anzahl farbiger Linien zusammengesetzt. Bei Dämpfen von schweren Metallen, z. B. Eisendämpfen, beläuft sich die Anzahl der farbigen Linien auf mehrere Hundert.

Da jeder Stoff im Spektrum bestimmte Linien giebt, welche stets an derselben Stelle erscheinen, so ist man imstande, aus dem Auftreten bestimmter Spektrallinien auf das Vorhandensein gewisser Stoffe zu schließen und zwar genügt eine verschwindend kleine Menge des betreffenden Stoffes zur Hervorbringung der charakteristischen Linien ($\frac{1}{1000000}$ mg Natrium oder $\frac{1}{1000000}$ mg Lithium ist spektroskopisch noch nachweisbar). Man kann demnach die chemischen Bestandteile verbrennender Körper durch Untersuchung ihres Spektrums erforschen. Dieses von Bunsen und Kirchhoff (1860) erfundene Verfahren führt den Namen **Spektralanalyse**. Durch dasselbe sind verschiedene vorher unbekannte chemische Grundstoffe entdeckt worden, so von Bunsen selbst das Cäsium und Rubidium (siehe die Spektraltafel) und von anderen Forschern das Thallium, Indium und Gallium.

c. Leitet man das Licht eines weißglühenden Körpers durch das Licht glühender Gase oder Dämpfe, so werden die Strahlen derjenigen Farben absorbiert, welche die Gase oder Dämpfe selbst besitzen. Dadurch entstehen dunkle Linien in dem sonst zusammenhängenden Spektrum an denselben Stellen, an denen durch das Gas oder den Dampf allein farbige Linien entstehen würden: *Umkehrung der Spektrallinien*. Ein derartiges Spektrum heißt **Absorptionsspektrum**.

Durch glühende Gase oder Dämpfe werden diejenigen Lichtstrahlen absorbiert, welche die Gase und Dämpfe selbst auszustrahlen vermögen.

Geht weißes Licht z. B. durch glühende Natriumdämpfe, so entsteht an Stelle der hellen Natriumlinie eine dunkle Linie; nach Entfernung des weißen Lichtes erscheint diese Linie wieder farbig u. s. w.

Dafs bei der Umkehrung der Spektrallinien die sonst farbigen Linien dunkel erscheinen, hat nicht in einem vollständigen Fehlen des Lichtes, sondern nur in einem Mangel an Lichtstärke seinen Grund. Das Licht des glühenden Gases oder Dampfes nimmt nämlich durch den scheinbar ausgelöschten Teil des weißen Lichtes in Wirklichkeit an Stärke zu, ohne jedoch dadurch die Lichtstärke des weißglühenden Körpers selbst zu erreichen. Die dunklen Linien sind demnach farbige Schatten einer schwachen Lichtquelle auf sehr hellem Grunde, welche unser Auge als solches nicht zu erkennen vermag (Kontrastwirkung). Verwandte Erscheinung: Schatten einer Kerzenflamme auf weißer Wand in direktem Sonnenlichte.

Absorptionsspektralanalyse. Wenn beim Durchgange von allfarbigem Lichte durch feste oder flüssige Körper gewisse Strahlen absorbiert werden, so fehlen dieselben in dem Spektrum, welches also ebenfalls ein Absorptionsspektrum mit dunklen Absorptionsstreifen ist. Diese letzteren sind abhängig von der chemischen Beschaffenheit des absorbierenden Stoffes, welche demnach mittelst des Spektroskopes festgestellt werden kann (Untersuchung von Farbstoffen und Nahrungs-

mitteln; Nachweis geringer Mengen von Blut durch die dem Blut eigentümlichen Absorptionsstreifen, Anwendung dieser Methode in der gerichtlichen Medizin.

Anwendung der Spektralanalyse auf die Himmelskörper. Bedeutung der Fraunhoferschen Linien. Da nach den sorgfältigsten Beobachtungen gewisse dunkle Linien im Sonnenspektrum genau an denselben Stellen liegen, an denen im Spektrum weißglühender Körper, wenn man das Licht derselben durch bestimmte Gase oder Dämpfe leitet, dunkle Linien entstehen, so ist man zu dem Schlusse gelangt, daß auch das Licht der Sonne durch glühende gasförmige Stoffe hindurchgeht und auf diesem Wege einen Teil seiner Strahlen durch Absorption verliert. Hieraus haben sich folgende Schlüsse über die Beschaffenheit des Sonnenkörpers ergeben:

Die Sonne ist ein in Weißglut befindlicher Himmelskörper, der von einer aus glühenden Gasen und Dämpfen bestehenden Atmosphäre umgeben ist. — Die Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums sind die Absorptionslinien der Gase und Dämpfe.

Nach den spektroskopischen Untersuchungen besteht die Sonnen-Atmosphäre hauptsächlich aus brennendem Wasserstoff und aus glühenden Dämpfen von Eisen und verschiedenen anderen Metallen (Natrium, Magnesium). Bei totalen Sonnenfinsternissen erscheint sie als schwach leuchtender Ring, in welchen rötlich gefärbte, wolkenartige Gebilde (Protuberanzen) hineinragen, deren Form und Größe häufig wechselt. Durch direkte Beobachtung der mit Hilfe besonderer Spektroskope täglich wahrnehmbaren Protuberanzen und der durch dieselben entstehenden farbigen Spektrallinie ist die Richtigkeit der obigen Annahme bestätigt worden.

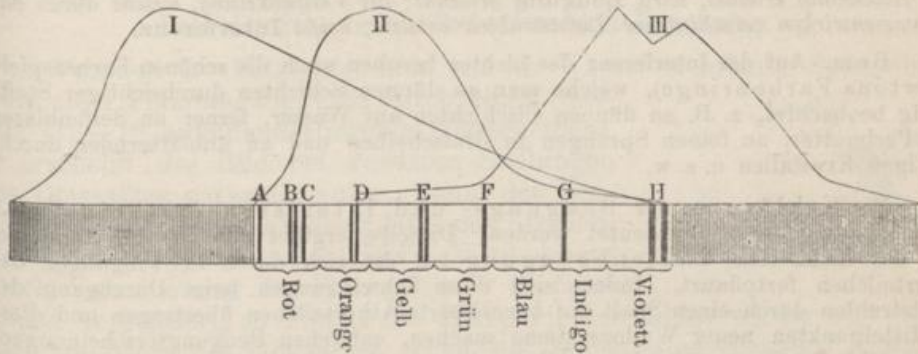
Die Fixsterne haben ein dem Sonnenspektrum ähnliches Spektrum, sind also auch von derselben physikalischen Beschaffenheit, wie die Sonne. Das Spektrum der Planeten ist dem der Sonne gleich (Absorptionsstreifen). Manche Nebelflecke zeigen ein aus hellen Linien bestehendes Spektrum, woraus geschlossen werden muß, daß sie sich nicht in Sterne auflösen lassen. Der Kern der Kometen zeigt ein Linienspektrum, der Schweif das Spektrum des Sonnenlichtes.

Bem. Aus gewissen Verschiebungen der Spektrallinien läßt sich (nach dem Dopplerschen Princip, § 92) auf eine Annäherung oder Entfernung der Lichtquelle schließen und auf diese Weise die Bewegung und Geschwindigkeit der Fixsterne berechnen.

Übungsstoff. 1. Wenn man bei der Erzeugung des Sonnenspektrums die Strahlen durch eine kreisförmige Öffnung eintreten läßt und den Schirm mehr und mehr dem Prisma nähert, so erhält man schließlich einen Lichtstreifen, welcher in der Mitte weiß und nur an den Enden farbig ist. Erkl.! — 2. Welchen Einfluss muß die Vergrößerung dieses Abstandes a. auf die Reinheit, b. auf die Lichtstärke des Spektrums ausüben? — 3. Warum muß beim Spektroskope der Spalt um die Brennweite von der Linse entfernt sein? — 4. Vgl. W. und Schwefelkohlenstoff hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als lichtbrechende Substanz zu spektroskopischen Untersuchungen. — 5. Wie läßt sich durch gleichzeitige Anwendung mehrerer Prismen erreichen, daß die Spektrallinien weiter auseinanderfallen? (Anordnung der Prismen!) — 6. Was für ein Spektrum muß entstehen, wenn das Licht eines weißglühenden Platindrahtes a. durch Natrium-, b. durch Lithium-, c. durch Kaliumdämpfe geht? Erkl.! — 7. Die Erdatmosphäre (Wasserdampf) absorbiert die ultravioletten Strahlen ziemlich stark. Welchen Einfluss muß dies auf die Beschaffenheit des Sonnenspektrums ausüben, je nachdem die Beobachtung früh morgens, mittags oder spät nachmittags angestellt wird? — 8. Das Spektrum des Mondlichtes stimmt mit dem des Sonnenlichtes genau überein; w.? — 9. Angenommen, eine einzelne dunkle Linie oder eine Gruppe zusammengehöriger dunkler Linien verschwände im Laufe der Zeit im Sonnenspektrum. Was würde man daraus schließen können? — 10. Durch das Spektroskop lassen sich in der Luft stets Spuren von Kochsalz nachweisen. Welche allgemeine Eigenschaft der K. tritt hierdurch auffällig hervor?

§ 113. Wirkungen farbiger Strahlen. Beugung und Interferenz. Die Betrachtung des Spektrums lehrt, daß nicht alle Spektralfarben gleiche Leuchtkraft haben. *Am hellsten erscheint uns der gelbe, am dunkelsten der violette Teil desselben.* Linie II, Fig. 418,

Fig. 418.



gibt die Größe der leuchtenden Kraft der einzelnen Strahlengattungen an. In dem Maße, wie diese Linie vom Spektrum auf- und absteigt, nimmt die leuchtende Kraft zu und ab.

Wird ein sehr empfindliches Thermoskop oder Thermometer in die verschiedenen Teile des Spektrums gebracht, so ist wahrzunehmen, daß die **Wärmewirkung vom Violett bis über das Rot hinaus allmählich zunimmt, also am größten jenseits des roten Endes ist, wo das Auge keine Farbe mehr sieht, von da ab aber schnell wieder abnimmt** (Linie I).

Läßt man die durch das Prisma zerstreuten Strahlen im dunklen Zimmer auf photographisches Papier fallen, so giebt sich durch das Braunwerden des Papiers eine **chemische Wirkung** zu erkennen, *welche im Gelb beginnt und sich bis über das Violett hinaus fortsetzt; im Violett ist dieselbe am stärksten* (Linie III, *welche zugleich zeigt, daß die chemischen Strahlen zwei Maxima haben*).

Auf der chemischen Wirkung des Lichtes beruht die Photographie (§ 105). Man pflegt die Strahlen, welche diese Wirkung hervorbringen, **chemische Strahlen** zu nennen, obgleich diejenige chemische Wirkung, welche in der Natur und zwar für das Pflanzenwachstum von hervorragendster Bedeutung ist, namentlich von den Strahlen ausgeht, welche die größte Leuchtkraft haben. Diese Wirkung besteht in der Bildung von organischer Substanz aus Kohlensäure und Wasser und vollzieht sich in den grünen Zellen der Pflanzen (Assimilation).

Beugung und Interferenz. Lichterscheinungen besonderer Art zeigen sich, wenn man die Sonne oder ein sehr helles Licht durch ein möglichst feines Gitter von gewebtem Zeug oder durch den Bart einer Vogelfeder betrachtet. Diese Erscheinungen kennzeichnen sich dadurch, daß in verschiedener Anordnung zahlreiche Spektren entstehen, in denen dunkle mit hellen Linien abwechseln. Fig. 419 zeigt eine derartige Erscheinung, dadurch hervorgerufen, daß man durch zwei in einiger Entfernung voneinander befindliche enge Spalte Licht in ein dunkles Zimmer fallen läßt. Ohne Anwendung eines Prismas entsteht auf einem dem Spalte gegenüber befindlichen weißen Schirm ein heller Streifen, welcher breiter ist, als er nach der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes sein dürfte. Zu beiden Seiten des Licht-

Fig. 419.



Zu beiden Seiten des Licht-

streifens wechseln bei Anwendung von einfarbigem Lichte Streifen von geringerer Helligkeit und dunkle Streifen miteinander ab, während weißes Licht (Sonnenlicht) jederseits eine Reihe farbiger Spektren erzeugt, deren Lichtstärke mit der Entfernung vom mittleren Streifen schnell abnimmt.

Die Erscheinung, daßs Licht an den Rändern eines undurchsichtigen Körpers eine Ablenkung erleidet, wird Beugung genannt; die Verdunkelung, welche durch das Zusammenwirken verschiedener Lichtstrahlen entsteht, heißt Interferenz.

Bem. Auf der Interferenz des Lichtes beruhen auch die schönen Farbenspiele (Newtons Farbenringe), welche man an dünnen Schichten durchsichtiger Stoffe häufig beobachtet, z. B. an dünnen Ölschichten auf Wasser, ferner an Seifenblasen und Perlmutter, an feinen Sprüngen in Glasscheiben und an abblätternden durchsichtigen Krystallen u. s. w.

Die Erklärung der Beugungs- und Interferenzerscheinungen kann hier nur kurz angedeutet werden. Dieselbe ergibt sich aus der Annahme, daßs das Licht eine Wellenbewegung ist, die sich durch Schwingungen der Ätherteilchen fortpflanzt. Indem sich diese Schwingungen beim Durchgang der Lichtstrahlen durch einen Spalt auf benachbarte Ätherteilchen übertragen und diese zu Mittelpunkten neuer Wellensysteme machen, entstehen Beugungserscheinungen; die Durchkreuzung verschiedener Ätherwellen, sowie die Reflexion derselben an der vorderen und hinteren Grenzfläche einer dünnen Schicht eines durchsichtigen Körpers bringt Interferenzerscheinungen hervor (vergl. § 146).

Übungsstoff. 1. Inwiefern kann man sagen, daßs das menschliche Auge nur für die Wahrnehmung gewisser im Sonnenlichte enthaltenen Strahlen eingerichtet ist? — 2. Wie erklärt es sich, daßs blühende Rapsfelder auf weit größere Entfernung hin leuchten als andere Felder? — 3. Wie muß in einem photographierten Sonnenspektrum Hell und Dunkel verteilt sein? — 4. Rote und gelbe Kleidungsstücke werden beim Photographieren fast immer dunkel, blaue und violette dagegen hell; w.? — 5. Wie müssen glanzlose grüne Blätter auf Photographien aussehen? (Photographien von Landschaften.) — 6. Warum läßt sich die photographische Wirkung der Körperfarben nach dem Spektrum nicht sicher beurteilen? — 7. Bei welcher Farbe ist nach Fig. 418 sowohl die Licht- als auch die Wärmewirkung ziemlich groß? — 8. Bei welchen Farben sind diese Wirkungen sehr gering? — 9. Warum dürfen die Fensterscheiben in dem Raume, in welchem der Photograph die Platte präpariert, nicht aus gewöhnlichem Glase bestehen? — 10. Angenommen, man legte schmale Streifen von scheinbar einfarbigen Zeugstoffen auf eine schwarze Unterlage und betrachtete dieselben durch ein Prisma. Wie liefse sich dadurch die photographische Wirkung der Farben annähernd ermitteln? — 11. Wie ist es zu erklären, daßs verschiedene lichtschwache Planeten und Nebelflecke mittelst der Photographie überhaupt erst entdeckt worden sind?

E. Polarisation und Doppelbrechung.

§ 114. Die Veränderungen, welche Lichtstrahlen durch die von ihnen getroffenen Körper erleiden, sind im wesentlichen folgende: 1. eine *Richtungsänderung* (Zurückwerfung und Brechung), wobei je nach der Art dieser Änderung und nach der Beschaffenheit des Lichtes eine Zerlegung desselben in seine elementaren Bestandteile (Farbenzerstreuung) eintreten kann; 2. eine *Umwandlung in Wärme*, wenn der vom Lichte getroffene Körper die eingedrungenen Strahlen ganz oder teilweise auslöscht (Absorption). — Die Zurückwerfung und Brechung der Lichtstrahlen erfolgt nach den früher erläuterten Gesetzen, denen die gewöhnlichen Strahlen ausnahmslos unterworfen sind. Unter Umständen kann jedoch Licht durch einmalige Reflexion oder Brechung besondere Eigenschaften

erhalten, derart z. B., daß es sich bei einer zweiten Reflexion anders verhält wie gewöhnliches Licht. Man nennt solches Licht *polarisiert*, und bezeichnet die *Polarisation* desselben als vollkommen oder unvollkommen, je nachdem es diese besonderen Eigenschaften in höherem oder geringerem Grade angenommen hat.

Polarisation durch Reflexion und Brechung.

Versuch a. Betrachtet man ein im Wasser sichtbares Spiegelbild (Bild einer Flamme, Fig. 420) durch einen Glassatz (12–15 aufeinanderliegende Glasscheiben), so erscheint das Bild bei gewissen Stellungen des Glassatzes ausgelöscht, wenn der Einfallswinkel der auf das Wasser fallenden Strahlen eine bestimmte Größe hat (53°). Wird darauf durch Verschiebung der Flamme jener Einfallswinkel vergrößert, so nimmt die Helligkeit des Bildes wieder zu, wenn auch die Lage des Glassatzes gegen die reflektierten Strahlen dieselbe bleibt. — In ähnlicher Weise wirken auch andere (nicht metallische) spiegelnde Flächen.

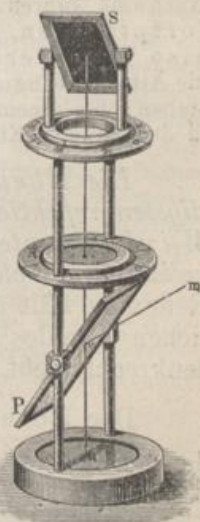
Fig. 420.



Hieraus folgt, daß *reflektiertes* Licht unter gewissen Bedingungen durch einen durchsichtigen Körper nicht hindurchgeht. Eine solche Eigentümlichkeit des Lichtes kann auch durch *Brechung* und *Absorption* hervorgerufen werden.

Versuch b. Dünne Platten von Turmalin, einem Mineral von bräunlich-grüner Färbung, sind hierzu besonders geeignet. Läßt man Licht durch eine Turmalinplatte gehen, so nimmt es infolge der stattfindenden Absorption die Farbe des Krystalles an, zeigt aber im übrigen zunächst keine weitere Veränderung. Wenn man aber zwei Turmalinplatten aufeinander legt und die eine derselben über der anderen dreht, so wird das Licht bei bestimmter Stellung ganz hindurchgelassen und bei anderer Stellung ausgelöscht. Die beiden Stellungen, bei welchen die größte Helligkeit und Dunkelheit miteinander wechseln, werden durch Drehung der Platte um 90° erhalten. Der Lichtstrahl wird beim Durchgang durch die erste Platte polarisiert und von der zweiten Platte nur dann durchgelassen, wenn ihre Krystallachse mit der der ersten parallel ist.

Fig. 421.



Jede Vorrichtung, welche dazu dient, das Licht zu polarisieren, kann auch dazu benutzt werden, durchsichtige Gegenstände im polarisierten Licht zu untersuchen. Eine sehr zweckmäßige Form eines solchen Apparates zeigt Fig. 421: den **Polarisationsapparat von Nörremberg**. Die wesentlichsten Teile desselben sind die Spiegelglasplatte P, welche den Lichtstrahl durch Reflexion polarisiert (*Polarisator*), und der aus schwarzem Glas bestehende Spiegel S, welcher den polarisierten Strahl nach der Reflexion vom Spiegel n abermals reflektiert und dadurch zerlegt (*Analysator*).

Versuch c. Läßt man auf die Glasplatte P unter einem Einfallswinkel von annähernd 55° (genau $54^\circ 35'$) Licht von einer Kerzenflamme fallen, so ist das Bild

der Flamme im Spiegel S deutlich sichtbar, wenn Spiegel und Glasplatte parallel sind, die Reflexionsebene (mon) der Platte und die des Spiegels S also zusammenfallen. Dreht man aber den Spiegel um die Richtung des einfallenden Strahles als Achse, sodafs der Einfallswinkel während der Drehung unverändert bleibt, so nimmt die Helligkeit des Gesichtsfeldes solange ab, bis die Reflexionsebenen beider Platten sich rechtwinklig kreuzen (siehe die Figur). In dieser Lage erscheint das Licht vom Spiegel ausgelöscht. Dreht man den Spiegel weiter, so wird das Gesichtsfeld wieder hell; es erreicht seine grösste Helligkeit, wenn die Reflexionsebenen wieder zusammenfallen. Dieser Wechsel in der Helligkeit wiederholt sich, so oft man den Spiegel in derselben Richtung um 90° dreht. War das Gesichtsfeld ursprünglich hell, so wird es demnach bei fortgesetzter Drehung um 90° , 180° , 270° und 360° zunächst dunkel, darauf wieder hell, dann noch einmal dunkel und zuletzt wieder hell.

Licht läfst sich durch Reflexion und durch Brechung so verändern, dafs es sich nach verschiedenen Seiten verschieden verhält, also nicht mehr wie gewöhnliches Licht von einem Körper in jeder Lage desselben zurückgeworfen oder durchgelassen werden kann: **Polarisiertes Licht.**

Strahlen, welche durch Reflexion polarisiert sind, werden nach Versuch c vollständig zurückgeworfen, wenn die zweite Reflexionsebene mit der ersten zusammenfällt, hingegen vollständig ausgelöscht, wenn die beiden Reflexionsebenen eine rechtwinklig gekreuzte Stellung gegeneinander einnehmen. Ist der Einfallswinkel gröfser oder kleiner, so findet nur eine unvollständige Auslöschung der Strahlen statt. Die Strahlen werden im ersteren Falle vollständig, im letzteren unvollständig polarisiert.

Die Erklärung der Polarisationserscheinungen geht wie die der Beugungs- und Interferenzerscheinungen von der Annahme aus, dafs das Licht eine Wellenbewegung ist. Mit Hilfe der Polarisationserscheinungen läfst sich der Nachweis führen, dafs die Schwingungen, welche den Lichtstrahl fortpflanzen, rechtwinklig zur Richtung desselben erfolgen und also Transversalwellen sind. Bei einem gewöhnlichen Lichtstrahl erfolgen die Ätherschwingungen in allen Ebenen, die auf der Fortpflanzungsrichtung senkrecht stehen; bei einem polarisierten Strahl nur in einer Ebene, da die Schwingungen in den anderen Ebenen eben durch die Polarisation aufgehoben werden (vergl. § 146).

*Die Ebene, in welcher ein polarisierter Lichtstrahl am vollständigsten reflektiert wird, heifst die **Polarisationsebene des Strahles**, der **Winkel**, unter welchem Lichtstrahlen auffallen müssen, damit eine vollständige Polarisation eintreten kann, **Polarisationswinkel**.* — Bei der Reflexion fällt die Polarisationsebene mit der Einfallsebene des gewöhnlichen Strahles zusammen, während sie bei der Brechung auf derselben senkrecht steht. — Durch genaue Versuche hat man gefunden:

Der Polarisationswinkel ist für verschiedene Stoffe verschieden; er wächst mit dem Brechungsexponenten und ist derjenige Winkel, für welchen der reflektierte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht.

Der Polarisationswinkel beträgt für Wasser 53° , für Glas 55° , für Schwefelkohlenstoff 59° . — Wenn der von einem durchsichtigen Körper zurückgeworfene Strahl vollständig polarisiert ist, so erscheint der gebrochene nur unvollständig polarisiert und zwar in einer Ebene, welche auf der Brechungsebene senkrecht steht. Doch läßt sich die Polarisation durch wiederholte Brechung vervollständigen (Anwendung mehrerer Glasplatten, Fig. 420). — Das Tageslicht ist meist mehr oder weniger polarisiert, so z. B. das Licht des blauen Himmels (am stärksten 90° vom Sonnenstande entfernt) und das von Gewässern zurückgeworfene Licht. Auch das von glatten Gegenständen, wie z. B. von Tischen, Fenstern u. s. w. zurückgeworfene Licht ist teilweise polarisiert. Das Licht weißer, mächtig erleuchteter Wolken ist dagegen nicht polarisiert. Durch Metallspiegel wird das Licht nur sehr unvollständig polarisiert.

Polarisation durch Doppelbrechung.

Das beste Mittel zur Polarisierung des Lichtes bietet die Doppelbrechung. Alle durchsichtigen Krystalle, welche nicht dem regulären Krystallsystem angehören, z. B. der Kalkspat, haben die Eigenschaft, Lichtstrahlen, welche durch sie hindurchgehen, im allgemeinen in zwei Strahlen zu spalten, sodafs die durch sie betrachteten Gegenstände doppelt erscheinen (Fig. 422).

Beide Strahlen sind vollständig polarisiert. Bei jedem derartigen Krystalle giebt es wenigstens eine Richtung, in der eine solche Spaltung der Strahlen nicht eintritt: beim Kalkspat in der Richtung seiner Hauptachse (Gerade, welche die beiden Ecken verbindet, in denen 3 stumpfe Winkel zusammenstoßen). Jede solche Richtung wird optische Achse genannt. Gegenstände, welche in dieser Richtung durch den Krystall betrachtet werden, erscheinen einfach.

Fig. 422.



Für den praktischen Gebrauch eignen sich besonders die schönen Krystalle des sogen. isländischen Doppelspates, welche man paarweise so zu einem Prisma zusammensetzt, daß sie nur einen der beiden polarisierten Lichtstrahlen durchlassen (Nicolsches Prisma). Bei Untersuchungen des polarisierten Lichtes wird ein solches Prisma als polarisierende, ein anderes als analysierende Vorrichtung anstatt des Spiegels S in Fig. 421) angewandt.

Chromatische Polarisation. Drehung der Polarisationssebene. Wenn polarisiertes Licht durch dünne Blättchen von Glimmer-, Gips- oder anderen Krystallen hindurchgeht und durch eine analysierende Vorrichtung betrachtet wird, so erscheinen die an sich farblosen Krystalle mit prachtvollen Farbenringen, welche beim Drehen des Analysators in andere Farben übergehen. Man erklärt diese Farbenerscheinungen durch die Interferenz des polarisierten Lichtes. Dieselben sind nicht nur für die theoretischen Vorstellungen vom Wesen des Lichtes von großer Bedeutung, sondern auch von unmittelbar praktischer Wichtigkeit. Es haben nämlich einige Krystalle (z. B. Quarze) und verschiedene Flüssigkeiten die merkwürdige Eigenschaft, die *Polarisationsebene zu drehen*, d. h. bei bestimmter Drehung des Analysators gewisse Farben zu erzeugen. Hierauf beruht die Anwendung der Polarisation zur Bestimmung des Zuckergehaltes der Rübensäfte. Die zu diesem Zwecke erfundenen Vorrichtungen heißen *Saccharometer* (Zuckermesser) und beruhen im wesentlichen darauf, daß polarisiertes Licht durch die in einer Glasröhre enthaltene Zuckerlösung hindurchgeht und durch einen Analysator betrachtet wird. Aus dem für eine gewisse Farbenerscheinung erforderlichen Drehungswinkel läßt sich der Zuckergehalt der Lösung unmittelbar bestimmen.

Übungsstoff. 1. Inwiefern hängt es von der Stellung des Beobachters ab, ob die in einem Gewässer am Ufer sichtbaren Spiegelbilder die in Versuch a angegebenen Erschn. zeigen? — 2. In welcher Weise läßt sich eine glänzend

schwarze Schultafel von demselben Standpunkte aus so betrachten, daß sie ihren Glanz verliert und wieder erhält? — 3. Warum läßt sich an Körpern, welche das Licht unregelmäßig zurückwerfen, bei einer derartigen Betrachtung ein Unterschied in der Helligkeit kaum wahrnehmen? — 4. Der Glanz eines Wasserspiegels erscheint, durch ein Nicolsches Prisma oder einen Glassatz betrachtet, bei der Drehung desselben abwechselnd matt und wieder heller, während die im W. befindlichen Gegenstände immer gleichdeutlich erscheinen. Erkl.! — 5. Bedeckt man ein bedrucktes Papierblatt mit einer Glasscheibe, so kann man die Schrift nicht lesen, wenn man sich so stellt, daß das vom Glase reflektierte Licht ins Auge fällt. Dreht man aber eine Turmalinplatte vor dem Auge, so erscheint bei bestimmter Lage derselben die Schrift wieder ganz klar. W.? — 6. Wird ein Regenbogen an Schönheit verlieren, wenn man ihn durch ein Nicolsches Prisma betrachtet?

V. Abschnitt.

Die Lehre von der Wärme.

(I. Lehrstufe, §§ 30—36.)

A. Wirkungen der Wärme.

(Siehe §§ 30—33.)

§ 115. Ausdehnung durch Wärme. Der Ausdehnung der Körper wirkt im allgemeinen zweierlei entgegen: bei festen und flüssigen Körpern (von innen) die Kohäsion und bei allen Körpern (von außen) der Druck der atmosphärischen Luft. Hiernach wird es erklärlich, daß sich am stärksten die luftförmigen Körper ausdehnen (§ 30) und die festen bei gleicher Temperaturerhöhung weniger stark als die Flüssigkeiten; inwiefern? — Da nun die flüssigen und festen Körper hinsichtlich der Kohäsion untereinander verschieden sind, so ist zu erwarten, daß auch ihre Ausdehnung bei gleicher Erwärmung verschieden sein wird. Diese Unterschiede sind bei den festen Körpern im allgemeinen sehr gering (am größten bei den Metallen), und es bedarf deshalb besonderer Vorrichtungen, um sie zur Anschauung zu bringen. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß man Stäbe, welche an einem Ende befestigt sind und am anderen Ende auf einen hebelartigen Zeiger einwirken (sogen. Hebelpyrometer) zunächst durch schmelzendes Eis bis auf 0° abkühlt und darauf durch kochendes Wasser bis auf 100° C erhitzt. Zum Nachweis der ungleichen Ausdehnung läßt sich auch folgendes Verfahren anwenden:

Versuch. Ein Eisen- und ein Zink- oder Messingstab von 30—40 cm Länge und etwa 1 cm Dicke sind mit ihrem einen Ende nebeneinander in einem Klotze befestigt, während die freien Enden einem anderen Klotze fest aufliegen (Fig. 423, folg. Seite). Klemmt man dann unter jedes der beiden freien Enden den kurzen Schenkel eines dünnen, rechtwinklig umgebogenen Messing- oder Aluminiumdrahtes, sodafs dessen