C. Optik.

Die Optik, die Lehre vom Lichte, zerfällt in zwei Teile.

1. Wir betrachten einen gegebenen Lichtstrahl und untersuchen seine Eigenschaften und die Veränderungen, die er erfährt, wenn er auf andere Körper trifft und an ihnen reflektiert oder gebrochen wird und wenn er mit einem anderen, von derselben Lichtquelle ausgegangenen Strahl sich schneidet. Dabei kommen in Betracht: Fortpflanzungsgeschwindigkeit, Helligkeit, Reflexion, Brechung, Polarisation, Beugung, Interferenz, Doppelbrechung, Drehung der Polarisationsebene.

2. Wir untersuchen a) die Erscheinungen der Lichtemission, den Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit eines Lichtstrahles und der Natur des Körpers, der ihn aussendet; b) die Erscheinungen der Lichtabsorption und den Zusammenhang zwischen ihr und der Konstitution des absorbierenden Körpers: Spektralanalyse.

Die beiden Gebiete greifen mannigfach ineinander.

In der chemischen Optik werden die Beziehungen zwischen den optischen und chemischen Eigenschaften der Körper behandelt.

Für das Wesen des Lichtes ist jetzt allgemein die „elektromagnetische Theorie“ angenommen (aufgestellt von Maxwell, 1831 bis 1879, 1864 u. 1873, experimentell begründet von Hertz, 1857 bis 1894). Alle Medien zeigen eine gewisse elektrische Polarisierbarkeit (gemessen durch die Dielektrizitätskonstante ε [*D. C.*]) und eine sie kennzeichnende magnetische Polarisierbarkeit (gemessen durch die Permeabilität μ, s. weiter unten). Wenn diese Zustände der Polarisation zeitliche Änderungen an einer Stelle des Mediums erfahren, so pflanzen sich diese Änderungen wellenartig nach allen Seiten hin fort mit einer Geschwindigkeit, welche durch die Werte von ε und μ bestimmt ist. Wiederholen sich die Änderungen periodisch, haben wir also eine sogenannte elektromagnetische Schwingung als erregenden Vorgang, so breiten sich die Zustandsänderungen ganz ähnlich aus wie die Wellen auf einer an einer Stelle periodisch erregten Wasseroberfläche; wir erhalten „elektromagnetische Wellen“.

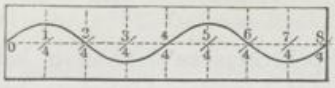
Die Polarisationen haben immer eine bestimmte Richtung; in dem elektromagnetischen Wellenzuge stehen sie beide senkrecht zur Richtung des Strahles, und zwar steht die Richtung der elektrischen Polari-

sation in jedem Augenblicke und in jedem Punkte senkrecht zu derjenigen der magnetischen Polarisation.

Die Schwingungen sind also transversal im Gegensatz zu denen des Schalles, die in der Richtung der Fortpflanzung stattfinden, also longitudinal sind.

Eine transversale Wellenbewegung, die in einer Ebene erfolgt, stellt Fig. 129 dar.

Fig. 129.



Während eines Hin- und Herganges eines Teilchens im Punkte 0, also während der Schwingungsdauer T, pflanzt sich die Wellenbewegung um die Wellenlänge λ fort, in der Figur z. B. von dem mit 0 bezeichneten Punkte bis zu dem mit 4/4 bezeichneten; die Strecke 0 bis 2/4 ist eine halbe Wellenlänge. Die Lichtgeschwindigkeit v ist die Strecke, um welche sich die Lichtwellenbewegung während einer Sekunde fortpflanzt. Ist z die Zahl der Schwingungen in der Sekunde, die Schwingungszahl, so bestehen folgende Beziehungen, vgl. auch S. 138:

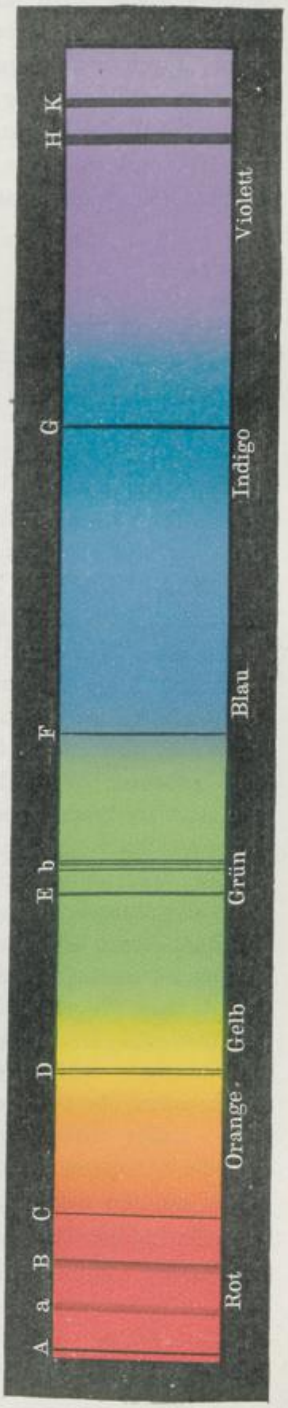
$$z = 1/T; \quad v = z\lambda = \lambda/T;$$
$$\lambda = vT = v/z.$$

Die Lichtgeschwindigkeit v ist im luftleeren Raume für Strahlen von jeder Schwingungsdauer gleich und beträgt sehr nahe 300000 km/sec. $= 3.10^{10}$ cm/sec. In materiellen Körpern ist dieselbe fast stets kleiner als im Vakuum und für Strahlen von verschiedener Schwingungsdauer verschieden; sie ist um so kleiner, je größer der Brechungsindex (S. 250) ist.

Durch die Amplitude, die Schwingungsweite, und zwar deren Quadrat ist die Intensität, durch die Schwingungsdauer T ist die Farbe des Lichtes bestimmt, wie in der Akustik durch die entsprechenden Größen die Tonstärke und die Tonhöhe.

Strahlen, welche nur Schwingungen einer

Fig. 130.



einzigen Schwingungszahl enthalten, liefern „homogenes“ Licht; jedes andere Licht wird als unhomogenes oder gemischtes Licht bezeichnet. Unhomogenes Licht ist z. B. das weiße Licht; dasselbe wird durch ein Prisma usw. in seine Bestandteile zerlegt, die das Spektrum bilden (Fig. 130, a. v. S.).

Die Wellenlängen λ in Milliontel Millimetern ($1\,\mu\mu = 10^{-6}$ mm $= 10^{-7}$ cm) und die Schwingungszahlen z sind für die verschiedenen Farben des Spektrums im Mittel:

Rot	$\lambda = 683\,\mu\mu$	$z = 437$ Bill.	Blau	$\lambda = 473\,\mu\mu$	$z = 631$ Bill.
Orange	615	485	Indigo	439	679
Gelb	559	534	Violett	410	728
Grün	512	582			

Um die einzelnen Teile des Spektrums zu definieren, benutzt man die mit großen und kleinen Buchstaben des Alphabets bezeichneten dunklen Linien von Fraunhofer (1787 bis 1828, 1814/15) (vgl. Fig. 130) des Sonnenspektums, oder die hellen, von leuchtenden Gasen gelieferten Linien. Besonders werden hierzu verwendet (vgl. Fig. 130):

Die Wasserstofflinien $H_\alpha = C$, $\lambda = 656{,}3$; $H_\beta = F$, $\lambda = 486{,}1$; $H_\gamma \lambda = 434{,}0$; $H_\delta = h$, $\lambda = 410{,}3$. Die gelbe Natriumlinie D, $\lambda = 589{,}3$. Die rote Lithiumlinie $\lambda = 670{,}8$, die grüne Thalliumlinie $\lambda = 535{,}0$. Die blaue Strontiumlinie $\lambda = 460{,}7$. Im Ultraviolett Cadmium-, Zink- und Aluminiumlinien.

Das Auge empfindet als Licht nur Schwingungen, deren Wellenlängen etwa zwischen 820 und 373 $\mu\mu$, deren Schwingungszahlen etwa zwischen 366 und 804 Billionen pro Sekunde liegen; Ätherschwingungen mit größerer Wellenlänge als 820 $\mu\mu$ bezeichnet man als infrarot, sie sind im Sonnenspektrum besonders durch starke Wärmewirkungen ausgezeichnet; die Schwingungen mit kürzerer Wellenlänge als 373 $\mu\mu$ heißen ultraviolette, sie sind durch eine gewisse chemische Wirksamkeit ausgezeichnet. Indes rufen auch die sichtbaren Strahlen Wärme- und chemische Wirkungen hervor; die ultravioletten auch Wärme-, die infraroten auch chemische Wirkungen; im sichtbaren Spektrum sind die physiologischen, chemischen und Wärmewirkungen nur verschiedene Arten der Umwandlung der Energie der betreffenden Lichtstrahlung. Auf eigenartige Bewegungen des Lichtäthers (Pulse) sind wohl auch die Röntgenstrahlen zurückzuführen.

Außer diesen Strahlungen in Form von Wellen haben neuere Untersuchungen auch Strahlungen, die durch eine Konvektion bedingt sind, kennen gelehrt, bei denen kleine elektrische Teilchen mit großen Geschwindigkeiten fortgeschleudert werden, wie z. B. die Kanal-, Kathoden- und Becquerelstrahlen (α-, β- und γ-Strahlen).

I. Photometrie.

Einleitung.

Gebraucht wird: Optische Bank, Träger mit Lichtern, Bunsenschem Photometer, Jolyschem Photometer, Lummer-Brodhunschem Photometer oder einem anderen; Amylacetateinheitslampe, Gaslampe mit Rundbrenner und Cylinder, Flachbrenner, Glühlampen; Rauchgläser, Gasuhr.

Die Energie der von einem leuchtenden Teilchen a ausgehenden Lichtbewegung breitet sich in einem isotropen Medium, vgl. S. 336 (z. B. der Luft), nach allen Seiten hin gleich schnell aus; die zu einer bestimmten Zeit von a ausgehende Energie setzt daher nach Verlauf einer beliebigen Zeit Teilchen in Bewegung, welche auf einer um a beschriebenen Kugeloberfläche gelegen sind. Bei doppelt so großem Abstande r von dem Teilchen a verteilt sich die Energie über eine viermal so große Fläche, sie übt auf der Flächeneinheit dieser Kugel also eine viermal geringere Wirkung aus, als auf der Flächeneinheit der Kugel von dem erstangenommenen Radius, falls das Zwischenmedium das Licht nicht absorbiert. Daher ist die Erleuchtung gleich großer Flächen umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung von dem leuchtenden Punkte.

Prinzip der Helligkeitsmessungen. Beleuchtet man einen Schirm mit einer Lichtquelle, welche ihm in der Entfernung 1 die Helligkeit i_1 erteilen würde, aus der Entfernung r_1, so ist die Helligkeit des Schirmes $I_1 = i_1/r_1^2$. Ebenso ist die Helligkeit I_2 des Schirmes, wenn er durch eine Lichtquelle, welche ihm in der Entfernung 1 die Helligkeit i_2 erteilt, in der Entfernung r_2 beleuchtet wird, $I_2 = i_2/r_2^2$.

Erscheint der Schirm von beiden Lichtquellen bei senkrechter Inzidenz gleich hell erleuchtet, ist also $I_1 = I_2$, so ist $i_1/r_1^2 = i_2/r_2^2$, $i_1 : i_2 = r_1^2 : r_2^2$.

Die Intensitäten zweier Lichtquellen verhalten sich wie die Quadrate der Entfernungen, aus denen sie einen Schirm gleich stark erleuchten.

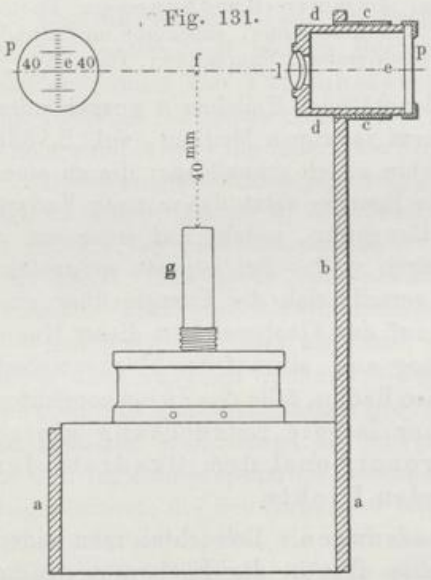
Einheiten und Apparate. Als Lichteinheit diente früher das Licht einer Kerze von bestimmter Beschaffenheit, neuerdings dasjenige einer Amylacetatlampe bei 40 mm Flammenhöhe.

Die Amylacetatlampe nach Hefner von Alteneck, „die Hefnerkerze", gibt Fig. 131 (a. f. S.) im Querschnitt wieder. In dem Gefäße aa befindet sich der Amylalkohol, in den ein durch g gehender Docht ein-

taucht; derselbe kann durch eine Schraube mit Trieb auf und nieder bewegt werden. Zum Einstellen der Flamme auf die Höhe von 40 mm, bei der die Helligkeit die normale ist, wird durch die in der Hülse *dd* befestigte Linse *l* ein Bild der Flammenspitze auf der Mattscheibe *p* entworfen, auf der sich eine Teilung befindet (vgl. die Nebenfigur); die Hülse *dd* wird in dem Rohre *cc*, welches von *b* getragen wird, verschoben, bis die Flammenspitze scharf erscheint.

Als Einheit der Erleuchtung einer Fläche der sogenannten „indizierten Helligkeit" dient die Lichtmenge, welche die Einheitskerze auf die senkrecht getroffene Flächeneinheit (1 cm²) in der Entfernung eines Meters aussendet: die „Meterkerze"[1]).

Fig. 131.



Zum Vergleiche der von zwei Lichtquellen indizierten Helligkeiten dienen die Photometer.

Dieselben werden auf einer optischen Bank verschoben, einer etwa $2^1/_2$ m langen Holzleiste, welche an einer Seite eine Teilung in Centimeter besitzt. In dieselbe werden Klötze *S* (Fig. 133) gesetzt, welche Säulen *T* tragen, in denen die Stiele *U* von Tischen, Lampen u. dgl. mittels Schrauben *W* in verschiedenen Höhen befestigt werden können. Die Klötze haben einen als Index dienenden Strich *J*.

Vollkommenere Einrichtungen dieser Art bestehen aus einem Schienenpaar, auf dem sich ein Wagen mittels Zahnstange und Trieb bewegen läßt. Auf ihn werden die Photometer aufgesetzt.

1. Das Bunsensche Photometer (Fig. 132) besteht aus einem Rahmen *R*, der nach Töpler zwischen zwei Glasplatten drei Lagen von Ölpapier enthält; aus der mittelsten ist ein kreisrundes Loch *L* herausgeschnitten. Dadurch entsteht auf diesem Papierschirme ein Fleck, der hell auf dunklem Grunde erscheint, wenn die Rückseite stärker als die Vorderseite erleuchtet wird, dunkel auf hellem Grunde im umgekehrten Falle, und auf beiden Seiten gleich hell, wenn beide Seiten gleich stark erleuchtet werden. Um festzustellen, ob letzteres

---

[1]) Die von einer Amylacetatlampe in horizontaler Richtung senkrecht auf einen Schirm, der sich in 1 m Entfernung befindet, ausgesandte leuchtende Energie ist pro cm² nach Ångström $20{,}6 \times 10^{-8} \frac{\text{gr cal}}{\text{sec cm}^2}$.

der Fall ist, sind an dem Rahmen zwei Spiegel S_1 und S_2 befestigt; der vor dem Photometer sitzende Beobachter vergleicht die Helligkeiten der Spiegelbilder beider Photometerseiten miteinander.

2. Das Diffusionsphotometer (nach Joly) trägt auf einem schwarzen Holzbrett *H* (Fig. 133) zwei Paraffinklötze von 18 × 18 × 38 mm, die aus einem größeren homogenen Paraffinstück ausgeschnitten sind. Beide sind mit je einer der 18 × 38 mm großen ebenen Flächen aufeinander gedrückt und werden, vertikal nebeneinander stehend, von einem geschwärzten Blech *B* gehalten. Vor ihnen ist ein schwarzer, ⌣-förmig gebogener Schirm *Z* mit einem 20 × 36 mm großen Ausschnitt so befestigt, daß letzterer von der

Fig. 132.

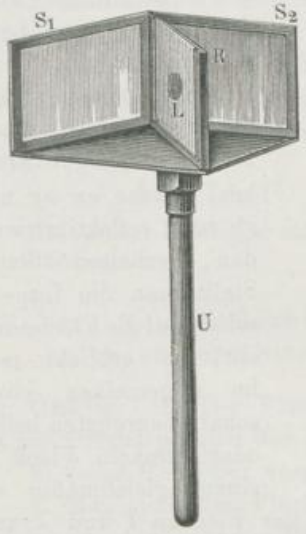
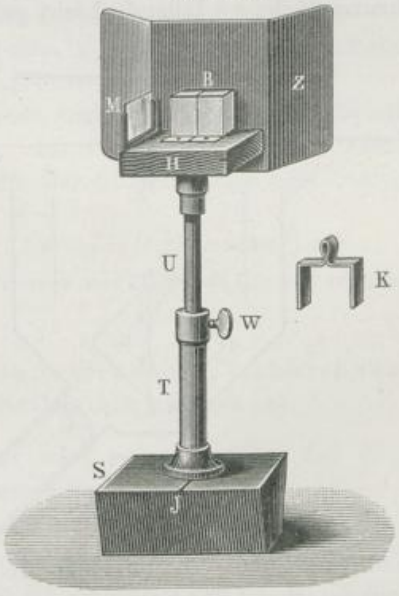


Fig. 133.



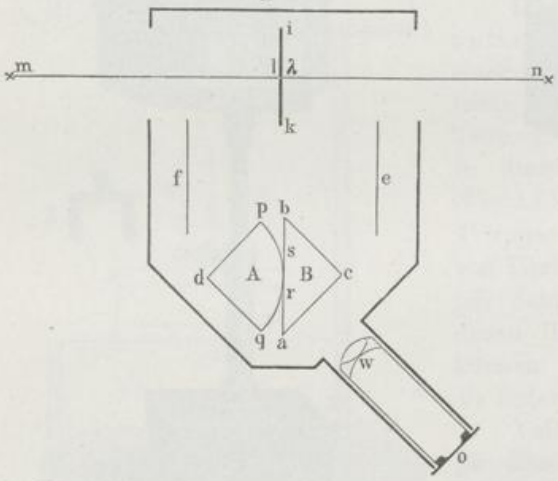
Fuge zwischen beiden Klötzen halbiert wird. Der durch den Schirm vor seitlichem Licht geschützte Beobachter blickt auf die Fuge. Ein Blechbügel *K* schützt die Klötze, wenn sie nicht gebraucht werden, vor Staub; ein Rahmen *M* dient zur Aufnahme von Absorptionsgläsern. Die stärker beleuchtete Hälfte des Paraffinstückes erscheint heller; bei gleich starker Beleuchtung beider verschwindet die Trennungslinie fast vollkommen.

3. Das L. Webersche Milchglasplattenphotometer enthält eine Vergleichsbenzinkerze, welche senkrecht zu einer Milchglasplatte hin und her bewegt werden kann, die sie dann verschieden stark erleuchtet. Die Fläche derselben erscheint durch eine spiegelnde Vorrichtung neben der durch den Haupttubus anvisierten Lichtquelle; sind beide durch Regulieren des Kerzenabstandes gleich gemacht, so

gibt eine Teilung am seitlichen Tubus unmittelbar die Kerzenstärke (eine kleine Korrektion gibt eine dem Apparate beigegebene Tabelle). Das Instrument eignet sich besonders zur Photometrierung von Flächen.

4. Das Lummer-Brodhunsche Photometer. Fig. 134 gibt einen Querschnitt des Instrumentes. Lotrecht zur Photometerbank mn steht der Schirm ik aus zwei Papierblättern, zwischen welche Stanniol gelegt ist. Das diffuse, vom Schirm ausgehende Licht fällt auf die Spiegel e und f, welche es senkrecht auf die Kathetenflächen bc und dp der beiden Glasprismen B und A werfen. B ist ein total reflektierendes Prisma mit ebener Hypotenusenfläche, während beim Prisma A nur die das Prisma abc berührende Kreisfläche rs eben ist, der übrige Teil qr und sp dagegen eine Kugelfläche bildet. Alles auf die Berührungsfläche rs fallende Licht geht vollständig hindurch, so daß das bei o befindliche Auge des Beobachters Licht von f nur durch die Berührungsfläche rs hindurch, dagegen von e her nur diejenigen Strahlen, welche an ar und sb total reflektiert werden, erhalten kann. Stellt man die Lupe w scharf auf die Fläche $arsb$ ein, so erblickt man im allgemeinen einen scharf begrenzten hellen oder dunkeln Fleck in einem gleichmäßig erleuchteten Felde. Bei gleicher Helligkeit der Flächen l und λ verschwindet dieser Fleck [1]).

Fig. 134.



Bemerkung. Genaue Beobachtungen müssen in einem schwarz oder ganz dunkel gestrichenen Raume angestellt werden, damit auf das Photometer kein von den Wänden reflektiertes Licht trifft.

1. Prüfung des Gesetzes der Abnahme der Erleuchtung mit dem Quadrate der Entfernung.

Übung. 1. Der Träger mit einem Lichte wird auf die Photometerbank gestellt; sein Index entspreche dem Teilstrich α der Bank.

2. Der Träger mit vier Lichtern wird nacheinander auf verschiedene Teilstriche A gestellt und die Photometer so zwischen beiden Licht-

[1]) Von weiteren Photometern wären neben anderen noch die älteren von Rumford und Bouguer und das neue von Martens zu erwähnen.

quellen eingestellt, daß bei dem Bunsenschen Photometer der Fleck auf beiden Seiten gleich stark gegen die (hellere) Umgebung kontrastiert, bei dem Jolyschen und Lummer-Brodhunschen die Trennungslinien verschwinden. Die Höhe der beiden Lichtquellen und die der Achse des Photometers muß die gleiche sein.

3. Man liest die Stellung des Photometers a ab.

Die Differenzen $a - \alpha$ und $A - a$ sind dann die Entfernungen der Lichtquellen, in denen sie dieselbe Fläche gleich stark erleuchten.

Man findet, daß sehr nahe $A - a = 2(a - \alpha)$ ist.

2. Vergleichung zweier Lichtquellen.

Übung. 1. Man stellt die Amylacetatlampe (oder Normalkerze) (Helligkeit Eins) auf einen bestimmten Teilstrich.

2. Man stellt die zweite Lichtquelle, z. B. eine Gaslampe, auf einen anderen, z. B. 1 m davon entfernten Teilstrich.

3. Man verschiebt das Photometer, bis die von beiden Lichtquellen erzeugte Helligkeit die gleiche ist. Ist I die Helligkeit der Lampe, L die Entfernung der Lampe, l die der Einheitslampe vom Schirme, so ist

$$I : 1 = L^2 : l^2 \quad \text{und} \quad I = L^2/l^2 \text{ Einheiten}^{1)}.$$

Beispiele: Gaslampe mit Rundbrenner und Hefner-Lampe; Gaslampe und Glühlampen.

3. Vergleich der Lichtmengen, welche ein Flachbrenner nach verschiedenen Seiten hin aussendet.

Übung. 1. Der Flachbrenner wird so aufgestellt, daß a) die Flammenfläche parallel der Photometerachse steht.

2. Seine Helligkeit verglichen mit der Einheitslampe sei I_a.

3. Man stellt den Flachbrenner b) senkrecht zur vorigen Stellung und bestimmt wieder die Helligkeit; sie sei I_b.

Es ist $I_a = L_1^2/l_1^2$, $I_b = L_2^2/l_2^2$, und das Verhältnis:

$$\frac{I_a}{I_b} = \frac{L_1^2 l_2^2}{L_2^2 l_1^2}.$$

Beispiel: Bei a) wurde gefunden: $l_1 = 20{,}7$ cm, $L_1 = 78{,}3$ cm; also $I_a = 14{,}7$; bei b): $l_2 = 19{,}0$, $L_2 = 81{,}0$, also $I_b = 18{,}2$, und $I_b > I_a$.

Der Brenner sendet in einer zur Flammenebene senkrechten Richtung mehr Licht aus, als in der Richtung der Flammenebene. Dies rührt daher, daß beim Beleuchten einer Fläche von der Schmalseite der Flamme her eine größere Zahl von leuchtenden Teilchen durch davorliegende verdeckt wird. (Die in der Flamme leuchtenden Kohlepartikelchen sind undurchsichtig.) Dagegen ist der subjektive Eindruck für das auf die Flamme

---

[1]) Genauere Resultate erhält man für das Verhältnis der Helligkeiten zweier Lichtquellen, wenn man sie nacheinander mit derselben Lichtquelle vergleicht, welche auf derselben Photometerseite stehen bleibt.

blickende Auge größer beim Sehen auf die Schmalseite, weil sich dabei die Bilder einer größeren Anzahl leuchtender Teilchen auf derselben Stelle der Netzhaut übereinander lagern, als wenn man auf die Breitseite blickt.

4. Beziehung zwischen Gaskonsum und Lichtstärke.

Übung. 1. Man schaltet in die Zuleitung einer Gaslampe eine Gasuhr ein, macht die Lampe möglichst hell, stellt sie auf einen Teilstrich der optischen Bank, die Einheitslampe auf einen anderen.

2. Nachdem die Gasuhr eine Zeitlang im Gange gewesen ist, bestimmt man die Helligkeit I_1 der Gaslampe.

3. Man liest bei einer vollen Minute den Stand der Gasuhr s_1 ab. Nach n Minuten liest man wieder ab: s_2. Der Gaskonsum ist in Litern pro Minute $S = 1/n . (s_2 - s_1)$ Liter.

4. Man bestimmt die Helligkeit wieder: I_2. Dann ist die mittlere Helligkeit während der Versuchsdauer $I = {}^1/_2 (I_1 + I_2)$.

5. Man dreht die Flamme klein und bestimmt wieder die mittlere Helligkeit i und den Konsum s pro Minute.

6. Man wiederholt den Versuch b) mit einem Flachbrenner und c) mit einem Auerschen Gasglühlicht.

Beispiel: $I = 36{,}6$ Einheiten E; $S = 2{,}8$ l; $i = 7{,}2$ E; $s = 1{,}8$ l; die Helligkeit wächst also nicht proportional dem Gaskonsum, sondern (innerhalb der Versuchsgrenzen) schneller als dieser.

Bemerkung. Bei genaueren Bestimmungen liest man an der Gasuhr noch den Druck und die Temperatur ab, und reduziert das verbrauchte Gasvolumen auf 760 mm und 0°, S. 85.

5. Bestimmung des Absorptionskoeffizienten eines Rauchglases.

Geht Licht durch einen absorbierenden Körper, etwa durch ein dunkles Glas, so wird es geschwächt. Ist I die Intensität des auffallenden und I_1 diejenige des durchgegangenen Lichtes, so ist

$$I_1 = \varepsilon_1 I,$$

wo ε_1 ein echter Bruch ist. Derselbe gibt das Verhältnis der Intensität des durchgegangenen Lichtes zum auffallenden an; ε_1 ist die durch das Glas bewirkte Extinktion. Der Rest der Energie des Lichtes ist in dem Glase geblieben, er ist absorbiert worden. Die Absorption $A = 1 - \varepsilon_1$ gibt an, der wievielte Teil des auffallenden Lichtes in dem absorbierenden Medium zurückbleibt.

Stellt man hinter das erste Absorptionsglas ein zweites von der Extinktion ε_2, so ist die Intensität des auf dieses auffallenden Lichtes I_1, die des durch dasselbe durchgegangenen Lichtes $I_2 = \varepsilon_2 I_1 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 I$, die Extinktion durch zwei Absorptionsgläser ist also gleich dem Produkte der Extinktionen der beiden Gläser für sich; die durch beide

Gläser herbeigeführte Absorption ist $1 - \varepsilon_1 \varepsilon_2$. Stellt man n Gläser von gleicher Substanz und von gleicher Dicke, deren jedes eine Extinktion ε besitzt, hintereinander, so wird das Licht auf $\varepsilon^n I$ geschwächt, und $A_n = (1 - \varepsilon^n) I$ wird von der auffallenden Lichtmenge durch die Gläser absorbiert.

Mißt man die Dicken in Centimetern, setzt man $\varepsilon = e^{-a}$ ($e = 2{,}71828$), und ist dies die Extinktion durch eine Platte von der Dicke von 1 cm, so ist die Extinktion für eine Platte aus derselben Substanz, aber der Dicke von d cm gleich $(e^{-a})^d = e^{-ad}$. Die Absorption ist $A = (1 - e^{-ad})$, a heißt der Extinktionskoeffizient oder Absorptionskoeffizient.

Zwei Platten aus derselben Substanz und mit den Dicken d_1 und d_2 schwächen einfallendes Licht von der Intensität I bis auf I_1 bzw. I_2, wo

$$I_1 = I e^{-a d_1}, \qquad I_2 = I e^{-a d_2}$$

ist. Hieraus ergibt sich:

$$a = \frac{1}{d_1} \frac{\log I/I_1}{\log e} \qquad \text{und} \qquad a = \frac{1}{d_2} \frac{\log I/I_2}{\log e}.$$

Übung. 1. Man bestimmt die Helligkeit einer Gaslampe erst ohne Einschaltung eines Absorptionsglases (Rauchglases) I.

2. Nach Einschaltung desselben bei M (Fig. 133) sei die auf das Photometer fallende Lichtmenge I_1 Einheiten; dann ist: $\varepsilon_1 = I_1/I$.

3. Nach Einschaltung eines anderen Absorptionsglases: I_2 Einheiten; dann ist: $\varepsilon_2 = I_2/I$.

4. Nach Einschaltung beider Absorptionsgläser: I_3 Einheiten; dann ist: $\varepsilon_3 = I_3/I$. Man findet, daß sehr nahe $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 . \varepsilon_2$ ist.

5. Man mißt die Dicken der Absorptionsgläser d_1 unb d_2 und berechnet den Extinktionskoeffizienten a.

Beispiel: Ohne Absorptionsglas war die Helligkeit einer Gaslampe 16 Einheiten. Als man in den Gang der Strahlen ein Absorptionsglas brachte, war $I_1 = 2{,}25$ Einheiten. Durch das Glas wurde die Helligkeit der Lampe also vermindert im Verhältnis von 16 zu 2,25, die durchgegangene Lichtmenge war nur $2{,}25/16{,}00 = 0{,}14$ der auffallenden. Es ist also $\varepsilon_1 = 0{,}14$ oder rund $^1/_7$. Das Glas bewirkt eine Schwächung des Lichtes auf $^1/_7$ (Extinktion), $^6/_7$ verbleiben im Glase (Absorption).

Ein zweites Glas gab $\varepsilon_2 = 0{,}27$; beide zusammen $\varepsilon_3 = 0{,}04$, nahezu $= \varepsilon_1 . \varepsilon_2$. Über Berechnung von a aus den Extinktionen zweier verschieden dicker Schichten derselben Lösung vgl. bei Spektrophotometer.

Bemerkung. 1. Tritt ein Lichtstrahl von der Intensität I_0 aus einem Medium 1 in ein zweites 2 mit dem Brechungsindex n_{12} ein, so findet infolge der Reflexion an der Grenzfläche ein Verlust δ an Intensität statt, der bei senkrechter Inzidenz ist:

$$\delta = I_0 \left(\frac{n_{12} - 1}{n_{12} + 1}\right)^2;$$

er ist oben vernachlässigt worden. Bei gewöhnlichem Glase ist $n_{12} = 1{,}5$ und daher $\delta = {}^1/_{25} I_0$.

2. Der Extinktionskoeffizient wird in verschiedener Weise definiert:

a) Als der reziproke Wert a derjenigen Dicke d in Centimetern, bei der die Intensität des einfallenden Lichtes auf $1/e$ gesunken ist.

b) Als der reziproke Wert a' derjenigen Dicke, bei der die Intensität des einfallenden Lichtes auf 1/10 gesunken ist.

Dann ist

$$a' = a \log e = a \,.\, 0{,}4343.$$

R. Bunsen, G. Krüß u. a. geben in ihren Arbeiten die Werte von a'.

c) Bei theoretischen Betrachtungen durch den Extinktionsindex k; er ist dadurch charakterisiert, daß die Amplitude der Schwingungen in einer Schicht von der Dicke der Wellenlänge λ im Verhältnisse $1 : e^{2\pi k}$ abnimmt.

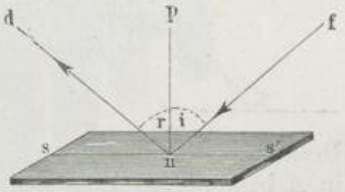
II. Reflexion des Lichtes.

Einleitung.

Gebraucht wird: Reflexionsgoniometer; schwarze Glasplatte; Klebwachs; Glasprisma von 45°; ein Stück Kalkspat. Optische Bank; Hohlspiegel; matte Glasplatte; Papierschirm; Beleuchtungslampe mit Schwarzblechcylinder, Augenspiegel, Papierblatt. Zwei Kerzen mit Stativen, Ablesefernrohr mit Skala, Konvexspiegel, Skala mit Stativ (S. 249).

Trifft ein in einem Medium (1), etwa Luft, fortschreitender Lichtstrahl, der von f kommt (Fig. 135), eine ebene Fläche, die einen zweiten Körper (2), etwa Glas, begrenzt, so wird ein Teil des Lichtes zurückgeworfen, reflektiert, ein anderer dringt in das zweite Medium ein. Man errichtet in dem Punkte n, welcher von dem einfallenden Lichtstrahl getroffen wird, eine Senkrechte np auf der Trennungsfläche (das Einfallslot); der Winkel, den der einfallende Strahl fn mit dem Einfallslot bildet, heißt der Einfallswinkel i, derjenige, den der reflektierte Strahl nd mit demselben bildet, der Reflexionswinkel r. Es gelten folgende Sätze:

Fig. 135.



1. Der einfallende Strahl fn, das Einfallslot np und der reflektierte Strahl nd liegen in einer Ebene.

2. Der Einfallswinkel i ist gleich dem Reflexionswinkel r.

3. Das Bild eines Gegenstandes in einem ebenen Spiegel liegt ebenso weit hinter dem Spiegel, wie der Gegenstand sich vor demselben befindet.

Das Auge verlegt den Gegenstand dahin, wo die nach der Reflexion in das Auge fallenden Strahlen sich zu schneiden scheinen. Treffen sich, wie bei dem ebenen Spiegel, die Strahlen nicht wirklich in einem Punkte, sondern nur deren Verlängerungen nach rückwärts, so spricht man von einem virtuellen Bilde. Reelle Bilder sind solche, bei denen die Lichtstrahlen sich wirklich durchkreuzen (vgl. bei Linsen).

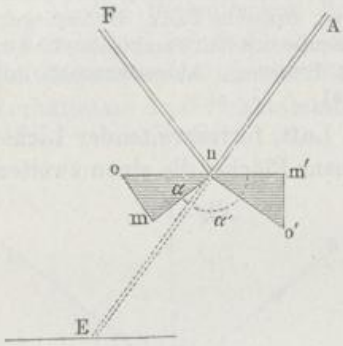
4. Die Bilder bei ebenen Spiegeln sind virtuelle Bilder.

1. Reflexionsgoniometer.

Prinzip. Um den Winkel α zwischen zwei ebenen spiegelnden Flächen nm und no, z. B. an einem Prisma (Kristall), zu messen, läßt

man dasselbe Lichtstrahlenbündel in derselben Richtung einmal von der einen, dann nach Drehung des Prismas um die Schnittlinie der beiden Flächen von der anderen Fläche reflektieren; der Winkel α', um den man dabei das Prisma drehen muß, ergänzt den zu messenden α zu 180^0. Blickt etwa das Auge, Fig. 136, in der Richtung AE dicht an dem Prisma onm vorbei nach der festen Marke E, so erhält es gleichzeitig Strahlen, die aus der Richtung Fn auf die Prismafläche on fallen und von dieser nach nA hin reflektiert werden, und solche, die von E kommen. Dreht man das Prisma um eine zu der Ebene EFA (Zeichnungsebene) senkrechte Achse um einen Winkel α', und zwar so lange, bis es in eine solche Lage $o'nm'$ gekommen ist, daß die von F kommenden Strahlen von der Fläche nm' nach nA hin reflektiert werden, wobei sie dem Auge aus derselben Richtung, wie die von E zu kommen scheinen, so liegt die Ebene nm' parallel zu no. Offenbar ist:

Fig. 136.



$$\alpha = 180^0 - \alpha'.$$

Liegt die Ebene EFA vertikal, also die Kante n und die ihr parallele Drehungsachse des Prismas horizontal, so scheint der Punkt F dem in A befindlichen Auge sich bei der Drehung des Prismas in vertikaler Richtung zu bewegen.

Apparat. 1. Das Goniometer nach Wollaston, Fig. 137. Mittels des Knopfes G läßt sich die geteilte Scheibe E um eine horizontale Achse drehen und ihre Stellung an einem Index am Arme QR ablesen. Sie läßt sich an der Kreisplatte F durch die Druckschraube STU festklemmen [1]). An der durch G hindurchgehenden, mit dem Knopfe I verbundenen Achse ist der Bügel KLM befestigt, der die in der Hülse N drehbrae Achse OO' trägt. Bei O' wird das Prisma a mit etwas Klebwachs oder besser in einer mit einem Kugelgelenk an der Achse OO' sitzenden Zange befestigt.

Dem Apparate gegenüber wird die Vertikalrichtung und eine bestimmte Höhe bezeichnet, etwa durch den vertikalen Stab und eine Quersprosse eines Fensterkreuzes. Statt das Fenster zu benutzen, kann man an einer Zimmerwand eine helle Marke x anbringen, von deren Mitte ein Lot mit weißem Faden herabhängt.

2. Das Goniometer nach E. Mitscherlich (1794 bis 1863) (vgl. weiter unten bei Spektrometer).

Übung. Messung von Prismenwinkeln mit dem Wollastonschen Goniometer.

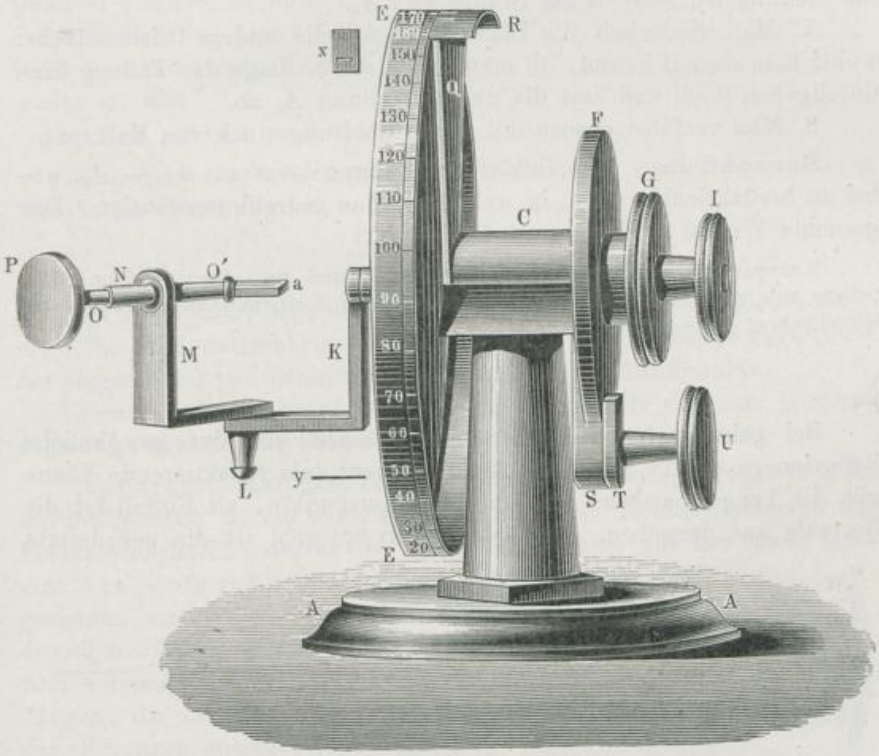
[1]) Die bei manchen Reflexionsgoniometern, wie bei dem hier abgebildeten, getroffene Einrichtung FST dient zu Repetitionsmessungen.

Übung. 1. Man stellt das Goniometer so auf, daß die durch die Marke oder die Mitte des Fensterkreuzes gehende und zu diesem senkrecht stehende Vertikalebene zu der Scheibe EE parallel ist.

2. Auf dem Tische befestigt man mit etwas Klebwachs unmittelbar vor dem Apparate ein Stück schwarzen Glases y, dessen Normale parallel der Ebene EE liegt.

3. Man stellt die Scheibe F fest, dreht den Arm M um den Punkt L, bis die Achse OO' in die Verlängerung der Achse C fällt (bis

Fig. 137.



beim Drehen an I der Knopf P nicht schleudert), und richtet das an O' befestigte Prisma a so, daß die Kante, in der die beiden Flächen, deren Winkel man bestimmen will, zusammenstoßen, der Drehungsachse angenähert parallel ist.

4. Man bringt das Auge dem Prisma ziemlich nahe, sucht unter Drehen an G das von einer Prismenfläche reflektierte Bild der Fenstersprosse bzw. der Marke x und neigt die Glasplatte y so, daß man in ihr das Spiegelbild derselben Sprosse bzw. der Marke neben der auf der Prismenfläche gesehenen erblickt, wobei man in dem Bilde auf die Entfernung der vertikalen Fenstersprosse bzw. des Lotes von dem Rande der Prismenfläche achtet.

5. Man dreht das Prisma, bis man das von der anderen Prismenfläche reflektierte Bild derselben Fenstersprosse oder der Marke neben dem Spiegelbilde in y sieht. Dabei soll das Bild der vertikalen Sprosse oder des Lotes an derselben Stelle wie vorhin liegen. Ist dies nicht der Fall, so liegt die Kante der Achse noch nicht parallel. Man führt dies durch Neigen des Prismas und einiges Hin- und Herdrehen herbei.

Fig. 138.

6. Man bringt die Bilder in der einen Prismenfläche und in dem Spiegel y genau in gegenseitige Verlängerung und liest die Stellung der Scheibe am Nonius ab: A_1.

7. Man wiederholt die Einstellung für die andere Prismenfläche, wobei man darauf achtet, ob man durch die Nulllage der Teilung hindurchgehen muß, und liest die zweite Stellung A_2 ab.

8. Man verfährt ebenso mit einem Spaltungsstück von Kalkspat.

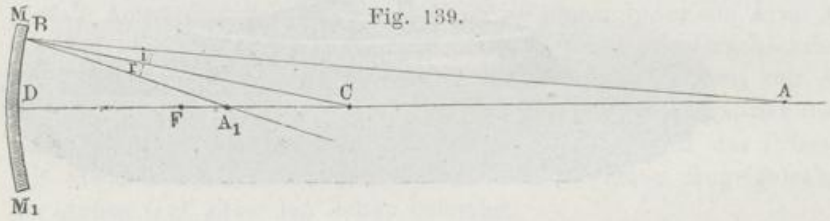
Berechnung. Die Größe der Drehung ist $\alpha' = A_1 - A_2$, wobei zu berücksichtigen ist, in welchem Sinne gedreht worden ist. Der gesuchte Winkel ist dann $\alpha = 180 - \alpha'$.

Beispiel: Die Übung wird ausgeführt zuerst mit einem kleinen Glasprisma mit vollkommen ebenen Flächen, dann mit einem Spaltungsstück von isländischem Doppelspat.

2. Hohlspiegel.

Bei gekrümmten reflektierenden Flächen gilt das gewöhnliche Reflexionsgesetz für jedes Oberflächenelement, als reflektierende Ebene gilt die Tangentialebene an dem Reflexionspunkte, als Einfallslot die Normale auf derselben. Bei sphärischen Spiegeln ist die gekrümmte

Fig. 139.

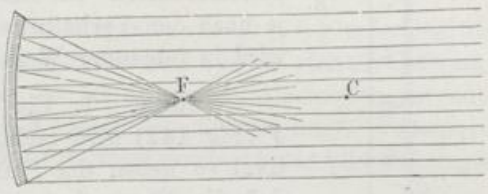


Fläche eine Kugelfläche. Die Spiegel sind konkav (Hohl- oder Sammelspiegel), wenn die Innenfläche der Kugel, konvex (erhabene oder Zerstreuungsspiegel), wenn die Außenfläche als spiegelnde Fläche dient. Das Einfallslot hat die Richtung des Radius.

Ist C (Fig. 139) der Mittelpunkt derjenigen Kugel, von deren Oberfläche der Hohlspiegel MM_1 ein Stück ist, so ist $CD = CB = r$ ein Radius; die Strahlen, die von einem in A in der Entfernung $AD = a$ (Gegenstandsweite) vom Spiegel gelegenen Gegenstande auf den Spiegel fallen, z. B. der Strahl AB, werden so reflektiert, daß Winkel $i = r$ ist. Der durch den Mittelpunkt gehende, senkrecht auf den Spiegel fallende Strahl AD wird in sich selbst zurückgeworfen; die reflektierten

Strahlen schneiden sich in A_1 in der Entfernung $DA_1 = b$ vor dem Spiegel; hier entsteht also ein Bild, und zwar ein reelles des Gegenstandes (b = Bildweite). Liegt umgekehrt der Gegenstand in A_1, so entsteht das Bild in A. Treffen die Strahlen parallel auf den Spiegel, kommen sie also aus sehr großer Entfernung, wie in Fig. 140, so vereinigen sie sich in dem sogenannten Brennpunkte F. Derselbe liegt halb so weit vom Spiegel, als der Mittelpunkt C von ihm entfernt ist. Seine Entfernung vom Spiegel heißt die Brenn- oder Fokalweite φ, also

Fig. 140.



$$\varphi = {}^1/_2\, r.$$

Zwischen Gegenstandsweite a, Bildweite b und Brennweite φ besteht die Beziehung:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\varphi}.$$

Ist z. B. $a = r$, liegt also der Gegenstand in C, so ist auch $b = r$, d. h. das Bild entsteht in der gleichen Entfernung vom Spiegel, wie der Gegenstand von demselben absteht, d. h. im Mittelpunkte.

Ferner gilt der Satz: Die Bildgröße verhält sich zur Gegenstandsgröße wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Apparat. Auf die Träger der optischen Bank (vgl. S. 236) werden gesetzt: 1. ein sphärischer Hohlspiegel; 2. eine Gaslampe mit Eisenblechcylinder, der in der Höhe der Flamme auf der einen Seite eine 1 cm weite runde Öffnung O trägt, über welche Drähte gespannt sind (Fig. 141). Ein zweiter Cylinder hat in derselben Höhe eine sehr kleine Öffnung. An die Cylinder sind horizontale Arme angenietet, von denen Senkel herabhängen, die auf der Teilung der optischen Bank die Lage der Öffnungen anzeigen. Die Lampe steckt in einem horizontalen, etwa 8 cm langen Arme und wird in dem Träger so befestigt, daß sie seitlich neben der Mittellinie der optischen Bank steht; 3. ein großer Papierschirm oder eine kleine matte Glastafel.

Fig. 141.

1. Prüfung der Gesetze des Hohlspiegels.

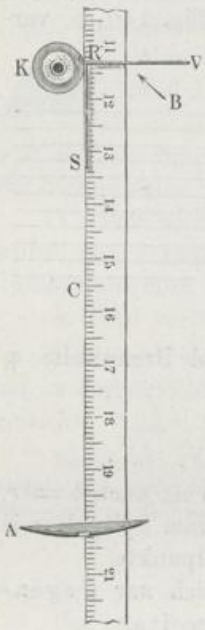
Man prüft die Gesetze in ganz derselben Weise, wie dies für die Linsengesetze S. 279 angegeben ist.

2. Bestimmung der Brennweite eines Augenspiegels.

Zur Beleuchtung bei Untersuchungen der Netzhaut, der Nase, des Kehlkopfes usw. dienen Hohlspiegel (Augen-, Nasen-, Kehlkopf-

spiegel), welche in der Mitte durchbohrt sind. Die Strahlen einer Lampe, welche seitlich neben dem Kopfe des zu Untersuchenden steht, werden durch den Hohlspiegel auf die zu untersuchende Stelle geworfen, während der Untersuchende durch die Spiegelöffnung blickt und auf die erleuchteten Stellen, eventuell durch Linsen unterstützt, akkommodiert. Die Brennweite des Hohlspiegels muß je nach den Verhältnissen eine verschiedene sein; sie wird in folgender Weise bestimmt.

Fig. 142.



Übung. 1. Ein Blatt weißen Kartonpapieres V (Fig. 142) wird rechtwinkelig umgebogen und vertikal so neben der Flamme einer Kerze K befestigt, daß die Ebene der einen Hälfte VR gerade durch die Mitte der Flamme geht, die andere RS zwischen der ersten Hälfte und der Flamme als beschattende Zwischenwand steht.

2. Man hält den Hohlspiegel A so vor die Karte, daß auf derselben bei B ein deutliches Bild der Flamme entsteht, das dann dieselbe Größe wie die Flamme selbst hat. Man mißt die Entfernung C des Spiegels von der Papierfläche.

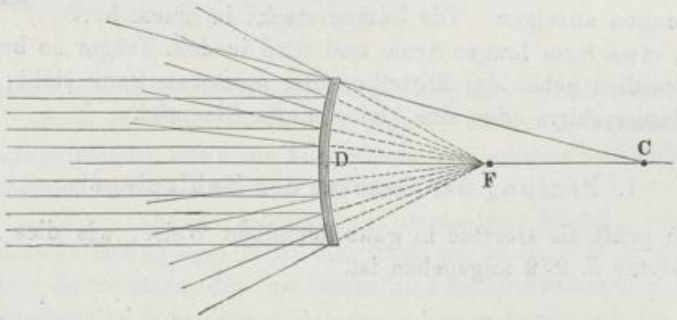
Dann ist nach S. 247 C der Abstand von Spiegel und Flamme gleich dem Radius, die Brennweite ist also:

$$\varphi = {}^1/_2\, C.$$

3. Konvexspiegel.

Konvexspiegel (vgl. S. 246) liefern virtuelle Bilder. Fallen auf einen Konvexspiegel parallele Strahlen, Fig. 143, so werden sie reflek-

Fig. 143.



tiert (zerstreut), als kämen sie von einem Punkte F, der um den halben Radius $DC = r$ hinter dem Spiegel liegt. Seine Entfernung $DF = \varphi = {}^1/_2\, r$ heißt die Zerstreuungsweite des Spiegels.

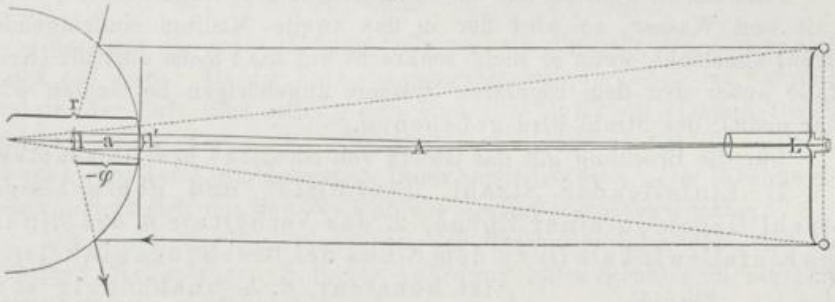
Zwischen Gegenstandsweite A, Bildweite a und Zerstreuungsweite φ besteht die Beziehung:

$$\frac{1}{A} + \frac{1}{-a} = \frac{1}{-\varphi}.$$

Bestimmung des Radius r eines Konvexspiegels.

Prinzip. Die von einem Gegenstande L (Gegenstandsgröße) (Fig. 144), der in der Entfernung A vor dem Spiegel steht, vom Spiegel reflektierten Strahlen verlaufen so, als ob sie von einem Gegenstande l kämen, der in der Entfernung a hinter dem Spiegel liegt. Einem von L her gegen den Spiegel blickenden Auge erscheint das Bild des Gegen-

Fig. 144.



standes also in der Größe l' auf einer Skala, die den Spiegel bei l' berührt. Zwischen r, l', L und A besteht die Beziehung:

$$r = \frac{2\,l'\,A}{L - 2\,l'}.$$

Übung. 1. Man stellt ein Ablesefernrohr mit seiner Skala in hinreichend großer Entfernung A vor dem Konvexspiegel auf und stellt an die Enden der Skala je eine Flamme oder Glühlampe, deren Entfernung L voneinander die Gegenstandsgröße darstellt.

2. Man richtet das Fernrohr auf die Bilder der Flammen in dem Spiegel.

3. Man befestigt vor dem Spiegel in horizontaler Richtung eine Skala so, daß man im Fernrohr die Spitzen der Flammenbilder gerade bis zur Skala reichen sieht.

4. Man liest den Abstand l' der Bilder auf der Skala durch das Fernrohr ab[1]).

Aus den gemessenen Größen ergibt sich r nach der Formel.

Bemerkung. Diese Methode liegt der in der Ophthalmologie zur Bestimmung der Krümmung der Hornhaut benutzten zugrunde.

---

[1]) Mittels des Ophthalmometers von H. Helmholtz kann man die Entfernung der beiden erwähnten Bilder noch genauer messen.

III. Bestimmung des Brechungsindex.

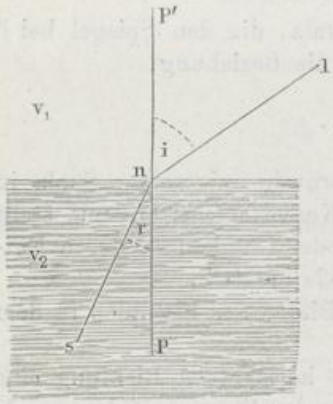
Einleitung.

I. Brechungsgesetz.

Fällt ein Lichtstrahl auf die Trennungsfläche zweier Medien, etwa Luft und Wasser, so wird der in das zweite Medium eindringende Strahl abgelenkt, wenn er nicht senkrecht auf die Fläche auftrifft (Kristalle außer den dem regulären Systeme angehörigen betrachten wir hier nicht): der Strahl wird gebrochen.

Für die Brechung gilt das Gesetz von Snellius bzw. Descartes: 1. Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene; 2. das Verhältnis n des Sinus des Einfallswinkels (i) zu dem Sinus des Brechungswinkels (r) ist konstant, d. h. unabhängig von der Größe des Einfallswinkels (Fig. 145). Dieses Verhältnis heißt Brechungsverhältnis oder -Index oder -Exponent[1]).

Fig. 145.



Der Brechungsindex hat neben dieser geometrischen folgende physikalische Bedeutung, aus der sich erstere ergibt: der Brechungsindex ist gleich dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 des Lichtes in beiden Medien:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Ist das erste Medium das Vakuum und setzt man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in demselben gleich eins, ist also $v_1 = 1$, so ist der reziproke Wert des Brechungsindex $1/n = v_2$ gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in dem zweiten Medium. Wird der gebrochene Strahl zu dem Einfallslot hin gebrochen wie in der Figur, so heißt das zweite Medium das optisch dichtere, das erste das optisch dünnere. In dem optisch dichteren Medium ist die Fortpflanzungs-

[1]) Über Sinus, Cosinus usw. vgl. die Tabellen am Schlusse des Buches.

geschwindigkeit kleiner als in dem optisch dünneren. Größere optische Dichte entspricht aber nicht immer einer größeren mechanischen Dichte.

Für den Brechungsindex N beim Übergange aus dem Medium 2 in das Medium 1 finden wir hiernach:

$$N = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n};$$

der Brechungsindex beim Übergange aus einem Medium 2 in ein Medium 1 ist der reziproke Wert desjenigen für den Übergang aus dem Medium 1 in das Medium 2.

Sind n_{12}, n_{13}, n_{23} die Brechungsindizes für den Übergang aus einem Medium 1 in ein Medium 2, aus dem Medium 1 in ein Medium 3 und aus dem Medium 2 in das Medium 3, so ist

$$n_{23} = n_{13}/n_{12} \quad \text{und} \quad n_{13} = n_{12} \cdot n_{23}.$$

Meist ist das erste Medium Luft und man bezieht den Brechungsindex auf diese. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im Vakuum und in der Luft sehr nahe gleich sind (bei Luft von 760 mm Druck und 0° ist ihr Verhältnis 1,000290), so genügt es für die meisten Zwecke, den auf Luft bezogenen Index zu betrachten. Der Brechungsindex ändert sich mit der Wellenlänge des untersuchten Lichtes.

Die durch die Verschiedenheit der Brechungsexponenten für die einzelnen Wellenlängen bedingte Auflösung eines Strahles in einzelne Farben nennt man Dispersion.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und damit der Brechungsindex spielen eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der optischen Eigenschaften der Körper, denn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Wellenbewegung in einem Medium hängt von dessen Beschaffenheit ab und kann uns umgekehrt Aufschluß über die letztere geben.

II. Brechungsindex und Wellenlänge.

Für die Abhängigkeit der Brechungsindizes n_λ von der Wellenlänge ist eine große Anzahl von Formeln aufgestellt worden, von denen wir nur die von Cauchy (1789 bis 1857) für schwach dispergierende, durchsichtige Körper anführen:

$$n_\lambda = A + B\lambda^{-2}.$$

A und B sind Konstanten, und zwar ist A der einer unendlich großen Wellenlänge ($\lambda = \infty$) entsprechende Brechungsindex, wie er aus der Formel berechnet wird; denn ist $\lambda = \infty$, so ist $B/\lambda^2 = 0$, also

$$n_\infty = A.$$

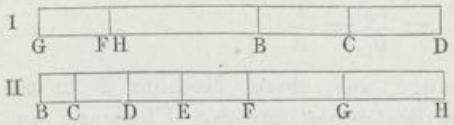
Sind die Brechungsindizes n_1 und n_2 für zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 gefunden, so kann man A und B berechnen. Es ist

$$n_1 = A + B\lambda_1^{-2} \qquad n_2 = A + B\lambda_2^{-2}$$

$$A = \frac{(n_1\lambda_1^2 - n_2\lambda_2^2)}{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \qquad B = (n_1 - A)\lambda_1^2.$$

Der Brechungsindex wächst bei durchsichtigen Körpern vom Rot zum Blau, d. h. mit abnehmender Wellenlänge: normale Dispersion. Stark absorbierende Körper zeigen ein anderes Verhalten; bei ihnen wächst der Brechungsindex vom Rot her gegen das Absorptionsmaximum; vom Violett her gegen dasselbe nimmt er stark ab; solche Körper heißen anormal dispergierende. Die Verteilung der Fraunhoferschen Linien in einem Spektrum, das I. von einem Prisma aus anormal dispergierender Fuchsinlösung und II. von einem normal dispergierenden Glasprisma entworfen ist, veranschaulicht Fig. 146.

Fig. 146.



Bei stark absorbierenden Körpern hat daher die Dispersionsformel eine ganz andere Gestalt, als oben angegeben ist.

III. Brechungsindex und Dichte.

Ist für eine Substanz n der Brechungsindex, A die Konstante der Cauchyschen Formel, d die Dichte[1]), so ist, wenn sich Brechungsindex und Dichte infolge von Druck- oder Temperaturänderungen ändern, nach Gladstone das spezifische Brechungsvermögen:

$$\frac{n-1}{d} = \varrho_n \quad \text{oder} \quad \frac{A-1}{d} = \varrho_A,$$

wo ϱ_n und ϱ_A Konstanten bedeuten. An Stelle der Relationen von Gladstone haben Lorenz und Lorentz die folgenden gesetzt:

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{d} = \varrho_{n^2} \quad \text{oder} \quad \frac{A^2-1}{A^2+2} \cdot \frac{1}{d} = \varrho_{A^2},$$

wo ϱ_{n^2} und ϱ_{A^2} Konstanten bedeuten. Nach Ketteler muß statt der 2 im Nenner eine Größe x stehen, die bei verschiedenen Körpern verschiedene Werte annimmt.

IV. Brechungsindex von Gemischen.

Sind die Brechungsindizes der ungemischten Körper $n_1, n_2, n_3 \ldots$, ihre Dichten $d_1, d_2, d_3 \ldots$, die in einer Masse P der Mischung enthaltenen Einzelmassen derselben $p_1, p_2, p_3 \ldots$, ist N der Brechungsindex der Mischung, D ihre Dichte, so ist

$$\frac{N-1}{D} P = \frac{n_1-1}{d_1} p_1 + \frac{n_2-1}{d_2} p_2 + \frac{n_3-1}{d_3} p_3 + \cdots$$

oder

$$\varrho_N P = \varrho_{n_1} p_1 + \varrho_{n_2} p_2 + \varrho_{n_3} p_3 + \cdots$$

---

[1]) Hier kommt in der Tat augenscheinlich die vom Gewichte ganz unabhängige Masse der Volumeneinheit, d. h. also nach S. 53 die Dichte in Betracht.

Eine ganz analoge Gleichung erhält man, wenn man statt ϱ_n die Ausdrücke ϱ_{n^2} zugrunde legt.

Für eine Lösung von p_1 Teilen Salz in 100 Teilen Flüssigkeit, d. h. für ein Gemisch von p_1 Teilen einer Substanz mit $(100 - p_1)$ Teilen einer anderen ist:

$$\varrho_N \cdot 100 = \varrho_{n_1} p_1 + \varrho_{n_2} (100 - p_1),$$

oder

$$\varrho_N^2 \cdot 100 = \varrho_{n_1}^2 \cdot p_1 + \varrho_{n_2}^2 \cdot (100 - p_1).$$

Kennt man N, n_1, n_2, D, d_1, d_2, bzw. ϱ_N, ϱ_{n_1}, ϱ_{n_2} usw., so kann man p_1 berechnen, man kann also auf diese Weise eine optische Analyse ausführen. Kennt man umgekehrt für eine Lösung eines Salzes N, D, n_2, p_1, d_2, so kann man ϱ_{n_1} für das Salz berechnen, und, wenn auch d_1 bekannt ist, n_1 finden.

V. Brechungsindex und chemische Zusammensetzung. Molekularrefraktion.

Für Verbindungen kann man analoge Ausdrücke ableiten, wie für Mischungen. Das Molekulargewicht eines aus a Atomen des Elementes A, dessen Atomgewicht A sei, b Atomen des Elementes B usw. zusammengesetzten Körpers $M = A_a B_b C_c \ldots S_s$ denkt man sich als eine Mischung von aA gr von A, bB gr von B usw.; ist dann n der Brechungsindex des untersuchten Körpers, d seine Dichte, sind α, β, ... die spezifischen Brechungsvermögen der Körper A, B, C... in dem Zustande, in dem sie in die Verbindung eintreten, so ist:

$$R = M\varrho_n = aA\alpha + bB\beta + \cdots sS\sigma$$

das molekulare Refraktionsvermögen oder die molekulare Refraktion oder das Refraktionsäquivalent.

Bezeichnet man analog $r_a = A\alpha$, $r_b = B\beta, \ldots$ als Atomrefraktion, so ist die Molekularrefraktion der Verbindung $A_a B_b C_c D_d \ldots S_s$:

$$R_N = M\varrho_n = ar_a + br_b + \cdots + sr_s.$$

Analoge Ausdrücke ergeben sich bei Zugrundelegung von ϱ_{n^2}.

Die Molekularrefraktion ist also, wenn diese Relation sich bestätigt, gleich der Summe der Atomrefraktionen, sie ist eine additive Eigenschaft.

Innerhalb weiter Grenzen gilt angenähert der Satz: die Atome der einzelnen Elemente treten mit nahezu derselben Atomrefraktion in verschiedene Verbindungen ein, falls sie nicht in verschiedener Weise gebunden sind, wie dies ihre Konstitutionsformel andeutet. Ermittelt man durch Addition der Atomrefraktionen der Elemente, wie sie sich aus Beobachtungen an Verbindungen ohne Doppelbindung ergeben, die Molekularrefraktion einer Verbindung, und weicht diese von der beobachteten ab, so bezeichnet man den dabei auftretenden Überschuß als Refraktionsinkrement. Solche Inkremente treten z. B. auf, wenn an Stelle der einfachen Bindungen doppelte oder mehrfache treten.

Nach Conrady ergeben sich folgende Werte für die Atomrefraktion bei der D-Linie und nach Landolt und Brühl für die C-Linie unter Zugrundelegung der Formel von Lorenz. In der folgenden Tabelle bezieht sich C' auf Kohlenstoff, der in einer Kette steht, wäh-

	Genaues Atomgewicht	Atomrefraktion für D	Genähertes Atomgewicht	Atomrefraktion für D	Nach Landolt für C	Nach Brühl für C
H	1	1,051	1	1,051	1,04	1,103
C'	11,97	2,494	12	2,501	2,48	2,365
C^0	11,97	2,586	12	2,592	2,48	—
O'	15,96	1,517	16	1,521	1,58	1,506
O^2	15,96	1,679	16	1,683		1,655
O''	15,96	2,281	16	2,287	2,34	2,328
$/=$	...	1,707	...	1,707	1,78	1,836
$/\equiv$	—	—	—	—	—	2,22
Cl	35,37	5,976	35,5	5,998	6,02	6,014
Br	79,76	8,900	80	8,927	8,95	8,303
J	126,54	14,12	126,5	14,12	13,99	13,808

rend C^0 sich auf einzeln stehenden bezieht, O' ist Hydroxylsauerstoff, O^2 Äthersauerstoff, der also an zwei Kohlenstoffatome gekettet ist, O'' ist Aldehydsauerstoff, $/=$ bezieht sich auf das Refraktionsinkrement bei einer Doppelbindung, $/\equiv$ bei einer dreifachen Bindung. Der Unterschied in den Werten für den alleinstehenden C^0- und den in fortlaufenden Ketten stehenden C'-Kohlenstoff ist sehr klein; derjenige zwischen dem Äther- und Hydroxylsauerstoff ist sehr deutlich, derjenige zwischen dem Hydroxyl- und Aldehydsauerstoff sehr groß. Auch die Atomrefraktionen der einwertigen Elemente Cl, Br, J usw. haben je nach deren Stellung verschiedene Werte, die Molekularrefraktion ist also eine konstitutive Eigenschaft (vgl. S. 77).

Der obige Satz ergibt sich aus allgemeinen Theorien, falls ein Atom in seinem optischen Verhalten beim Eintritt in die Verbindung keine oder doch stets eine gleiche Veränderung erfährt. Vorausgesetzt ist aber nicht notwendig, daß die Atome mit der ihnen im unverbundenen Zustande zukommenden Atomrefraktion eintreten. Der Satz muß seine Gültigkeit verlieren, wenn die obigen Annahmen nicht erfüllt sind. Hierin ist wohl auch der Grund zu suchen, daß für dasselbe Element die Werte der Atomrefraktion r andere werden, wenn es Doppelbindungen usw. eingeht (s. weiter oben), daß also die Atomrefraktion je nach der Art der Bindung eine verschiedene ist.

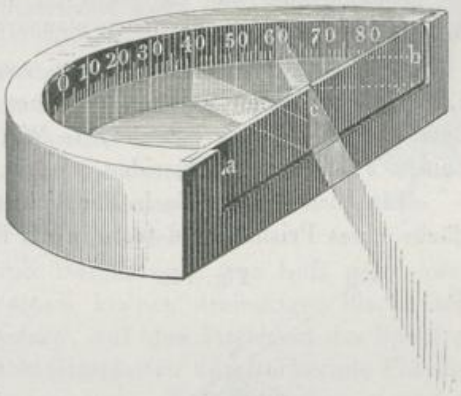
1. Vorübung.

I. Bestimmung des Brechungsindex mit einem halbkreisförmigen Flüssigkeitstrog.

Gebraucht wird: Halbkreisförmiges Gefäß mit Teilung; Wasser und Terpentinöl; Argandbrenner oder Glühlampe mit geradem Faden.

Apparat (Fig. 147). Ein etwa 10 cm hohes Gefäß ist auf der einen Seite durch eine ebene Glasfläche ab, auf der anderen Seite durch eine halbkreisförmige, vertikale Wand begrenzt. Erstere ist bis auf einen schmalen, vertikalen Spalt in ihrer Mitte bei c undurchsichtig.

Fig. 147.



Auf dem Halbkreise ist eine Gradteilung angebracht. Sie beginnt da, wo das auf ab in c errichtete Lot, d. h. das Einfallslot, die Kreisfläche schneidet. Der Trog wird zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllt. Der Gradstrich, auf welchen der oberhalb der Flüssigkeit durch den Spalt gehende Strahl trifft, gibt den Einfallswinkel, derjenige, auf welchen der durch die Flüssigkeit gehende gelangt, den Brechungswinkel.

Übung. 1. Man füllt den Trog mit Wasser, stellt eine Gas- oder Glühlampe in einiger Entfernung von dem Spalte c auf und dreht die Vorderfläche des Troges um eine vertikale Achse, die durch den Spalt c geht, um verschiedene Winkel gegen den einfallenden Strahl.

2. Man liest die zusammengehörigen Einfallswinkel $i_1, i_2, i_3 \ldots$ und Brechungswinkel $r_1, r_2, r_3 \ldots$ ab und sucht deren Sinus in der Tafel der trigonometrischen Funktionen (Tab. am Schlusse des Buches) auf; dann ist

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \frac{\sin i_2}{\sin r_2} = \cdots$$

3. Derselbe Versuch wird, nach sorgfältigem Austrocknen des Troges, mit Terpentinöl[1]) angestellt.

Bei sehr großen Einfallswinkeln sieht man auf dem Halbkreise ein schmales Spektrum; das Rot ist weniger abgelenkt als das Blau, ersteres hat den kleineren Brechungsindex.

---

[1]) Sollte das Terpentinöl bei ungenügendem Trocknen des Troges durch suspendierte Wassertröpfchen getrübt sein, so filtriert man es durch Filtrierpapier.

Beispiel: Wasser $n = 1{,}33$, Terpentinöl $n = 1{,}50$, hiernach ist letzteres optisch dichter (vgl. S. 250); die optisch dichteren Medien haben nicht immer eine größere Dichte, denn Terpentinöl hat eine kleinere Dichte als Wasser.

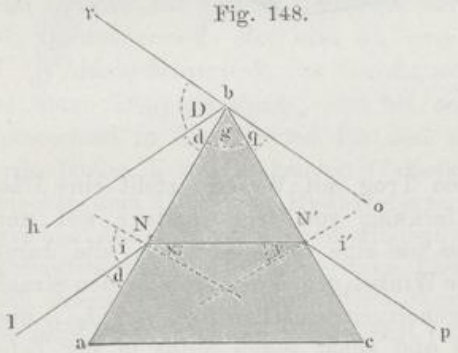
II. Bestimmung der Brechungsindizes mittels eines Spektrometermodells.

Gebraucht wird: Spektrometermodell; Glasprisma von 60°, Hohlprisma mit Schwefelkohlenstoff; Argandbrenner, Bunsenbrenner; Chlorlithium, -natrium, -strontium; drei Platinbleche an Platindrähten, Stativ dazu. (Um stets die Platinbleche usw. zusammen zu haben, sind in ein Holzbrett drei Löcher gebohrt für die die Salze enthaltenden Pulvergläser, dahinter drei kleinere Löcher für Reagiergläser, in welche die Platinbleche mit den sie tragenden Glasröhren gesteckt werden, und zwei größere Löcher, in welche der Bunsenbrenner und das Stativ für die Platinbleche passen.) Eine vollkommen und eine unvollkommen planparallele Glasplatte.

Prinzip. Prismen sind von zwei ebenen, sich in einer geraden Linie schneidenden Flächen begrenzte Körper; der Prismenwinkel oder hier speziell der brechende Winkel ist der Winkel, in dem die beiden Flächen sich schneiden.

Ein Lichtstrahl falle in der Richtung lN, Fig. 148, auf die Vorderfläche eines Prismas und trete in der Richtung $N'p$ aus demselben aus.

Fig. 148.



Er wird also durch das Prisma um den Winkel D abgelenkt, der gebildet wird durch die lN und $N'p$ parallelen Linien hb und bo. Diese Ablenkung setzt sich zusammen aus derjenigen beim Eintritte in das Prisma und derjenigen beim Austritte aus demselben. Die erste hängt ab von dem Einfallswinkel i und dem Brechungsindex n, welche zusammen den Winkel x (Brechungswinkel) bestimmen; die zweite von dem Winkel y und dem Brechungsindex, welche den Austrittswinkel i' bestimmen; y selbst ist aber abhängig von x und der Neigung der zweiten Fläche des Prismas gegen die erste, d. h. dem brechenden Winkel g, so daß also D abhängt von i, n und g.

Ein Minimum der Ablenkung (s. w. u.) tritt ein, wenn der Austrittswinkel i' gleich dem Einfallswinkel i ist; dann durchsetzt der Strahl das Prisma symmetrisch, wie in obiger Figur; i ist dann durch n und g bestimmt, kann also in der Gleichung für die Ablenkung durch diese Größen ersetzt werden. In diesem Falle ist

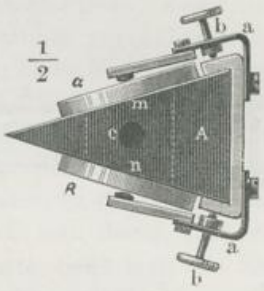
$$n = \frac{\sin {}^1/_2\,(g + D)}{\sin {}^1/_2\, g}.$$

Zur Bestimmung von n muß man also 1. den brechenden Winkel g und 2. das Minimum der Ablenkung D bestimmen [1]).

Apparat. Wir benutzen zu den Versuchen ein dreiseitiges Prisma aus Glas; die der brechenden Kante b gegenüberliegende Fläche desselben ist mattiert oder geschwärzt, um störende Lichtreflexe abzuschwächen.

Um ein Flüssigkeitsprisma herzustellen, bringt man die Flüssigkeit in sogenannte Hohlprismen. Ein Glasprisma A, Fig. 149, ist mit einer Durchbohrung mn versehen, von der bei c eine Öffnung nach oben führt, in die man ein Thermometer einsetzen kann. Die seitlichen Öffnungen von m und n werden mit planparallelen Glasplatten α und β verschlossen, die die Lichtstrahlen nicht ablenken, sondern nur sich selbst parallel verschieben; sie werden durch die Federn a und a festgehalten. Das Prisma wird mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt. Untersucht man mehrere Flüssigkeiten nacheinander, so wird stets dazwischen durch Ausspülen mit Wasser, Alkohol und Äther oder mit den letzteren beiden allein gereinigt und durch Durchsaugen von Luft getrocknet. Das ganze Hohlprisma wird in einem kleinen dreieckigen Blechuntersatze, mit etwa 5 mm hohen Rändern, auf das Tischchen des Spektrometers gesetzt, damit zwischen den Glasplatten durchsickernde Flüssigkeit nicht auf das Spektrometer gelangt. Die Glasflächen α und β der Glasplatten werden sorgfältig abgewischt, da sonst das Bild verwaschen erscheint.

Fig. 149.



Bei anderen Hohlprismen sind die Deckplatten α und β aufgekittet.

---

[1]) Stellt man nicht auf das Minimum ein, so muß man auch den Einfallswinkel an der ersten Fläche des Prismas messen und findet folgende Gleichungen, wenn i der Einfallswinkel an der ersten Prismenfläche, r der Austrittswinkel an der zweiten ist und I und R die zu i und r zugehörigen Winkel im Prisma sind (Ed. Ketteler, Beobachtungen über die Farbenzerstreuung der Gase. Bonn, A. Henry, 1865):

$$1.\quad n = \frac{\sin \frac{1}{2}(i+r)}{\sin \frac{1}{2} g} \cdot \frac{\cos \frac{1}{2}(i-r)}{\cos \frac{1}{2}(I-R)}, \text{ wo } 2.\ g + D = i + r,$$

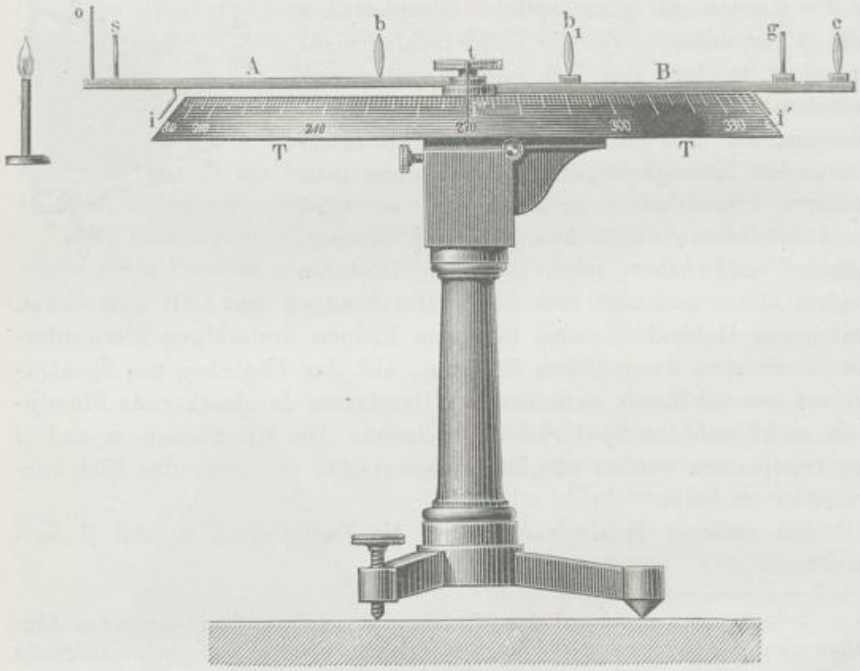
$$3.\quad \tan g \tfrac{1}{2}(I-R) = \frac{\tan g \frac{1}{2}(i-r)}{\tan g \frac{1}{2}(i+r)} \tan g \tfrac{1}{2} g.$$

Man bestimmt g, D, wie unten angegeben ist, i dadurch, daß man erst auf den Spalt einstellt (Ablesung μ), dann auf den an der Eintrittsfläche reflektierten Strahl (Ablesung ν), dann ist $i = 90 - \frac{1}{2}(\mu - \nu)$; aus g, D und i ergibt sich aus 2. r, also auch $i - r$ und $i + r$, dann folgt aus 3. $I - R$ und endlich aus 1. n. Sobald $i = r$, wird $I = R$, und n nimmt den oben angegebenen Wert an, das Prima steht dann im Minimum der Ablenkung.

Um die Richtung der einfallenden und gebrochenen Strahlen zu bestimmen, werden die Prismen auf ein Spektrometer gestellt; wir lassen die Übungen zunächst mit einem Modelle eines solchen anstellen. Dasselbe ist einem von Weinhold angegebenen nachgebildet.

Eine runde Xylolithplatte T, Fig. 150 (57 cm Durchmesser, 3,0 cm Dicke), ist an ihrem abgeschrägten Rande mit einer Kreisteilung versehen. In der Mitte von T ist ein kleiner, runder Tisch t von 12 cm Durchmesser angebracht, auf den man eventuell noch ein durch drei Stellschrauben verstellbares Tischchen stellen kann. Um die Achse des Tisches lassen sich die etwa 50 cm langen Holzschienen A und B

Fig. 150.



drehen; beide haben Zeiger i und i', die sich auf der Teilung bewegen. In A und B sind Nuten eingeschnitten, in denen sich Holzschieber verschieben lassen, auf denen die optischen Teile des Apparates befestigt sind. Die Holzschiene A entspricht dem Kollimator; sie trägt einen Spalt s mit verstellbaren Schneiden und eine Bikonvexlinse b mit einer Brennweite von etwa 34 cm. Die Schiene B entspricht dem Beobachtungsfernrohre; sie trägt eine Bikonvexlinse b_1 von derselben Brennweite wie b, eine Fassung g, in die eine matte oder durchsichtige Glasplatte, auf welche je ein $\times$ mit Tusche gezeichnet ist (vgl. Fig. 151), eingeschoben werden kann, und endlich eine als Lupe dienende bikonvexe Linse c von 5 cm Brennweite, das Okular. Die Striche auf den Glasplatten vertreten das Fadenkreuz der Meßinstrumente; wir nennen

das Strichkreuz auch hier „Fadenkreuz". Der Tisch t ist mit einem Arme mit einem auf der Teilung spielenden Index i'' verbunden. An dem Ende des Kollimatorfernrohres ist mittels eines Schiebers ein Schirm o mit Öffnung zur Abhaltung von Nebenlicht eingeschoben.

Übung 1. Einstellung des Apparates. 1. Man nimmt zunächst die Kollimatorlinse b heraus und bestimmt deren Brennweite φ, indem man den Abstand ermittelt (s. S. 279), in dem sie von einem weit entfernten Gegenstande ein deutliches Bild entwirft.

2. Man schiebt die Linse ein und stellt den Spalt in der Entfernung φ von der Kollimatorlinse auf.

3. Man stellt eine Lampe vor das Kollimatorfernrohr, dreht das Beobachtungsfernrohr, bis es dem Kollimatorfernrohre gegenüber steht, und schiebt die durchsichtige Glasplatte mit dem Fadenkreuze so lange vor und zurück, bis das Bild des Spaltes und das Fadenkreuz möglichst scharf erscheinen, und bis beim Verschieben des Auges nach rechts und links vor dem Okulare das Fadenkreuz sich nicht gegen das Bild des Spaltes verschiebt; dann fallen beide genau in dieselbe Ebene. Das Okular wird dabei stets so verschoben, daß man durch dasselbe das Bild scharf sieht. Auf der matten Glasplatte sieht man die Erscheinung objektiv, man sieht das Bild des Spaltes selbst; hier stellt man auf möglichste Schärfe ein.

Übung 2. Prüfung einer Platte auf Planparallelität, d. h. darauf, ob ihre beiden ebenen Flächen genau parallel sind.

1. Man stellt das Beobachtungsfernrohr dem Kollimator gegenüber und dreht dasselbe so lange, bis das vertikale Bild s des Spaltes durch den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geht (Fig. 151), „man stellt auf den Spalt ein".

Fig. 151.

2. Man bringt zwischen Kollimator und Beobachtungsfernrohr eine Spiegelglasplatte, so daß sie die obere Hälfte der Objektivöffnung bedeckt. Bleibt die Lage des Spaltbildes ungeändert, so ist die Platte planparallel; treten zwei Spaltbilder auf, so lenkt die Platte die Strahlen ab, sie ist prismatisch.

Übung 3. Bestimmung des Prismen- oder brechenden Winkels. Man stellt vor den Spalt eine Lampe.

a) Erste Methode (Fig. 152 und 154 a. f. S.). 1. Man stellt das Prisma so auf den Tisch t, daß es seine Kante den einfallenden, vom Spalte s kommenden Strahlen zukehrt.

2. Man dreht das Beobachtungsfernrohr c und bestimmt am Teilkreise die beiden Stellungen desselben, bei denen die Bilder, welche die vom Spalte ausgegangenen Strahlen nach ihrer Reflexion an den Flächen 1 und 2 in dem Fernrohre erzeugen, mit dem Fadenkreuze zusammenfallen; die Stellungen seien a und b.

Der brechende Winkel ist dann $g = {}^1/_2\,(a - b)$.

Zu achten ist darauf, daß, wenn a etwa auf der anderen Seite des Nullstriches liegt wie b, $g = {}^1/_2\,(a + 360^0 - b)$ ist; ist z. B. $a = 20^0$, $b = 260^0$, so ist $g = {}^1/_2\,(380 - 260) = 60^0$.

Fig. 152.

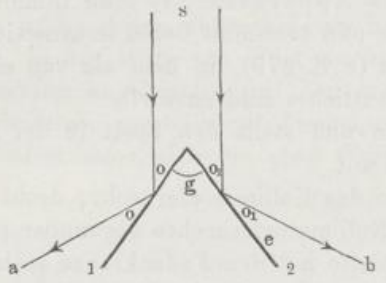


Fig. 153.

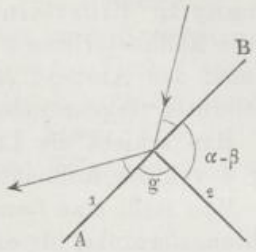


Fig. 154.

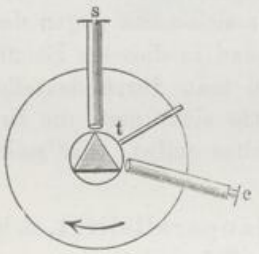


Fig. 155.

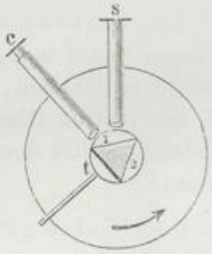
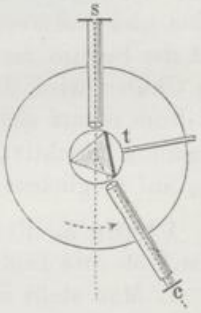
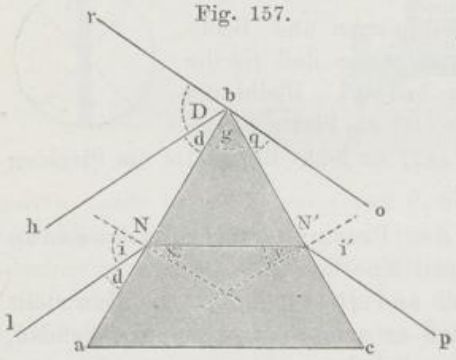


Fig. 156.



b) Zweite Methode (sie entspricht den Messungen am Wollastonschen Goniometer) (vgl. Fig. 153 und Fig. 155). 1. Man stellt die beiden Fernrohre s und c gegeneinander fest, so daß sie einen spitzen Winkel miteinander bilden.

Fig. 157.



2. Man setzt den drehbaren Tisch t so auf, daß sein Zeiger sich über den Teil des Kreises hin bewegt, der nicht zwischen den beiden Fernrohren liegt, und setzt das Prisma auf den Tisch t.

3. Man dreht den Tisch, bis das Spiegelbild des Spaltes an der Fläche 1 sich mit dem Fadenkreuze deckt, und liest die Stellung des Tisches ab: Lage A, Ablesung α.

4. Man dreht den Tisch, bis das Spiegelbild an 2 sich mit dem Fadenkreuze deckt: Lage B, Ablesung β; dann ist der Winkel des Prismas, d. h. der brechende Winkel

$$g = 180 - (\alpha - \beta).$$

Übung 4. Bestimmung der Ablenkung für beliebige Strahlen. Man beleuchtet zunächst den Spalt s durch weißes Licht.

1. Man stellt ohne Prisma das Fadenkreuz des Fernrohres c auf den Spalt ein und erhält so die Richtung der einfallenden Strahlen lN bzw. hb (Fig. 156 u. Fig. 157). Lage des Fernrohres am Teilkreise: x.

2. Man setzt das Prisma auf den Tisch t (Fig. 156) und sucht mit dem Auge das Bild des Spektrums; dann dreht man das Fernrohr an die Stelle des Auges, so daß man das Spektrum im Fernrohre sieht, und stellt das Fadenkreuz auf das Gelb.

3. Man dreht das Prisma, und zwar so, daß das Gelb nach der Lage des nicht abgelenkten Strahles hinrückt, d. h. nach der Seite hin, nach welcher die brechende Kante gelegen ist, und rückt mit dem Fernrohre nach. Das Spektrum bewegt sich bei dieser Drehung eine Zeitlang in demselben Sinne, dann steht es eine kurze Zeit still, darauf geht die Bewegung in die entgegengesetzte über. Bei derjenigen Stellung des Prismas, bei der der Stillstand eintritt, sind die gebrochenen Strahlen den direkten am nächsten gelegen, sie haben die kleinstmögliche Ablenkung erfahren, das Prisma steht im Minimum der Ablenkung.

4. Man läßt das Prisma im Minimum der Ablenkung stehen und liest die Lage des auf Gelb eingestellten Fernrohres ab; man erhält die Richtung der abgelenkten Strahlen $N'p$ bzw. bo. Lage des Fernrohres y.

Berechnung. Die Ablenkung ist $D = y - x$, denn um $y - x$ ist der einfallende Strahl durch das Prisma aus seiner Richtung abgelenkt worden. Der Brechungsindex für das Gelb ist daher:

$$n = \frac{\sin {}^1/_2\,(D + g)}{\sin {}^1/_2\, g}.$$

Bemerkung. Da beim Durchgange des weißen Lichtes durch ein Prisma ein Farbenband, ein „Spektrum" (vgl. S. 233), entsteht, dessen verschiedene Teile eine verschiedene Ablenkung erfahren, eine Erscheinung, die man mit dem Namen Dispersion bezeichnet, so besitzen die verschiedenen Farben verschiedene Brechungsindizes.

Man muß die Indizes für Strahlen von verschiedener, aber bestimmter Wellenlänge ermitteln; die bloße Angabe, daß der Brechungsindex für das Rot oder Blau bestimmt sei, genügt nicht, da jede Farbe eine große Anzahl von Strahlen umfaßt.

Als Maß der Dispersion in einem Teil des Spektrums benutzt man den Unterschied der Brechungsindizes zweier bestimmter Linien, die in demselben gelegen sind, für das ganze Spektrum die Differenz der Brechungsindizes der Linien A und H des Sonnenspektrums.

Übung 5. Bestimmung der Brechungsindizes für Strahlen von bestimmter Wellenlänge. Die Messungen werden für die Natrium-, Lithium- und die blaue Strontiumlinie angestellt; man

stellt dazu vor den Spalt des Spektrometers eine durch die Dämpfe dieser Metalle gefärbte Bunsenflamme, indem man die Chloride derselben in einem Platinsiebe in die Flamme führt (vgl. bei Spektralanalyse). Während das Licht der Natrium- und Lithiumflamme sehr lange anhält, verschwindet das der Strontiumflamme schnell, man bringt daher zunächst das Platinsieb mit dem Chlorstrontium nur in den Saum der Flamme und schiebt es dann allmählich tiefer hinein (den weißen Ansatz auf dem Platin entfernt man nachher mit etwas Salzsäure).

Die Messungen werden wie bei Übung 4. durchgeführt.

Beispiel: Crownglasprisma von 60° und Hohlprisma mit Schwefelkohlenstoff von 60°. Es ergibt sich ein sehr viel größerer Brechungsindex beim Schwefelkohlenstoff, eine sehr viel größere Gesamtdispersion und ein stärkeres Anwachsen der Dispersion vom Rot nach dem Blau als beim Crownglas.

2. Bestimmung des Brechungsindex mit dem Spektrometer.

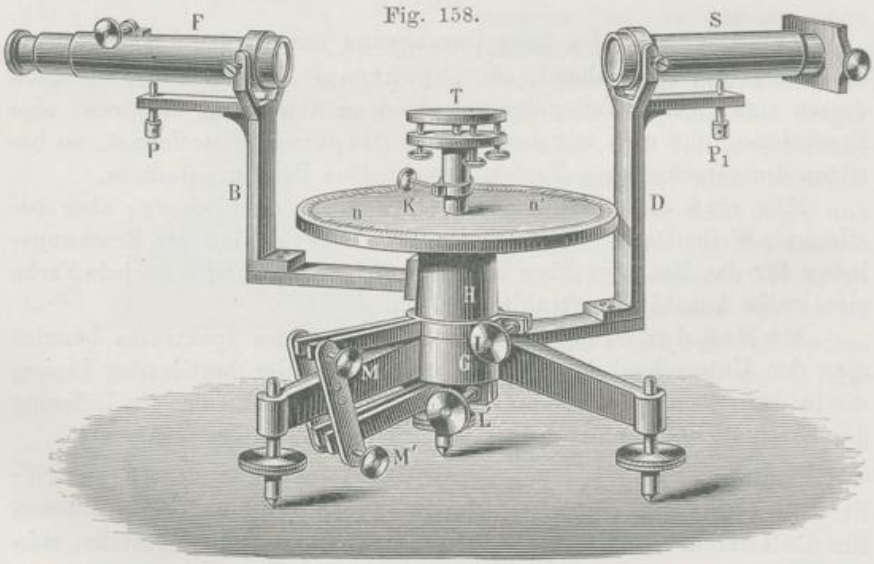
Gebraucht wird: Spektrometer; Gaußsches Okular; Gaslampe; Glasprisma, Natriumflamme; kleines Induktorium mit zwei Tauchelementen; Geißlersche Röhre mit Wasserstoff; Verbindungsdrähte; Hohlprisma; Benzol; Pyknometer; Wage und Gewichte; Wasser; Methyl-, Äthyl-, Amylalkohol; konzentrierte Chlornatriumlösung; Acetaldehyd; Essigsäure.

Zur Messung der Brechungsindizes dient das Spektrometer.

Beschreibung und Einstellung des Spektrometers.

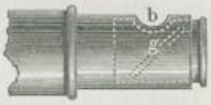
Apparat. Bei dem Spektrometer (Fig. 158) sind Spalt und Kollimatorlinse einerseits, Objektiv des Beobachtungsfernrohres, Faden-

Fig. 158.



kreuz und Okular anderseits je zu einem Fernrohre, dem Kollimator S und dem Beobachtungsfernrohre F verbunden. Das Okular läßt sich gegen das Fadenkreuz, Fadenkreuz und Okular zusammen gegen das Objektiv verstellen. Über der Mitte des Spaltes ist ein dünner Platindraht befestigt, die Verbindungslinie zwischen ihm und dem Mittelpunkte der Kollimatorlinse ist die Achse des Kollimators. Die Fäden des Fadenkreuzes werden unter 45° gegen die Horizontale geneigt (Fig. 151). Die Verbindungslinie zwischen dem Schnittpunkte des Fadenkreuzes und dem Mittelpunkte des Fernrohrobjektivs ist die Achse des Beobachtungsfernrohres. Statt des gewöhnlichen Okulars kann man auch ein Gaußsches (Fig. 159) einsetzen. Dasselbe ist an der Seite mit einer Öffnung b versehen; vor dieselbe ist im Inneren des Rohres eine unter 45° gegen die Fernrohrachse geneigte Glasplatte g gestellt. Setzt man vor b eine Lichtquelle, so reflektiert die Platte Licht nach dem Fadenkreuze und beleuchtet dieses. Hat man kein Gaußsches Okular, so beleuchtet man das Fadenkreuz dadurch, daß man vor der Okularlinse eine Glasplatte unter 45° befestigt und von der Seite beleuchtet.

Fig. 159.



Fadenkreuz und Spalt müssen sich im Brennpunkte der zugehörigen Linsen befinden, die Achsen der Fernrohre senkrecht zur Drehungsachse stehen, und die brechende Kante des Prismas muß parallel der Drehungsachse sein.

Übung. Einstellung des Spektrometers.

A. Einstellen des Beobachtungsfernrohres auf Unendlich.

a) Erste Methode. 1. Man stellt das Okular scharf auf das Fadenkreuz ein. 2. Man richtet das Fernrohr auf einen entfernten Gegenstand, z. B. einen Blitzableiter, und verstellt das Okular mit dem Fadenkreuze so lange, bis bei einer seitlichen Verschiebung des Auges Fadenkreuz und Bild unverändert ihre relative Lage behalten.

b) Zweite Methode. Man stellt auf den Tisch T eine planparallele Glasplatte, setzt das Gaußsche Okular ein, beleuchtet das Fadenkreuz und dreht die Glasplatte um die vertikale Achse so lange, bis das Bild, welches die an dem Fadenkreuze vorbeigegangenen und an der Glasplatte reflektierten Strahlen von der Blende erzeugen, im Gesichtsfelde erscheint. Dann neigt man die Platte durch Drehen an den Schrauben des Tischchens T, bis das Bild des Fadenkreuzes, welches die an der Glasplatte reflektierten Strahlen erzeugen, mit diesem selbst zusammenfällt, und verstellt das Okular mit dem Fadenkreuze so lange, bis bei Bewegungen des Auges Fadenkreuz und Bild des Fadenkreuzes unverändert ihre Lage gegeneinander beibehalten.

B. Senkrechtstellen der Fernrohrachse zur Drehungsachse.

a) Man stellt auf den Tisch eine planparallele Glasplatte, beleuchtet das Fadenkreuz und sucht das reflektierte Bild des Fadenkreuzes auf.

Fallen Bild und Fadenkreuz zusammen, so steht die Achse des Fernrohres senkrecht zur Ebene der Glasplatte. Ist dies nicht der Fall, so korrigiert man die Abweichung zunächst durch Neigen der Glasplatte mittels der Schrauben an dem Tische T. Dann dreht man die Glasplatte um 180°. Ist die Glasplatte parallel zu der Drehungsachse und steht die Fernrohrachse senkrecht zu derselben, so fällt wiederum Bild und Fadenkreuz zusammen; ist dies nicht der Fall, so korrigiert man zur Hälfte an der Platte, zur Hälfte an dem Fernrohre durch Drehen an der Schraube P. Dann dreht man die Platte um 180° und überzeugt sich von der Koinzidenz von Bild und Fadenkreuz, bzw. korrigiert etwaige Abweichungen. So fährt man fort, bis vollständige Koinzidenz hergestellt ist.

b) Ist die Glasplatte parallel zur Drehungsachse, steht die Fernrohrachse senkrecht auf der Glasplatte und fällt, wie es bei guten Instrumenten sein muß, die Drehungsachse des Fernrohres mit der des Tisches zusammen, so steht nach den Einstellungen unter a) auch die Fernrohrachse senkrecht zu der Drechungsachse desselben. Man überzeugt sich davon dadurch, daß man das Fernrohr um 180° dreht und prüft, ob wiederum Koinzidenz des Fadenkreuzes und seines Bildes vorhanden ist. Ist sie nicht vollkommen vorhanden, so läßt man den Tisch stehen, dreht das Fernrohr um 180° hin und her und neigt Glasplatte und Fernrohr so lange, bis Koinzidenz eintritt. Es ist zweckmäßig, zunächst die Glasplatte wenigstens angenähert nach a) richtig zu stellen.

C. Einstellen des Kollimators auf Unendlich und Senkrechtstellen desselben auf die Drehungsachse.

Man stellt das Beobachtungsfernrohr dem Kollimator gegenüber auf und zieht das den Spalt tragende Rohr so lange aus, bis das Bild des Spaltes scharf ist und bei den Bewegungen des Auges sich nicht mehr gegen das Fadenkreuz verschiebt, dann steht der Spalt in der Brennweite der Kollimatorlinse.

Man neigt das Kollimatorrohr mit der Schraube P_1, bis das Bild des durch den übergespannten Draht bezeichneten Mittelpunktes M des Spaltes mit dem Schnittpunkte des Fadenkreuzes zusammenfällt.

D. Prüfung einer Platte auf Planparallelität.

Übung wie S. 259.

E. Aufstellung des Prismas, so daß die brechende Kante parallel der Drehungsachse ist.

Man stellt das Prisma so auf, daß eine Fläche senkrecht auf der Verbindungslinie zweier Schrauben des Tisches T steht, da dann beim Drehen an der dritten Schraube diese Fläche nur in sich selbst gedreht wird.

I. Zur Bestimmung des brechenden Winkels.

a) Methode b) S. 260. Man dreht an den den Tisch tragenden Schrauben, bis das Bild der Mitte des Spaltes M, sowohl bei der einen

wie bei der anderen Stellung des Prismas mit dem Schnittpunkte des Fadenkreuzes zusammenfällt.

b) Methode a) S. 259. Man dreht an den den Tisch tragenden Schrauben, bis das Bild von M sowohl bei der einen wie bei der anderen Stellung des Fernrohres mit dem Fadenkreuze zusammenfällt.

Dies ist auch die Methode der Einstellung, wenn das Spektrometer als Goniometer nach E. Mitscherlich dient (vgl. S. 245).

II. Zur Bestimmung der Ablenkung.

a) Ist der Tisch drehbar und fällt seine Drehungsachse mit derjenigen des Fernrohres zusammen, so dreht man denselben mit dem nach I. a) richtig gestellten Prisma so lange, bis dasselbe im Minimum der Ablenkung steht. Man überzeugt sich, daß der zu einer das ganze Spektrum durchziehenden horizontalen Linie ausgezogene mittlere Punkt des Spaltes M durch den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geht.

b) Will oder kann man den Tisch nicht um große Winkel drehen, oder fällt seine Drehungsachse nicht mit derjenigen des Fernrohres zusammen, so stellt man das Prisma in das Minimum der Ablenkung, stellt zunächst das Fernrohr auf das von der dem Spalte zugewandten Fläche reflektierte Bild ein und neigt diese Fläche durch Drehen an den Schrauben am Tische, bis das Bild von M und das Fadenkreuz zusammenfallen, stellt dann auf das Spektrum ein und dreht an den Schrauben, bis die dunkle Horizontallinie durch das Fadenkreuz geht; dann stellt man wieder auf das reflektierte Bild ein und fährt so fort, bis in beiden Stellungen Koinzidenz stattfindet.

Hierauf neigt man das Kollimatorfernrohr ein klein wenig, damit nicht die schwarze Linie die Stellen des Spektrums verdeckt, auf welche das Fadenkreuz eingestellt wird.

Die Messung der Brechungsindizes gestaltet sich, wie oben angegeben ist [1]).

Übung. Brechungsindex und Wellenlänge, Dispersion. Die Messungen werden angestellt an einem Glasprisma für das gelbe Natriumlicht, die rote und blaue Linie im Wasserstoffspektrum (über die Herstellung des Wasserstoffspektrums s. bei Spektralanalyse).

Beispiel: Für Glas: $n_{H\alpha} = 1{,}5268$, $n_{\mathrm{Na}} = 1{,}5296$, $n_{H\beta} = 1{,}5361$. Für $H\alpha$ ist $\lambda = 656{,}3$, also $\lambda_1^2 = 4{,}307 \,.\, 10^5$, für $H\beta$ ist $\lambda = 486{,}1$, also $\lambda_2^2 = 2{,}363 \,.\, 10^5$ und $\lambda_1^2 - \lambda_2^2 = 1{,}944 \,.\, 10^5$. Aus den Werten für $n_{H\alpha}$ und $n_{H\beta}$ ergibt sich (vgl. S. 251): $A = 1{,}5157$, $B = 4781$, daraus folgt n_{Na} $(\lambda = 59\,8{,}3) = 1{,}5291$, was mit dem beobachteten Werte nahe übereinstimmt.

---

[1]) Um für verschiedene Teile des Spektrums die Brechungsindizes zu bestimmen, muß man für jede Linie von neuem auf das Minimum der Ablenkung einstellen, sonst muß man nach den Formeln S. 257 rechnen; bei nicht sehr genauen Messungen genügt es, diese Lage für einen Strahl im mittleren Teile des Spektrums aufzusuchen, dann ist sie nahezu auch für die anderen Strahlen vorhanden.

Übung. Brechungsindex und Dichte. 1. Das Hohlprisma wird mit Benzol gefüllt.

2. Der Brechungsexponent n wird für die Natriumlinie bestimmt.

3. Die Dichte d wird mittels des Pyknometers bestimmt.

Die Ausdrücke ϱ_n und ϱ_{n^2} (S. 252) werden berechnet.

Übung. Brechungsindex von Gemischen. Es werden untersucht: 1. Wasser, 2. NaCl-Lösung, 3. Benzol, 4. Methylalkohol, 5. Amylalkohol, 6. Mischung aus Methylalkohol und Benzol, 7. Mischung aus Methyl- und Amylalkohol. Für jede Substanz wird bestimmt:

1. Der Brechungsindex für die D-Linie nach S. 265.
2. Die Dichte mit dem Pyknometer nach S. 58.

Daraus berechnet man die spezifischen Brechungsvermögen der Flüssigkeiten; ferner berechnet man für die Mischungen 6. und 7. nach der oben angegebenen Formel das spezifische Brechungsvermögen und vergleicht den berechneten Wert mit dem beobachteten.

Beispiel: Mischungen von Äthyl- und Amylalkohol.

Übung. Brechungsindex und chemische Konstitution. Untersucht werden: 1. Wasser, 2. Benzol, 3. Methylalkohol, 4. Äthylalkohol, 5. Amylalkohol, 6. Acetaldehyd, 7. Essigsäure. Für diese Körper werden die Brechungsindizes und die Dichten bestimmt; daraus die molekularen Brechungsvermögen R nach beiden Formeln berechnet und mit ihrer Hilfe die Atomrefraktionen der einzelnen in ihnen enthaltenen Elemente, wie es im Beispiele angegeben ist.

Beispiel:

	CH_4O	C_2H_6O	$C_5H_{12}O$	C_2H_4O	$C_2H_4O_2$	H_2O
d (20° C) =	0,8029	0,7875	0,8089	0,7799	1,0485	0,9984
${}^nD$ =	1,3371	1,3615	1,4071	1,3316	1,3737	1,3330
M =	32	46	88	44	60	18
$R = M\varrho_n$ =	13,44	21,12	44,29	18,71	21,39	6,00
$R = M\varrho_{n^2}$ =	8,29	12,94	26,79	11,53	13,06	3,71

Daraus folgt für die Gruppe CH_2 die nach beiden Formeln konstante Differenz von 7,70 bzw. 4,63. Für die Atomrefraktion des mit zwei Valenzen an C gebundenen Sauerstoffs O″ folgt aus R für C_2H_4O'' $(= [(CH_2)_2 + O''])$ $r = 3{,}31$ bzw. 2,27. Für den in $C_2H_4O'O'' = ([CH_2)_2 + O''] + O')$ mit einer Valenz gebundenen Sauerstoff O′ ist $r = 2{,}68$ bzw. 1,53. Hiernach erhält man unter Benutzung der Werte für H_2O für die Atomrefraktion des Wasserstoffs 1,66 bzw. 1,09, und für die Atomrefraktion der mit einer Valenz gebundenen Kohlenstoffatome 4,38 bzw. 2,45.

IV. Totale Reflexion.

Einleitung.

Gebraucht wird: Totalreflektometer von F. Kohlrausch; Schwefelkohlenstoff; Brenner mit Platinlöffel und Chlornatrium; Glasplatte; Glasplatte mit eingeschliffener Höhlung und Deckgläschen; Topaskristall.

Abbes Refraktometer mit Tabelle; Cassiaöl; Flußspatkristall.

Totalreflektometer nach Pulfrich mit Zubehör.

Ist n der Brechungsindex für den Übergang des Lichtes aus Luft in ein optisch dichteres Medium, etwa in Glas, i' der Einfallswinkel in der Luft, r' der Brechungswinkel im Glase, so ist:

$$\frac{\sin i'}{\sin r'} = n,$$

wo $n > 1$ ist. Geht der Strahl aus Glas in Luft, ist i der Einfallswinkel im Glase, r der Brechungswinkel in der Luft, so ist (vgl. S. 250):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n} = \nu \quad \text{und} \quad \sin r = n \sin i,$$

wo $\nu < 1$ ist. $\sin r$ kann nie größer als 1, r nie größer als 90^0 werden, also kann der Lichtstrahl nur so lange aus dem Glase in die Luft austreten, als $n \sin i < 1$ ist; dann tritt ein Teil des Lichtes in die Luft aus, ein Teil wird „partiell" reflektiert. Wird $\sin i$ und damit i so groß, daß $n \sin i > 1$ ist, so wird alles Licht reflektiert: wir haben „totale" Reflexion. Eine totale Reflexion kann demnach nur stattfinden, wenn das Licht aus einem optisch dichteren auf ein optisch dünneres Medium fällt. Der Winkel J, bei dem die totale Reflexion beginnt, heißt Grenzwinkel der totalen Reflexion, für ihn ist:

$$\sin J = \frac{1}{n} = \nu.$$

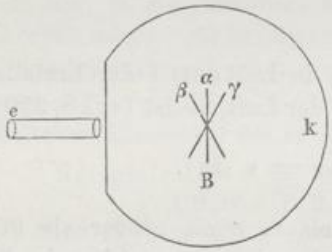
Fallen Strahlen bei wachsenden Einfallswinkeln auf die Grenze von Glas und Luft, so erkennt man den Eintritt der totalen Reflexion an der plötzlichen Zunahme der Helligkeit des reflektierten Lichtes.

Fallen Strahlen im dichteren Medium unter dem Grenzwinkel der totalen Reflexion auf die Grenze, so treten sie streifend aus, es ist $\sin r = 1$, $r = 90^0$; fallen umgekehrt Strahlen streifend im dünneren Medium auf die Grenze, so treten sie unter dem Grenzwinkel der totalen Reflexion ein.

1. Totalreflektometer von F. Kohlrausch.

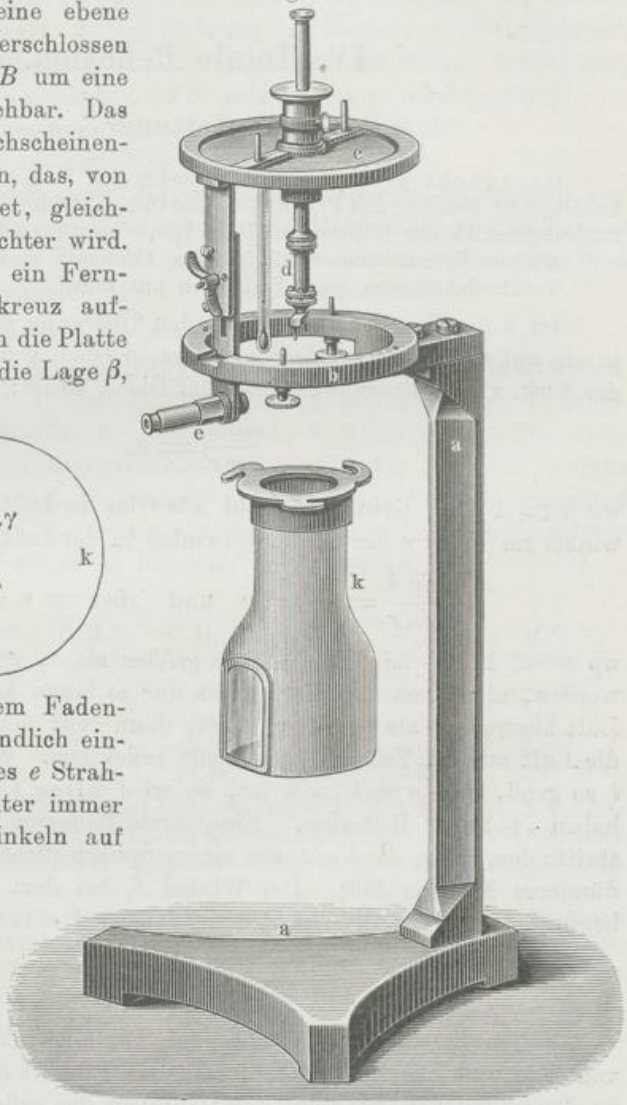
Prinzip. In dem mit stark brechender Flüssigkeit (Schwefelkohlenstoff oder dem weniger leicht brennbaren Monobromnaphthalin) gefüllten Gefäße k (Fig. 160 und 161), das vorn durch eine ebene Spiegelglasplatte verschlossen ist, ist die Platte B um eine vertikale Achse drehbar. Das Gefäß ist mit durchscheinendem Papier umgeben, das, von rückwärts beleuchtet, gleichsam zum Selbstleuchter wird. Vor der Platte ist ein Fernrohr e mit Fadenkreuz aufgestellt. Dreht man die Platte aus der Lage α in die Lage β,

Fig. 160.



so werden auf dem Fadenkreuze des auf Unendlich eingestellten Fernrohres e Strahlen vereint, die unter immer größeren Einfallswinkeln auf die Platte B fallen. Ist der Brechungsindex der Platte kleiner als der der Flüssigkeit, so tritt bei einem bestimmten Winkel für die auf der linken Seite des Fadenkreuzes vereinten Strahlen totale Reflexion ein, während dies für die auf der rechten Seite noch nicht der Fall ist. Eine Grenze zwischen hellen und dunklen Teilen, die durch den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geht, durchzieht das Gesichtsfeld von oben nach unten.

Fig. 161.



Diejenigen von der beleuchteten Papierwand kommenden Strahlen, die gerade auf dem Fadenkreuze nach der Reflexion vereint werden, haben eine totale Reflexion erfahren. Ihr Einfallswinkel ist nach dem Satze von Gleichheit des Reflexions- und Einfallswinkels gleich dem Winkel, den die Normale auf der reflektierenden Fläche mit der Fernrohrachse bildet. Dreht man die Platte aus der Lage β durch α nach γ, bis wieder dieselbe Erscheinung eintritt, so entspricht diese Drehung dem doppelten Grenzwinkel der totalen Reflexion J zwischen Flüssigkeit und festem Körper.

Wir erhalten aus J zunächst den Brechungsindex ν für den Übergang aus der umgebenden Flüssigkeit in Glas. Um den Brechungsindex n aus Luft in Glas zu erhalten, muß man ν mit dem Brechungsindex aus Luft in die Flüssigkeit N (s. S. 251) multiplizieren, es ist also:

$$n = N\nu = N \sin J.$$

Apparat. Das Gefäß k (Fig. 161) wird mittels Bajonettverschluß in dem Ringe b befestigt. Auf ihm ruht die Platte c, welche an ihrem Rande eine Teilung trägt. Durch ihre Mitte geht die Stange d, welche durch eine Druckschraube gehalten wird. Am Ende von d, welches gewöhnlich eine in zwei Kugelgelenken bewegliche Klemme zum Festhalten der zu messenden Substanzen trägt, kann auch eine Platte h befestigt werden, an der hinter einem kleinen Fenster plattenförmige Körper durch eine Feder i festgehalten werden. Die Platte c trägt außerdem ein Thermometer und das Fernrohr e.

Um den Brechungsindex einer Flüssigkeit zu bestimmen, gießt man sie in eine Höhlung in einer ebenen Glasplatte, welche zwischen i und h eingeklemmt wird; die Flüssigkeit schließt man durch eine aufgelegte dünne, planparallele Glasplatte gegen die Umgebung ab.

Der Einfluß der Glasplatte fällt aus der Bestimmung heraus; man bestimmt zwar die Grenze der totalen Reflexion an Glas und Flüssigkeit, die Richtung der reflektierten Strahlen aber wird bei dem Austritte aus Glas in die umgebende Füllflüssigkeit so geändert, daß der Winkel, den man beobachtet, der gleiche ist wie der Grenzwinkel bei totaler Reflexion an der Grenze von dieser Flüssigkeit und der zu untersuchenden Substanz.

I. Einfach brechende Körper.

A. Brechungsindex einer Glasplatte.

Übung. 1. Man befestigt an dem Träger d die Platte möglichst parallel zu der Achse und hängt das mit der stark brechenden Flüssigkeit gefüllte Gefäß k an b.

2. Man stellt eine Natriumflamme auf die rechte Seite (Vorsicht bei Verwendung des Schwefelkohlenstoffs!) und dreht die Platte so lange, bis die Grenze der totalen Reflexion das Fadenkreuz schneidet; die Lage der Platte wird an beiden Alhidaden abgelesen und das Mittel α gebildet.

3. Dasselbe wird auf der linken Seite wiederholt und wieder an beiden Alhidaden abgelesen: β. Dann ist:

$$J = {}^1/_2(\alpha - \beta).$$

Der Brechungsindex ist:

$$n = N \sin {}^1/_2(\alpha - \beta).$$

Bei Schwefelkohlenstoff ist der Brechungsindex N für Natriumlicht bei 20^0 1,6277 und nimmt für 1^0 Temperaturerhöhung um 0,0008 ab; bei Monobromnaphthalin ist $N = 1{,}66624 - 0{,}00045 \,.\, t^0$.

B. Brechungsindex einer Flüssigkeit (Wasser $n = 1{,}3306$).

Übung. 1. Man füllt die Höhlung der oben erwähnten Glasplatte mit Flüssigkeit, setzt das Deckgläschen auf, ohne eine Luftblase einzuschließen, und klemmt beide fest.

2. Die Bestimmung des Brechungsindex ist dem Obigen zufolge ganz ebenso wie bei A. (Die der Totalreflexion an der Grenzfläche von Wasser und Glas entsprechende Grenze zwischen Hell und Dunkel, die man hier zu benutzen hat, ist diejenige, welche die Teile größter von denen mittlerer Dunkelheit trennt; die andere rührt von der Reflexion zwischen der Füllflüssigkeit und dem Glase her.)

II. Brechungsindex eines Kristalles.

Bei einem doppeltbrechenden Kristall entstehen aus einem einfallenden Strahl zwei gebrochene (vgl. VIII. Polarisation), die verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, also auch verschiedene Brechungsindizes haben, für die also bei verschiedenen Einfallswinkeln totale Reflexion eintritt. Dreht man eine Platte eines doppeltbrechenden Kristalles in einem stark brechenden Medium von kleinen Einfallswinkeln zu immer größeren, so ist, ehe überhaupt für einen Strahl totale Reflexion eintritt, das Gesichtsfeld von dem partiell reflektierten Lichte beider Strahlen erleuchtet; bei einem bestimmten Einfallswinkel wird der Strahl (a) mit dem kleineren Brechungsindex total reflektiert, man sieht eine Grenze zwischen weniger hell und heller; bei weiterem Drehen wird auch der zweite Strahl total reflektiert, man erhält eine zweite Grenze (b) zwischen zwei verschieden hellen Teilen. Meist sieht man beide Grenzen gleichzeitig im Gesichtsfelde, der Raum zwischen beiden erscheint, obgleich er überall gleich hell ist, durch Kontrast an den der totalen Reflexion anliegenden Stellen heller[1]).

Übung. Brechungsindex eines Topaskristalles. $n_a = 1{,}6120$, $n_b = 1{,}6208$. Es wird wie oben auf beide Grenzen eingestellt.

---

[1]) Über Messung mit einem Okularmikrometer ist die Arbeit von F. Kohlrausch selbst zu vergleichen (Wiedemanns Annalen 4, 1, 1878).

2. Totalrefraktometer von Abbe.

Prinzip. Zwei rechtwinkelige Prismen ABC und DEF (Fig. 162) mit ungleich langen Katheten werden mit ihren Hypotenusenflächen AC und ED aneinandergelegt, vor die Fläche BC ist noch ein rechtwinkeliges Prisma gekittet (CHG). Befindet sich zwischen AC und ED Luft oder eine Substanz von kleinerem Brechungsindex als das Glas, so wird beim Drehen der Prismen um eine durch O gehende, zur Ebene der Zeichnung senkrechte Achse ein in der Richtung WV das System durchsetzender Lichtstrahl bei einer gewissen Stellung der Prismen an der Fläche ED total reflektiert. Ein in der Richtung V gelegenes Auge sieht dann eine in W gelegene homogene Lichtquelle plötzlich, eine weiße, nachdem sie eine Reihe von Farben durchlaufen hat, verschwinden: die verschiedenen Farben erfahren sukzessiv eine totale Reflexion, und die übrigbleibenden geben eine Mischfarbe. Flüssigkeiten bringt man direkt zwischen die Prismen. Feste Körper schleift man zu dünnen Platten, legt sie mit einem Tropfen einer Flüssigkeit, die stärker bricht als sie selbst und sie nicht angreift, zwischen die Prismen. Solche Flüssigkeiten sind Cassiaöl ($n = 1{,}60$), Zimtaldehyd ($n = 1{,}62$), Monobromnaphthalin ($n = 1{,}66$), Arsenbromür ($n = 1{,}781$), Naphthylphenylketon ($n_B = 1{,}664$, $n_E = 1{,}678$), Metacinnamen ($n_D = 1{,}593$).

Die dünne Flüssigkeitsschicht zwischen dem Prisma und dem zu untersuchenden Körper ist ohne Einfluß auf die Resultate.

Statt das durchgehende Licht zu betrachten, kann man auch das in der Richtung SO eintretende und nach OV total reflektierte untersuchen, man hat dann ein Totalreflektometer [1]).

Apparat (Fig. 163, a. f. S.).

An dem Fernrohre OJ, in welchem bei F zwei Fadenkreuze ausgespannt sind, ist durch die Hülse T der Kompensator D befestigt, der die bei der Totalreflexion auftretende Farbenzerstreuung aufhebt und mißt. Derselbe besteht aus zwei gleichen Prismensätzen mit gerader Durchsicht (vgl. bei Spektralanalyse), die durch die Schraube t in entgegengesetzter Richtung gedreht werden können: für die an der auf D angebrachten Skala c abgelesene Stellung T gibt eine dem Instrumente beigegebene Tafel die Dispersion Δ, d. h. die Differenz der Brechungsindizes zwischen zwei angegebenen Linien des Sonnenspektrums. Das Fernrohr ist an dem Sektor A befestigt, der durch die Schraube K in einer solchen Stellung zu dem dem Fenster zugekehrten Spiegel g festgestellt wird, daß das Gesichtsfeld gleichmäßig hell erscheint.

Vor dem Fernrohre wird das Glasparallelepiped C Fig. 163 (vgl. auch Fig. 162), mittels eines Bajonettverschlusses befestigt und dadurch

---

[1]) Die Wirkungsweise der einzelnen Teile ist im Sohnckeschen Universalrefraktometer direkt verfolgbar.

mit der Alhidade B, die oben einen Index trägt, fest verbunden. An der auf A angebrachten Teilung werden die Brechungsindizes für das mittlere Gelb unmittelbar abgelesen.

I. Flüssigkeiten.

Übung. 1. Das Instrument wird gedreht, bis es fast horizontal liegt, und das bewegliche Stück des Doppelprismas durch Niederdrücken einer Feder entfernt.

2. Die Prismenflächen werden gereinigt, zwischen dieselben an den senkrecht zur Ebene der Zeichnung stehenden Kanten kurze Streifen

Fig. 162.

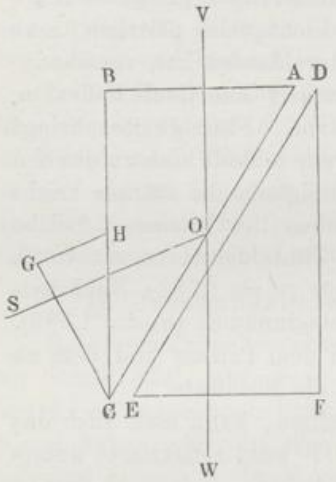
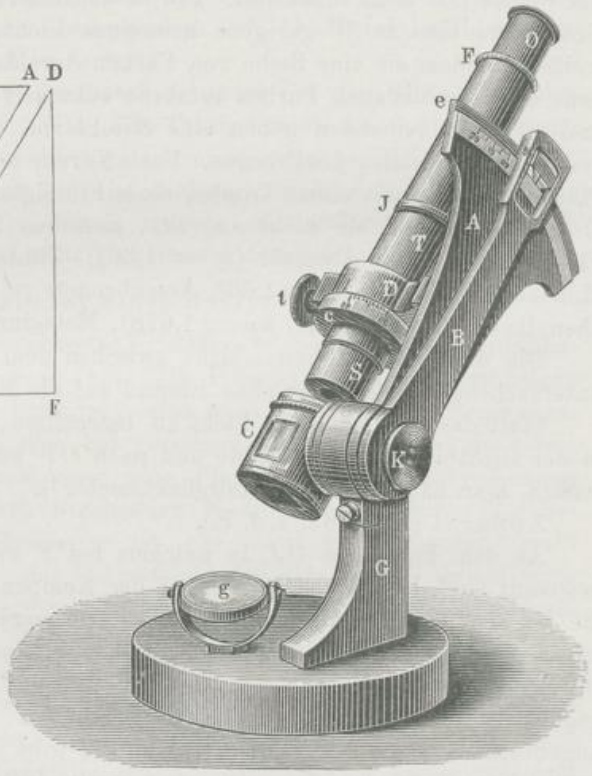


Fig. 163.



von dünnem Papier gelegt; auf die Fläche des festen Prismas wird ein Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit gebracht.

3. Das bewegliche Prisma wird eingesetzt, das Fernrohr herumgedreht und die Alhidade an den Anfang der Teilung gebracht; das Instrument und der Spiegel g werden so gestellt, daß das Gesichtsfeld gleichmäßig erleuchtet ist.

4. Man bewegt die Alhidade aufwärts, bis die untere Hälfte des Gesichtsfeldes dunkel erscheint; dieselbe ist von dem oberen hellen Teile des Gesichtsfeldes durch einen farbigen Saum getrennt.

5. Durch Drehen an der Schraube t verwandelt man die Grenze zwischen Hell und Dunkel in eine möglichst farblose Linie.

6. Man stellt durch Drehen an der Alhidade die Grenzlinie auf die Durchschnittspunkte der Fäden und liest die Stellung der Alhidade (A_1) und der Trommel $D(T_1)$ ab.

7. Man dreht an dem Triebkopfe t so lange, bis die Grenzlinie zum zweiten Male farbenrein erscheint, stellt mit der Alhidade abermals ein und liest zum zweiten Male ab: A_2 und T_2.

Zur Berechnung dient eine dem Instrumente beigegebene Tafel.

Beispiele: Destilliertes Wasser, Alkohol, Monobromnaphthalin.

II. Brechungsindex von festen Körpern.

Übung. 1. Das Fernrohr wird umgelegt, das bewegliche Prisma abgenommen und ein Tropfen einer Flüssigkeit, die stärker als der zu untersuchende Körper bricht, z. B. Cassiaöl, auf das feste Prisma gebracht.

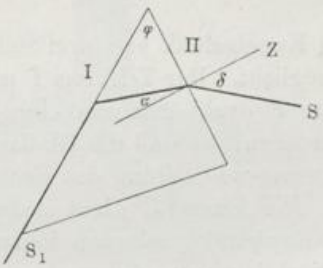
2. Der Körper wird mit einer ebenen, polierten Fläche auf das Prisma gelegt, das bewegliche Prisma wieder aufgesetzt und durch einen Drahtbügel auf demselben festgehalten. Das Fernrohr wird wieder herumgedreht und weiter wie unter I. verfahren.

Beispiel: Flußspat: Brechungsindex gegen Luft $n_{12} = 1{,}4331$.

3. Totalreflektometer nach Pulfrich.

Einleitung. Läßt man (Fig. 164) auf die eine Fläche I eines Prismas ein breites Strahlenbündel S_1 homogenen Lichtes streifend auffallen, so sieht man in einem Fernrohre in der Richtung S das an der Fläche II austretende Bündel S auf der einen Seite scharf abgeschnitten (Fig. 166): Die Grenzstrahlen entsprechen den auf I gerade streifend auftreffenden Strahlen. Ihr Austrittswinkel an der Fläche I ist gleich dem Grenzwinkel der totalen Reflexion.

Fig. 164.



Ist δ der Austrittswinkel für die Grenzstrahlen an der Fläche II, φ der brechende Winkel, so ist:

$$\sqrt{N^2 - 1} = \frac{\cos\varphi + \sin\delta}{\sin\varphi}.$$

Denn es ist $N = \sin\delta/\sin\alpha$ und an Fläche I $N = 1/\sin(\varphi - \alpha)$. Man eliminiert α.

Grenzt die Fläche I nicht an Luft, sondern an eine beliebige Substanz vom Brechungsindex n, so ist

$$n = \sin\varphi\sqrt{N^2 - \sin^2\delta} - \cos\varphi\sin\delta.$$

Ist $\varphi = 90^0$, so wird

$$n = \sqrt{N^2 - sin^2 \delta}.$$

Statt eines dreiseitigen Prismas verwendet man zweckmäßiger einen Würfel, auf dessen Oberfläche man die zu untersuchende Substanz legt. Flüssigkeiten bringt man in einen auf die horizontale Fläche aufgekitteten Trog. Den Gang der von links kommenden Strahlen und das Bild, welches das Auge direkt bzw. im Fernrohre sieht, geben die Fig. 165 und 166.

Apparat. Er ist im wesentlichen ein kleines Spektrometer ohne Kollimatorrohr, dessen Drehungsachse horizontal gestellt ist (Fig. 167).

Auf den rechtwinkeligen Würfel P ist ein Glasrohr G gekittet, das zur Aufnahme der zu untersuchenden Körper dient. In Flüssigkeiten wird ein Thermometer t eingesetzt. P wird von einem besonders konstruierten, auf der Fußplatte des Instrumentes befestigten Träger in seiner Stellung ein für allemal festgehalten. Die Justierung wird durch eine Art von Kugelgelenk und drei Stellschrauben unter dem Halter des Würfels ermöglicht. Der Teilkreis T mit dem auf Unendlich eingestellten Fernrohre F dreht sich um eine horizontale Achse A. Das Fernrohr ist gebrochen, so daß die Okularachse O stets horizontal bleibt und jede gezwungene Stellung des Beobachters vermieden ist.

Fig. 165.

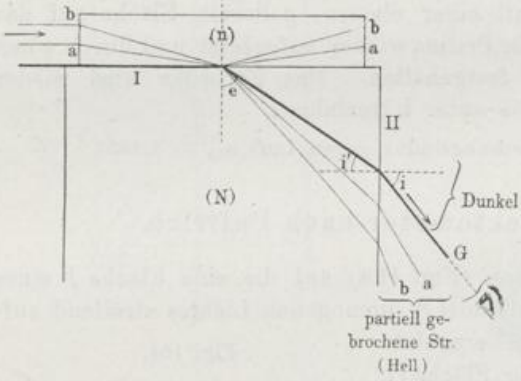
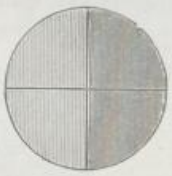


Fig. 166.



Die Linse L dient dazu, das von der Lichtquelle kommende Strahlenbündel schwach konvergent zu machen. Der Würfel wird so justiert, daß die Achse des Fernrohres bei der Nullstellung desselben der Normalen auf der Würfelfläche II parallel ist. Man stellt mittels Stell- und Mikrometerschraube das Fadenkreuz genau auf die Trennungslinie des Gesichtsfeldes ein und liest den entsprechenden Winkel δ ab.

Übung 1. Justierung des Würfels. 1. Man stellt das Fernrohr auf den Teilstrich 0 des Teilkreises fest ein, setzt vor das Okular des Fernrohres 45^0 gegen die Achse geneigt ein Glasplättchen (Gaußsches Okular) und verstellt den Würfel P so lange, bis der Horizontalfaden mit seinem Spiegelbilde in der vertikalen Fläche sich deckt.

2. Man dreht das Fernrohr um 90° und verfährt mit der horizontalen Fläche des Würfels ebenso, möglichst ohne an der Einstellung der vertikalen Fläche etwas zu ändern. Man wiederholt das Verfahren, bis bei beiden Lagen eine Deckung des Fadens mit seinem Spiegelbilde stattfindet.

Stellt man dann das Fernrohr auf irgend einen Strahl nach seinem Austritte an der Fläche II ein, so erhält man direkt die Winkel δ.

Übung 2. Bestimmung der Konstanten N des Würfels. 1. Man füllt den Glastrog G mit destilliertem Wasser, stellt in dasselbe ein Thermometer und beleuchtet mit Na-Licht.

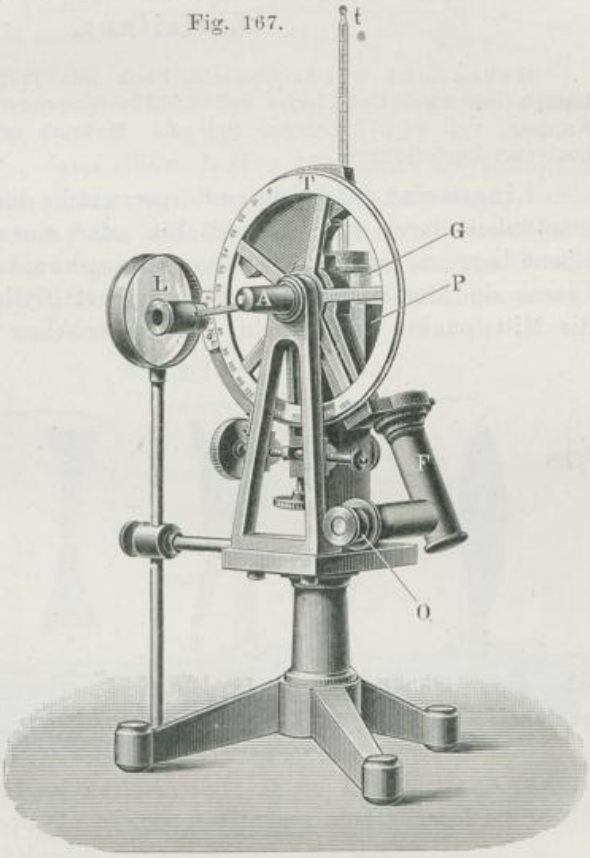
2. Man stellt das Fadenkreuz des Fernrohres auf die Grenze zwischen Hell und Dunkel und liest den Winkel δ ab.

3. Man berechnet die Größe N nach der Formel

$$N = \sqrt{n^2 + sin^2\,\delta}$$

indem man den Brechungsindex n des Wassers aus Tabelle 18 entnimmt.

Fig. 167.



Übung 3. Bestimmung des Brechungsindex von Flüssigkeiten. Man verfährt wie bei Übung 2 und berechnet mit dem dort gefundenen N die Werte von n.

Übung 4. Bestimmung des Brechungsindex von festen Körpern, etwa Quarz. Man gießt in den Trog G Wasser und legt in dieses ein auf der unteren Fläche und einer Seite eben geschliffenes Stück des zu untersuchenden Körpers und bestimmt für denselben den Winkel δ, daraus erhält man dann n. (Der Einfluß der dünnen planparallelen Schicht der Flüssigkeit zwischen dem Prisma und dem festen Körper fällt bei der Berechnung heraus [S. 269].)

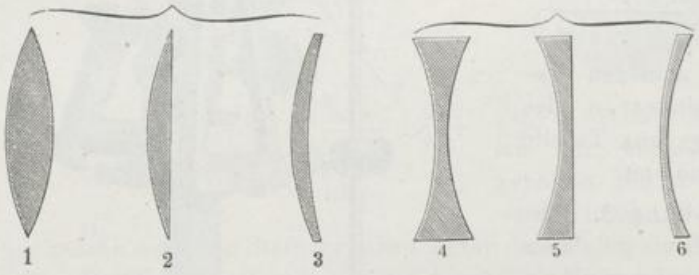
V. Linsen und optische Instrumente.

Einleitung.

Gebraucht wird: Optische Bank mit Trägern und Papierschirm; Lampe mit zwei Cylindern, vgl. S. 247; Konvex- und Konkavlinsen mit Kappen, vgl. S. 277; ebenso Spiegel. Maßstab mit senkrecht daran befestigtem Papierschirm.

Linsen sind durchsichtige Körper, welche durch bestimmte Flächen, gewöhnlich durch zwei Kugelflächen oder eine Kugelfläche und eine Ebene begrenzt sind. Sie heißen dann sphärische Linsen. Andere Linsen sind durch Cylinderflächen begrenzt: Cylinderlinsen. Die durch die Mittelpunkte der Kugeln einer sphärischen Linse gelegte Gerade

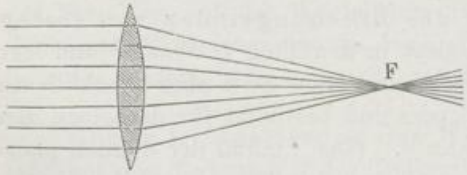
Fig. 168.



oder die durch den Mittelpunkt der einen Kugel gehende und auf der ebenen Fläche senkrecht stehende Gerade heißt die Achse der Linse.

Man unterscheidet (Fig. 168) Sammellinsen 1 bis 3 und Zerstreuungslinsen 4 bis 6. Bei ersteren wächst die Dicke nach der Mitte zu, bei letzteren nimmt sie nach der Mitte hin ab. Man unterscheidet noch: bikonvexe Linsen Nr. 1, plankonvexe Nr. 2, konkav-konvexe Nr. 3, bikonkave Nr. 4, plankonkave Nr. 5, konvexkonkave Nr. 6.

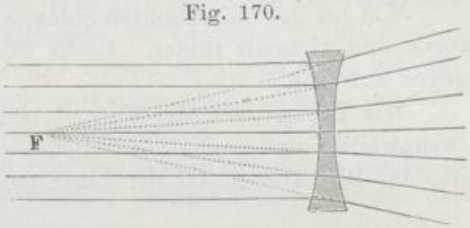
Fig. 169.



Die Sammellinsen vereinigen parallel auffallende, etwa von der Sonne kommende Strahlen in einem Punkte F (Fig. 169), dem Brennpunkte. Hält man in ihn ein Blatt Papier, so erhält man ein reelles Bild der Sonne. Die Zerstreuungslinsen werfen parallel

auffallende Strahlen auseinander, und zwar so, als ob diese aus einem Punkte F (Fig. 170) vor der Linse kämen. In diesem Punkte F schneiden sich die Strahlen nicht wirklich, sondern nur ihre Verlängerungen nach rückwärts, man kann sie hier nicht auffangen, man hat einen virtuellen Zerstreungspunkt (vgl. S. 243): Sammellinsen haben reelle Brennpunkte, Zerstreuungslinsen virtuelle.

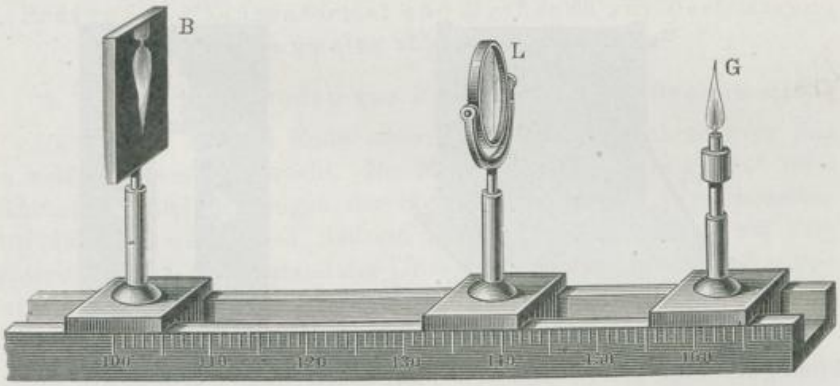
Fig. 170.



Die Entfernung f des Punktes F von der Linse nennt man bei den Sammellinsen Brennweite, bei den Zerstreuungslinsen Zerstreuungsweite oder negative Brennweite.

Stellt man vor eine Sammellinse L (Fig. 171) einen Gegenstand G in der Entfernung a von der Linse, „der Gegenstandsweite", welche größer als die Brennweite f ist, auf, so werden die von einem jeden Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen wieder in einem Punkte vereinigt; man erhält ein Bild B des Gegenstandes in der Entfernung b

Fig. 171.



„der Bildweite" von der Linse. Für Sammellinsen wie für Zerstreuungslinsen gilt allgemein die Formel:

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

Bei Sammellinsen ist f positiv, bei Zerstreuungslinsen negativ. Ein negativer Wert von b bedeutet, daß das Bild auf derselben Seite wie der Gegenstand liegt.

Die Gegenstandsgröße L verhält sich zur Bildgröße l wie die Gegenstandsweite zur Bildweite, d. h. es ist

$$L : l = a : b.$$

Das Verhältnis der Flächen des Gegenstandes G und des Bildes g ist:

$$G : g = L^2 : l^2 = a^2 : b^2.$$

Das Bild ist größer als der Gegenstand, wenn $b > a$ ist. l/L ist die lineare Vergrößerung durch die Linse.

Wie bei den gekrümmten Spiegeln erhält man auch bei den Linsen reelle und virtuelle Bilder. Reelle Bilder sind verkehrt, virtuelle dagegen aufrecht.

Wir haben nach der Formel reelle Bilder, wenn bei gegebener Brennweite f und gegebener Gegenstandsweite a die Bildweite b positiv ist, das Bild also hinter der Linse liegt, virtuelle, wenn b negativ ist.

I. Vorübung.

Auf Schlitten der optischen Bank, Fig. 171 (vgl. S. 277), werden gesetzt: eine Lampe mit Schwarzblechcylinder, wie auf S. 241, eine Sammel- oder eine Zerstreuungslinse und ein Schirm. Zum Befestigen der Linsen können Schieber (Fig. 172) aus Zinkblech, die an einer Seite Nuten tragen und die durch a_1 und a_2 gestützt werden, dienen. In sie passen mit Ausschnitten versehene Zinkbleche, in denen die Linsen, Hohlspiegel usw. befestigt werden. Als Gegenstand dient eine

Fig. 172.

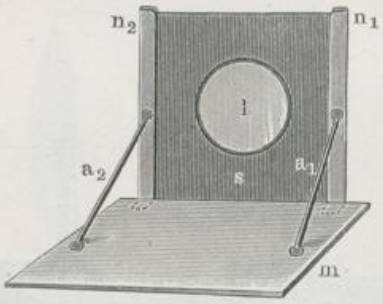


Fig. 173.

Pfeilfigur, Fig. 173; dieselbe ist in dickes, undurchsichtiges Papier geschnitten, das auf eine matte Glasplatte aufgeklebt ist, welche von einer Lampe durchleuchtet wird.

Übung. Die Linse wird aus großer Entfernung dem Gegenstande genähert und die Lagen des Schirmes aufgesucht, bei denen die Bilder auf ihm scharf erscheinen; ferner wird die wechselnde Größe derselben beachtet. Sind bei großer Annäherung keine Bilder mehr zu erhalten, so nimmt man den Schirm fort und beobachtet direkt mit dem Auge: Man überzeugt sich davon, daß bei den Stellungen der Linse, bei denen dieselbe reelle, verkehrte Bilder auf dem Schirme liefert, man auch verkehrte Bilder sieht, und zwar an den Stellen, wo sie vorher auf dem Schirme entstanden. Für Stellungen der Linse, bei denen man keine Bilder mehr auf dem Schirme erhält, sieht man aufrechte, virtuelle Bilder.

Man findet die folgenden Beziehungen zwischen Lage und Größe von Bild und Gegenstand:

1. Sammellinsen: Von $a = \infty$ bis $a = 2f$, d. h. wenn der Gegenstand aus der Unendlichkeit bis in die doppelte Brennweite heranrückt, hat man reelle, verkehrte, kleinere Bilder zwischen der Brennweite und der doppelten Brennweite. — Von $a = 2f$ bis $a = f$, d. h. wenn der Gegenstand von der doppelten Brennweite bis zur Brennweite rückt, erhält man reelle, verkehrte, größere Bilder zwischen der doppelten Brennweite und der Unendlichkeit. — Von $a = f$ bis $a = 0$, d. h. wenn der Gegenstand von der Brennweite bis an die Linse heranrückt, hat man virtuelle, aufrechte, größere Bilder, die aus der Unendlichkeit bis an die Linse heranrücken.

2. Zerstreuungslinsen: Von $a = \infty$ bis $a = 0$, d. h. wenn der Gegenstand von der Unendlichkeit bis an die Linse heranrückt, hat man virtuelle, aufrechte, kleinere Bilder. Ist a negativ, d. h. liegt der Gegenstand hinter der Linse, so wird b positiv, und man erhält reelle Bilder. Dieser Fall tritt ein, wenn auf eine Zerstreuungslinse ein konvergentes Strahlenbündel fällt, das ohne dieselbe ein Bild hinter der Linse entwerfen würde (s. S. 284 und das holländische Fernrohr).

II. Prüfung der Linsenformel und Methoden zur Bestimmung der Brennweite von Sammellinsen.

A. Direkte Methoden zur Bestimmung der Brennweite.

a) **Übung 1.** Am Ende eines Maßstabes ist senkrecht zu ihm ein weißer Schirm angebracht. Der Maßstab wird so geneigt, daß seine Richtung parallel derjenigen der Sonnenstrahlen ist; längs desselben wird die Linse verschoben, bis ein scharfes Bild der Sonne auf dem Papiere entsteht; der Abstand der Linse von dem Papiere ist die Brennweite. Statt der Sonne kann man auch das Bild eines fernen irdischen Gegenstandes, etwa eines Hauses, entwerfen.

b) **Übung 2.** Strahlen, welche von dem Brennpunkte ausgehen und auf eine Linse fallen, werden von dieser parallel gemacht.

1. Ein Fernrohr wird auf einen entfernten Gegenstand scharf eingestellt, so daß das Bild desselben und das Fadenkreuz bei einer Bewegung des Auges sich nicht gegeneinander verschieben, dann ist das Fernrohr „parallaxenfrei“ eingestellt: die parallel auf die Objektivlinse des Fernrohres auffallenden, von dem Gegenstande kommenden Strahlen werden auf dem Fadenkreuze vereint, dieses steht genau in der Brennebene des Objektivs.

2. In einiger Entfernung vom Fernrohre stellt man ein bedrucktes Blatt Papier, den Pfeil (Fig. 173) oder eine durch- oder beleuchtete Skala auf und stellt zwischen diese und das Fernrohr die zu untersuchende Linse.

3. Man verschiebt die Linse, bis man durch das Fernrohr den Gegenstand möglichst scharf erkennt und er sich bei einer Verschiebung des Auges nicht gegen das Fadenkreuz verschiebt.

4. Man mißt den Abstand zwischen Linse und Gegenstand: Brennweite f.

B. Prüfung der Linsenformel und Benutzung derselben zur Bestimmung der Brennweite.

Aus der Gleichung S. 277 folgt aus der Gegenstandsweite a und der Bildweite b für die Brennweite

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

Auf die optische Bank werden Schlitten mit der Lampe mit dem Schwarzblechcylinder mit der großen Öffnung, Fig. 141, oder einer auf Glas geteilten Skala, einer Sammellinse und einem weißen Schirm gesetzt oder entsprechende Schieber (Fig. 172).

Übung. 1. Man stellt den Schirm in einer bestimmten Entfernung vom Gegenstande auf und verschiebt die Linse so lange, bis auf dem Schirme ein deutliches Bild der Öffnung oder Skala entsteht.

2. Man liest an der Teilung die Stellungen der Indizes an dem Schirm, der Öffnung im Cylinder oder der Skala und der Linse ab; die Lagen der Indizes auf der Bank mögen sein für Gegenstand x, Linse y, Schirm z, dann ist $a = y - x$, $b = z - y$.

3. Man mißt bei jeder Stellung die Größe l des Bildes; die Größe L des Gegenstandes ist immer die gleiche.

4. Die Übung wird bei verschiedenen Abständen a des Gegenstandes von der Linse ausgeführt. Man erhält nahezu denselben Wert von f. Er soll mit dem nach den Methoden A gefundenen übereinstimmen. Weiter wird geprüft, ob stets $l : L = b : a$ ist.

C. Methode von Bessel zur Bestimmung der Brennweite.

Stellt man den Schirm in einer nicht zu kleinen Entfernung (größer als die doppelte Brennweite) vom Gegenstande auf, so gibt es zwei Stellungen der Linse, bei denen auf dem Schirme ein scharfes Bild des Gegenstandes erscheint. Es rührt dies daher, daß in der Formel $1/a + 1/b = 1/f$ bei der zweiten Stellung der Linse das Bild als Gegenstand, der Gegenstand als Bild aufgefaßt werden kann. Ist f die Brennweite der Linse, A die Entfernung des Schirmes von dem Gegenstande und e der Abstand der beiden Stellungen der Linse, so ist:

$$f = \frac{1}{4}\left(A - \frac{e^2}{A}\right) = \frac{1}{4A}(A - e)(A + e).$$

Übung. 1. Man stellt auf der optischen Bank den Schirm in einer nicht zu kleinen Entfernung A vom Gegenstande auf und stellt

die Linse zwischen Gegenstand und Schirm so auf, daß ein scharfes Bild auf dem Schirme entsteht. Stellung des Gegenstandes x, des Schirmes z, der Linse y_1.

2. Man verschiebt die Linse (y_1) (aber ohne die Stellung des Schirmes und des Gegenstandes zu verändern), bis wiederum ein deutliches Bild entsteht; Stellung der Linse y_2, dann ist: $A = z - x$, $e = y_2 - y_1$.

D. Bestimmung der Brennweite einer Linse mit Hilfe eines Spiegels.

1. Auf der optischen Bank werden aufgestellt der Gegenstand G (Fig. 173), eine Sammellinse und hinter ihr ein ebener Spiegel.

2. Man verschiebt die Linse, bis das Bild, das sie von den am Spiegel reflektierten Strahlen entwirft, scharf und in gleicher Größe neben dem Gegenstande entsteht.

3. Man mißt den Abstand f von Linse und Gegenstand; f ist die Brennweite. In diesem Falle treten die von G kommenden Strahlen parallel aus der Linse aus, werden als paralleles Bündel vom Spiegel zurückgeworfen und daher neben dem Gegenstande zu einem gleich großen Bilde vereinigt.

E. Sphärische und chromatische Aberration der Linsen.

Die von den gewöhnlichen Linsen entworfenen Bilder sind nicht weiß, sondern von farbigen Säumen umgeben.

Übung. 1. Man rückt den Schirm von der Stellung größter Schärfe des Bildes zwischen V und R an die Linse heran, etwa nach

Fig. 174.

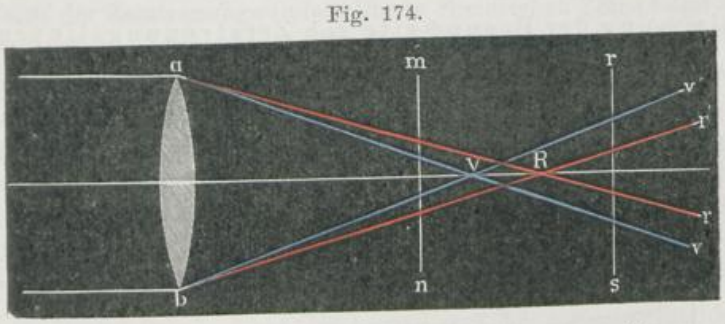


Fig. 175.

mn, Fig. 174, das Bild der Öffnung erscheint von einem gelblich-rötlichen Saume umgeben.

2. Man entfernt den Schirm etwa bis nach rs; der rote Saum verschwindet und ein blauer tritt am äußeren Rande des Bildes auf.

Erklärung. Die blauen Strahlen av, bv' werden stärker gebrochen und daher näher an der Linse bei V vereinigt, die roten ar, br' weiter von derselben bei R; die Stellung größter Schärfe entspricht der Vereinigung der hellsten, d. h. der gelben Strahlen. Aus

der Figur ist der Gang der roten und blauen Strahlen ersichtlich, auch wie sich die Reihenfolge der Farben von dem mittleren Strahle nach außen beim Übergange von mn nach rs umkehrt. Die auf der verschiedenen Brechbarkeit der Farben beruhende Abweichung der Linsenbilder nennt man die „chromatische Abweichung". Man kann sie und damit die farbigen Ränder durch Kombination zweier Linsen von verschiedenen Glassorten, z. B. einer Sammellinse aus Crownglas AA und einer Zerstreuungslinse aus Flintglas BB (Fig. 175), wesentlich vermindern; eine solche Linsenzusammenstellung heißt eine „achromatische Linse".

3. Das Bild der Drähte oder der Skalenteile ist nicht geradlinig, sondern gebogen (vgl. Fig. 186 bis 188). Diese Verzerrung hat ihren Grund in der sphärischen Gestalt der Linsenflächen und wird als „sphärische Aberration" bezeichnet.

4. Man setzt auf die Linse eine mit schwarzem Papier überzogene Kappe, welche in der Mitte ein etwa 2 cm weites Loch hat (ein Diaphragma, eine Blende), durch die man die Randstrahlen abblendet; das Bild wird lichtschwächer, aber sowohl farbenreiner als auch freier von sphärischer Abweichung. Es sind also vornehmlich die Randstrahlen, welche die Störung verursachen. Diese blendet man bei den optischen Instrumenten durch Blenden (Diaphragmen) ab.

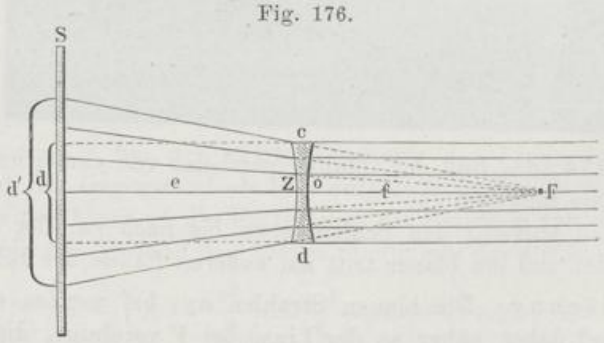
Die sphärische Abweichung kann man durch Anwendung mehrerer Linsen aus verschiedenem Glase korrigieren; ein solches Linsensystem, welches Bilder ohne merkliche Verzerrungen zeigt, wie es z. B. für photographische Zwecke nötig ist, nennt man aplanatische Linsen (Aplanate oder Antiplanete).

III. Bestimmung der Brennweite von Zerstreuungslinsen.

A. Direkte Methode.

Prinzip. Ein paralleles Strahlenbündel von kreisförmigem Querschnitt falle auf den Schirm S (Fig. 176) und beleuchte dort eine Fläche

Fig. 176.



vom Durchmesser d; wir stellen in den Weg der Strahlen eine Zerstreuungslinse Z in der Entfernung e von dem Schirme auf; sie macht

die parallelen Strahlen divergent, und diese erleuchten eine Fläche vom Durchmesser $d' > d$; die Strahlen scheinen von einem Punkte F zu kommen, der um die Zerstreuungsweite oder die virtuelle Brennweite f von der Linse absteht. Aus der Figur folgt:

$$d' : d = (e + f) : f,$$
$$f = e \,.\, d/(d' - d).$$

Stellt man den Schirm so, daß der Durchmesser des Zerstreuungskreises auf ihm doppelt so groß ist als derjenige des ursprünglichen Lichtkreises ohne Linse, so ist:

$$d' = 2\,d, \text{ also: } f = e,$$

die Zerstreuungsweite ist gleich dem Abstande von Schirm und Linse.

Übung 1. Bestimmung der Zerstreuungsweite (Nummer, Dioptrie) eines konkaven Brillenglases. 1. Auf einem Blatte Kartonpapier trägt man auf zwei senkrecht zueinander gezeichneten geraden Linien vom Schnittpunkte aus auf der einen den größten, auf der anderen den kleinsten Durchmesser der (meist ovalen) Linsenfassung nach beiden Seiten hin ab; die beiden zueinander senkrechten Linien sind dann doppelt so lang als die entsprechenden Durchmesser.

2. Man entwirft mit der Linse ein Zerstreuungsoval der Sonnenstrahlen auf dem Blatte, das senkrecht zur Richtung der Strahlen steht.

3. Man nähert die Linse so weit, daß entsprechende Punkte des Randes der Zerstreuungsfigur durch die vier bezeichneten Punkte gehen, dann ist der Durchmesser des Strahlenbündels auf dem Schirme gerade doppelt so groß wie in der Linse.

4. Man mißt die Entfernung e der Linse vom Schirme; sie ist gleich der Zerstreuungsweite. Die in rheinischen Zoll (1 Zoll = 2,6 cm) ausgedrückte Zerstreuungsweite ist die Brillennummer, die in 100 dividierte Centimeterzahl derselben die Dioptrie.

Bemerkung. Die von einem jeden Punkte der Sonne ausgehenden Strahlen sind zwar untereinander vollkommen parallel, aber da die Sonne nicht aus einem einzigen leuchtenden Punkte besteht, divergieren die Strahlen etwas; der Durchmesser des Strahlenbündels ist in einiger Entfernung vom Diaphragma größer als d. Indes beträgt die hierdurch hervorgerufene Divergenz nur etwa einen halben Grad.

Übung 2. 1. Über die Lampe auf der optischen Bank wird ein Schwarzblechcylinder mit kleiner runder Öffnung gestellt (vgl. S. 247).

2. Man stellt die Öffnung in den Brennpunkt einer Sammellinse mit einer kreisförmigen Blende; die von der Öffnung ausgehenden Strahlen verlassen die Linse als paralleles Strahlenbündel.

3. Man untersucht die Parallelität der Strahlen, indem man den Schirm in verschiedenen Abständen von der Linse aufstellt und prüft, ob der Durchmesser des hellen Kreises stets gleich groß bleibt. Man ändert die Stellung der Sammellinse, bis dies der Fall ist.

4. Man mißt den Durchmesser der Blende d.

5. Man stellt die Zerstreuungslinse Z zwischen Schirm und Sammellinse, bringt den Schirm in verschiedene Entfernungen e von Z und mißt die Größe des Durchmessers d' des hellen Kreises.

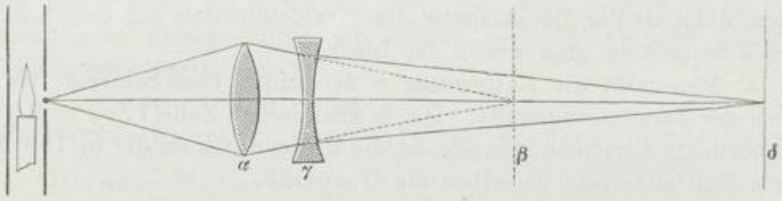
Aus zusammengehörigen Werten von e und d' ergibt sich f.

B. Indirekte Methode mit Hilfe der Linsenformel (S. 277).

Prinzip. Da parallel oder divergent auffallende Strahlen von einer Zerstreuungslinse γ nicht zu einem reellen Bilde vereint werden, so muß man, um mit ihr ein reelles Bild zu erhalten, konvergente Strahlen auf die Linse fallen lassen, die also einem hinter der Linse gelegenen Gegenstande, d. h. einem negativen a, zukommen. Die Strahlen mögen durch eine Sammellinse α konvergent gemacht sein. Wenn man dann die Zerstreuungslinse γ zwischen die Sammellinse und das reelle Bild β, welches sie für sich liefert, einschaltet, so kann das reelle Bild nicht mehr in β zustande kommen. Die Strahlen konvergieren schwächer, und liefern, wenn die ursprüngliche Konvergenz hinlänglich stark ist, etwa bei δ ein reelles Bild. Hierbei dient β gewissermaßen als virtueller Gegenstand für die Linse γ.

Übung. 1. Man stellt (Fig. 177) die Konvexlinse und den Schirm auf der Bank so auf, daß auf letzterem ein scharfes Bild der Öffnung

Fig. 177.



oder Skala entsteht. Es sei α die Lage der Linse, β die betreffende Lage des Schirmes (gemessen auf der optischen Bank).

2. Man stellt die Konkavlinse zwischen α und β in γ auf und verschiebt den Schirm so lange, bis wieder ein scharfes Bild erzeugt wird. Ist jetzt δ die Lage des Schirmes, so ist $a = -(\beta - \gamma)$, $b = +(\delta - \gamma)$, also:

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{\beta - \gamma} + \frac{1}{\delta - \gamma} \text{ und } f = \frac{(\beta - \gamma)(\delta - \gamma)}{\beta - \delta}.$$

f ist als Zerstreuungsweite negativ.

IV. Bestimmung der Brennweite von Linsensystemen.

Gebraucht wird: Optische Bank; mehrere konkave und konvexe Linsen; photographisches oder Fernrohrobjektiv; Stativ; Millimeterskala auf Glas mit Halter; intensive Lampe; zwei Meterstäbe.

A. Brennweite von zwei unmittelbar aneinander liegenden Linsen.

Stellt man zwei Linsen von den Brennweiten f_1 und f_2 unmittelbar hintereinander auf, so ist ihre gemeinsame Brennweite F gegeben durch

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad \text{oder} \quad F = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2}.$$

Fallen auf die erste Linse parallele Strahlen auf, so liefern sie in der Entfernung f_1 ein Bild, dieses dient für die zweite Linse als virtueller Gegenstand in der Entfernung $-f_1$, die zweite Linse erzeugt von ihm ein Bild in der Entfernung F, die sich aus der Gleichung S. 277 ergibt. Ist die zweite Linse konvex, Brennweite positiv, so ist $F < f_1$; ist sie konkav, Brennweite negativ, so ist $F > f_1$. Im ersten Falle ist die Brennweite des Systems größer als die der ersten Linse, im zweiten Falle dagegen kleiner.

Übung. 1. Man bestimmt a) für zwei konvexe Linsen, L_1 und L_2, und b) für eine konkave Linse, L_3, je für sich die Brennweite.

2. Man bestimmt die Brennweite des Systems L_1, L_2 und des Systems L_1, L_3 und vergleicht die berechnete Brennweite mit der gefundenen.

Bemerkung. 1. Ein normales Auge vereinigt Strahlen, die aus einer Entfernung von 25 cm, der sogenannten deutlichen Sehweite, kommen, auf der Retina; ein kurzsichtiges vereinigt sie vor derselben, die Brennweite seines Linsensystems ist zu klein; man setzt daher vor dasselbe eine konkave Linse. Ein weitsichtiges Auge vereinigt die Strahlen hinter der Retina, seine Brennweite ist zu groß, man korrigiert sie durch eine konvexe Linse.

2. Linsen mit sehr kleiner Brennweite müssen stark gekrümmt sein, dann treten aber die chromatische und sphärische Aberration sehr stark hervor. Man ersetzt daher, wenn möglich, eine stark gekrümmte Linse durch zwei schwächer gekrümmte.

B. Brennweite von beliebigen Linsensystemen.

Einleitung. Bei zusammengesetzten Linsensystemen, wie photographischen Objektiven, Fernrohr- oder Mikroskopobjektiven, kann man zur Bestimmung der Brennweite nicht mehr so verfahren wie bei den einfachen Linsen, hauptsächlich, weil man nicht weiß, von welchem Punkte des Systems aus man die Entfernung des Gegenstandes oder Bildes rechnen soll. Um hierüber Klarheit zu schaffen, führt man den Begriff der Hauptebene ein: Fällt ein Bündel paralleler Strahlen parallel zur Achse auf das Linsensystem und verlängert man die in das Linsensystem eintretenden und die aus ihm austretenden Strahlen, bis sie sich schneiden, so liegen die Schnitt-

punkte der einzelnen zueinander gehörenden Strahlen in einer Ebene, der Hauptebene, deren Schnittpunkt mit der Achse man den Hauptpunkt des Linsensystems nennt. Je nachdem die Strahlen von der einen oder der anderen Seite eintreten, erhält man zwei verschiedene Hauptpunkte, zu denen aber die zugehörigen Brennweiten symmetrisch liegen, wenn vor und hinter dem Systeme sich das gleiche Medium befindet. Hauptebene und Hauptpunkte liegen bei bikonvexen Linsen im Inneren der Linse. Die folgende Methode der Bildvergrößerung gibt die Brennweite, von dem zugehörigen Hauptpunkte an gerechnet.

Übung. 1. Durch Entwerfen des Bildes eines fernen Gegenstandes wird die Brennweite des Linsensystems durch Messung des Abstandes von Bild und Mitte des Systems angenähert bestimmt.

2. Das System wird in einem Stativ so befestigt, daß seine Achse horizontal liegt.

3. Etwas außerhalb der Brennweite wird eine auf Glas geteilte Millimeterskala vertikal aufgestellt; man beleuchtet sie mit einer hellen Lampe und verschiebt sie so lange, bis auf einem gegenüberliegenden Schirme ein stark vergrößertes Bild der Skala entsteht.

4. Man mißt die Länge l, in der ein Millimeter im Bilde erscheint, sowie den Abstand a des Schirmes von der Linsenmitte, dann ist

$$f = a \frac{1}{1 + l}.$$

Wenn a auch nur angenähert den Abstand von Schirm und Hauptpunkt gibt, so wird bei starker Vergrößerung l die Brennweite f doch genügend genau erhalten.

Bei Mikroskopobjektiven verwendet man besser einen großen Gegenstand in der Entfernung a (etwa das Fensterkreuz), von dem man ein stark verkleinertes Bild entwirft, welches man mit der S. 285 erwähnten Mikrometerlupe ausmißt. l ist dann die Länge im Objekt, welche einem Millimeter im Bilde entspricht.

V. Bestimmung der Vergrößerungszahl von Fernrohren, Mikroskopen und Lupen.

Gebraucht wird: Fernrohre; Kappe mit quadratischer Öffnung für ein Ablesemikroskop; Mikrometerlupe (S. 290); Rohr mit zwei Linsen (S. 290); Mikroskope und Lupen; Maßstab mit schwarzen und weißen, gleich breiten Feldern; Stative; Papierskala; Fassung mit geneigtem Spiegelglas für Mikroskop und Lupe.

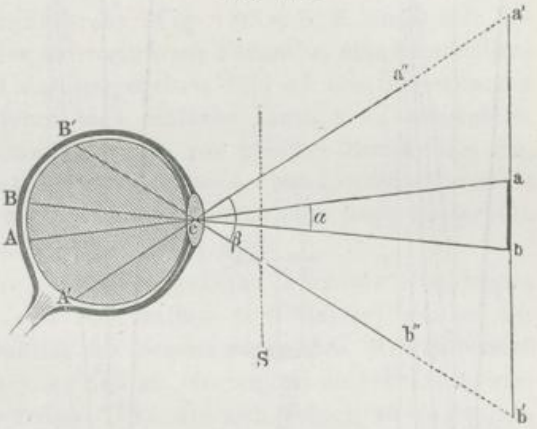
Einleitung. Die Vergrößerungszahl eines Mikroskops ist das Verhältnis des Winkels, unter welchem ein Gegenstand im Mikroskop erscheint, zu demjenigen, unter welchem er gesehen wird, wenn er sich in der deutlichen Sehweite = 25 cm befindet.

Die Vergrößerungszahl eines Fernrohres ist das Verhältnis des Winkels, unter welchem ein sehr weit entfernter Gegenstand im Fern-

rohre erscheint, zu demjenigen, unter welchem er direkt gesehen erscheint.

Die Größe einer Linie ab in der deutlichen Sehweite (Fig. 178) beurteilen wir nach dem Sehwinkel, d. h. dem Winkel α, den die von den Enden von ab ausgehenden Strahlen in dem Mittelpunkte c der Pupille miteinander bilden, denn durch diesen Winkel ist die Strecke bestimmt, um welche die Bilder A und B der Punkte a und b auf der Netzhaut voneinander abstehen. Schalten wir zwischen die an irgend eine Stelle gebrachte Strecke ab und das Auge passende Linsen (in der Figur durch einen Strich S angedeutet [1]) ein, so werden die in der Richtung ac und bc von a und b ausgehenden Strahlen, ehe sie das Auge treffen, so abgelenkt, daß sie in den Richtungen $a''c$ und $b''c$ in das Auge zu kommen scheinen; sie bilden bei c einen Winkel β miteinander [2]). Im Verhältnis β/α erscheint uns daher bei Einschaltung der Linse der Gegenstand vergrößert. Verlängern wir die in der Richtung $a''c$ und $b''c$ auffallenden Strahlen, bis sie eine bei ab senkrecht zu der Verbindungslinie zwischen dem Auge und dem Gegenstande ab gelegte Ebene schneiden, so geschieht dies in den Punkten a' und b'. Durch die Linsen erscheint uns also ein Gegenstand ab gerade so groß wie ohne dieselben ein Gegenstand $a'b'$ in derselben Entfernung. ab erscheint also im Verhältnis $a'b'/ab$ vergrößert, dies ist nahe gleich β/α.

Fig. 178.



Beim Betrachten mit dem Fernrohre befindet sich der betrachtete Gegenstand ab in einer gegebenen, sehr großen Entfernung, wir vergleichen daher die scheinbare Größe $a'b'$ mit der wirklichen von ab, wenn letzteres sich an seinem wahren Orte befindet. Gegenstände, die wir beliebig dem Auge nähern können, bringen wir in die deutliche Sehweite, wir vergleichen bei der Untersuchung mit der Lupe und dem Mikroskop die scheinbare Größe mit derjenigen, welche sie in dieser haben.

---

[1]) Die Zeichnung ist nur schematisch, die Art der Ablenkung durch die Linse ist nicht angedeutet.

[2]) Ganz entsprechend wird ein von a ausgehendes Strahlenbündel konvergent oder divergent gemacht, je nach der Art der Linse S.

Blicken wir auf einen Maßstab gleichzeitig durch ein Fernrohr und mit dem unbewaffneten Auge, und fallen auf x Teile des direkt gesehenen Maßstabes y Teile des durch das Fernrohr gesehenen, so ist die Vergrößerungszahl

$$V = x/y.$$

Blicken wir gleichzeitig durch eine Lupe oder ein Mikroskop, unter dem ein Maßstab liegt, und direkt auf einen eben solchen Maßstab in der Entfernung der deutlichen Sehweite und fallen auf x_1 Teile des direkt gesehenen y_1 Teile des durch das Mikroskop gesehenen Maßstabes, so ist die Vergrößerungszahl

$$V_1 = x_1/y_1.$$

Die Größe g des Gesichtsfeldes eines Fernrohres ist bestimmt durch den Winkel, welchen die zu zwei an den Enden eines Durchmessers gesehenen Punkten gezogenen Linien miteinander bilden. Ist l der wirkliche Abstand dieser Punkte, a ihre Entfernung vom Fernrohr, so ist $g = 57{,}3^0 . l/a$.

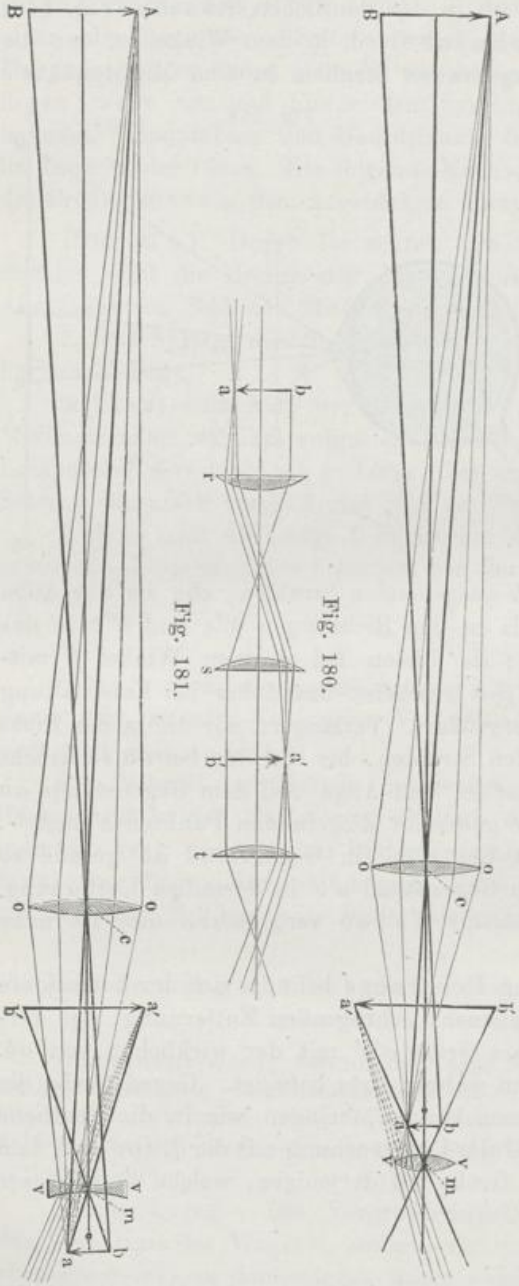


Fig. 179. Fig. 180. Fig. 181.

a) Fernrohr.

Einleitung. Bei den aus Linsen zusammengesetzten (den dioptrischen) Fernrohren (diejenigen, bei denen neben Linsen auch Hohlspiegel verwendet werden, die katoptrischen Fernrohre, behandeln wir nicht) unterscheidet man folgende Haupttypen:

1. Das astronomische oder Keplersche Fernrohr (Fig. 179 a. v. S.): Durch eine Konvexlinse o (Objektiv) mit großer Brennweite wird von dem Gegenstande AB ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles Bild ab entworfen und dieses durch eine zweite Konvexlinse v (Okular) mit kurzer Brennweite, also eine Lupe, betrachtet. Das Auge sieht ein umgekehrtes, vergrößertes Bild $a'b'$.

2. Das terrestrische Fernrohr (Fig. 180 a. v. S. stellt nur das Okularende dar) hat, wie das astronomische Fernrohr, eine Sammellinse als Objektiv; von ihr wird das umgekehrte Bild ab des Gegenstandes erzeugt. Anstatt dieses durch eine einfache Linse t zu betrachten, schaltet man zwei Konvexlinsen r und s von gleicher Brennweite ein; durch dieselben wird von ab ein gleich großes, aber aufrecht stehendes Bild $a'b'$ erzeugt; dieses wird durch t wie durch eine Lupe betrachtet. Das Auge sieht ein aufrechtes, vergrößertes Bild.

3. Das holländische oder Galileische Fernrohr (Opernglas Fig. 181 a. v. S.): Durch eine Konvexlinse o (Objektiv) werden die von den verschiedenen Punkten des Gegenstandes AB divergierenden Strahlen konvergent gemacht, so daß sie ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild ab liefern würden. Ehe sie sich jedoch zu demselben vereinigen, werden sie durch eine dazwischen geschaltete Konkavlinse v (Okular) wieder divergent gemacht. Dadurch wird das Fernrohr verhältnismäßig kurz. Das Auge empfängt z. B. die von A ausgegangenen Strahlen, als ob sie von a' ausgegangen wären: das Auge sieht ein aufrecht stehendes, vergrößertes Bild.

Um die Randstrahlen abzublenden, dienen an geeigneten Stellen eingesetzte Diaphragmen (S. 282); statt einfacher Linsen verwendet man achromatische und aplanatische Linsensysteme (S. 282).

Da bei dem astronomischen und dem terrestrischen Fernrohre ein reelles Bild entsteht, so kann man mittels eines in der Bildebene angebrachten Fadenkreuzes die Lage des Bildes bestimmen.

Übung 1. Direkte Bestimmung der Vergrößerung. 1. Man richtet ein Fernrohr auf einen vertikalen Maßstab in etwa 4 bis 6 m Entfernung, der aus je 10 cm breiten, abwechselnd weißen und schwarzen Feldern besteht.

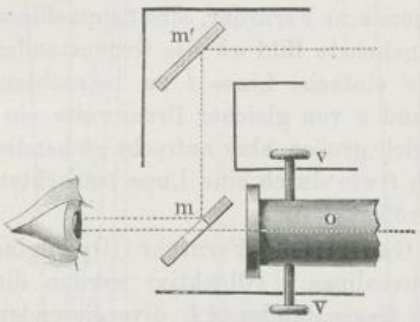
2. Man blickt mit dem einen Auge durch das Fernrohr, mit dem anderen neben demselben vorbei direkt nach dem Gegenstande, und schließt abwechselnd das eine und das andere Auge, um in beiden Fällen das Bild sicher zu sehen.

3. Man sieht mit beiden Augen gleichzeitig nach dem Gegenstande und übt sich, bis man beide Bilder gleichzeitig sieht.

4. Man bestimmt, wie viele weiße und schwarze Felder in dem direkt gesehenen Bilde einem oder mehreren Feldern in dem durch das Fernrohr gesehenen entsprechen. (Man kann auch das Fernrohr auf Dachziegel usw. richten.)

Bemerkung. Bequemer und genauer ist die Messung bei Anwendung einer von Pouillet angegebenen Anordnung, Fig. 182. Das Auge sieht durch den unbelegten Teil eines Spiegels m und das Fernrohr o das vergrößerte Bild, durch den belegten Teil des Spiegels und den Spiegel m' den nicht vergrößerten Gegenstand selbst m und m' sind in Messingröhren befestigt, die durch die Schrauben. v auf dem Fernrohre o gehalten werden.

Fig. 182.



Übung 2. Die Vergrößerung eines astronomischen Fernrohres berechnet sich aus der Brennweite des Objektivs f_1 und derjenigen des Okulars f_2 nach der Formel:

$$V = \frac{f_1}{f_2}.$$

Um diesen Satz zu prüfen, sind in einem Messingrohre zwei andere Röhren verschiebbar, die an ihren Enden zwei Sammellinsen tragen; erstere dient als Objektiv, letztere als Okular.

1. Man bestimmt nach Methode S. 279 die Brennweiten f_1 und f_2 der beiden Linsen. 2. Man bestimmt nach Methode S. 289 die Vergrößerung V. 3. Man prüft, ob in der Tat $V = f_1/f_2$ ist.

Übung 3. Bestimmung der Vergrößerungszahl eines astronomischen Fernrohres nach der Ramsdenschen Methode. Bei einem astronomischen (Ablese-)Fernrohre ist nach Übung 2 die Vergrößerungszahl V gleich dem Quotienten aus der Brennweite des Objektives f_1 und derjenigen des Okulares f_2. Diesen Quotienten findet man folgendermaßen:

1. Man stellt das Fernrohr auf einen entfernten Gegenstand scharf ein; dann ist die Entfernung a des Objektives vom Okular (die Fernrohrlänge) gleich der Summe der Brennweiten beider:

$$a = f_1 + f_2.$$

2. Man schraubt das Objektiv heraus und ersetzt es durch eine Kappe mit quadratischer Öffnung von der Seitenlänge L mm. Das Okular entwirft von dieser ein reelles Bild von der Größe l in der Entfernung b hinter dem Fernrohre, wobei nach S. 277 ist:

$$L : l = (f_1 + f_2) : b$$

und

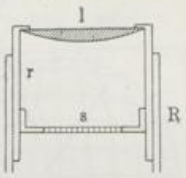
$$\frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2}.$$

3. Man mißt die Bildgröße l mittels einer kleinen Mikrometerlupe (sogenannten „Dynameter“, einer Lupe l mit einer Teilung s,

die man durch Aufsetzen auf eine in Millimeter geteilte Glasskala reicht und die sich mit der Fassung r in einem Rohre R verschieben läßt (Fig. 183). Dann erhält man durch Elimination der unbekannten Bildweite b:

$$\frac{L}{l} = \frac{f_1}{f_2} = V.$$

Fig. 183.



Übung 4. Bestimmung der Größe g des Gesichtsfeldes, vgl. S. 288. In der Entfernung a möge ein Maßstab aufgestellt sein.

1. Man richtet das Fernrohr auf diesen und bestimmt, ein wie großer Teil l desselben zu sehen ist; 2. man mißt den Abstand a zwischen Fernrohr und Skala; dann ist

$$g = 57{,}3^0\, l/a.$$

b) Mikroskop.

Einleitung. Durch die stark gekrümmte Konvexlinse ab (Fig. 184 a. f. S.) von kleiner Brennweite (Objektiv) wird von dem kleinen außerhalb der Brennweite, aber nahe derselben liegenden Gegenstande rs ein vergrößertes, umgekehrtes, reelles Bild RS entworfen. Dieses entsteht innerhalb der Brennweite der Konvexlinse cd (Okular) und wird durch diese wie durch eine Lupe betrachtet. Das Auge sieht ein vergrößertes, umgekehrtes, virtuelles Bild $R'S'$.

Häufig bringt man da, wo das reelle Bild RS entsteht, eine mit einer Teilung versehene Glasplatte an, das Okularmikrometer (vgl. Fig. 183).

Zur Bestimmung der Vergrößerungszahl des Mikroskopes dienen zwei Methoden, bei beiden wird eine in $1/n$ mm, z. B. in $^1/_{10}$ mm geteilte Glasplatte auf den Objekttisch gelegt.

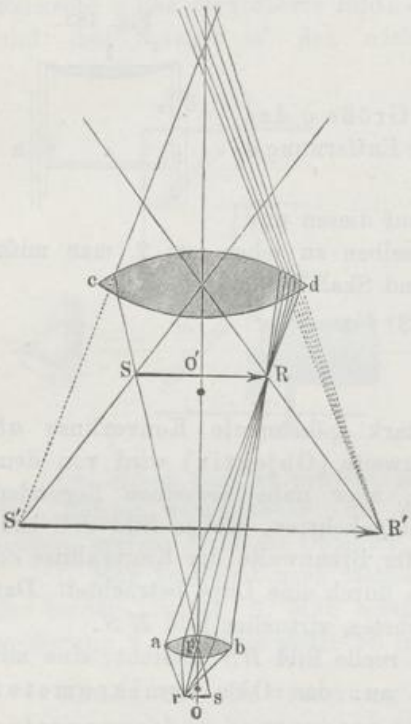
Erste Methode. Man legt eine Millimeterskala horizontal in die deutliche Sehweite vor das Mikroskop und bestimmt, wieviel Intervalle des Maßstabes unter dem Mikroskop auf eine bestimmte Anzahl Millimeter fallen.

Im Prinzip gleich, aber bequemer und genauer, ist die

Zweite Methode. 1. Man bringt eine unter 45° gegen die Horizontale geneigte Glasplatte g (Fig. 185 a. f. S.) oder einen Spiegel, dessen Belegung in der Mitte fortgenommen ist und der das Licht nach oben reflektiert, über das Okular, stellt einen vertikalen Maßstab M in 25 cm Entfernung vom Mikroskop auf, blickt durch das Okular von o aus auf die geteilte Glasplatte auf dem Objekttische und verschiebt den Maßstab, ohne seine Entfernung vom Mikroskop zu ändern, so lange hin und her, bis man den gespiegelten Maßstab und die geteilte Glasplatte gleichzeitig sieht. Dabei ist die Beleuchtung der geteilten Glasplatte so einzurichten, daß die Hellig-

keit des einen Objektes die des anderen nicht zu sehr übertrifft. Zweckmäßig neigt man den Beleuchtungsspiegel des Mikroskopes so, daß die Striche der geteilten Glasplatte hell auf dunklem Grunde erscheinen.

Fig. 184.

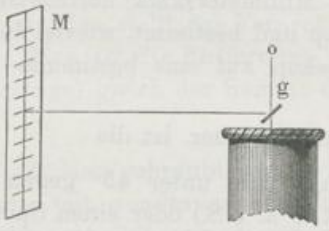


2. Man bestimmt an der vertikalen Skala die Zahl der Teilstriche des Maßstabes, welche auf $1/n$ mm, wie er im Mikroskop erscheint, kommen. Ist x die Zahl der Millimeter-Teilstriche, so ist die Vergrößerung $= nx$.

Übung. Eichung des Okularmikrometers und Bestimmung der Dimensionen eines kleinen Gegenstandes, z. B. der Dicke eines dünnen Drahtes. 1. Man legt in das Okular das Okularmikrometer ein, legt auf den Objekttisch die Millimeterskala, so daß der in Zehntel (Zwanzigstel) geteilte Millimeter sich gerade in der Mitte des Gesichtsfeldes befindet und die Striche beider Teilungen einander parallel laufen.

2. Man zählt eine bestimmte Anzahl von Teilstrichen beider Skalen, die zwischen koinzidierenden Strichen liegen, ab und berechnet aus dem Verhältnis beider Zahlen, wie viele Teilstriche z der Okularteilung auf 1 mm kommen.

Fig. 185.



3. Man legt den Draht zwischen zwei Glasplatten und schiebt denselben so in das Gesichtsfeld, daß der gesehene Teil den Strichen parallel liegt. Beträgt die Breite y Okularteilungsstriche, so ist die Dicke $d = y/z$ mm.

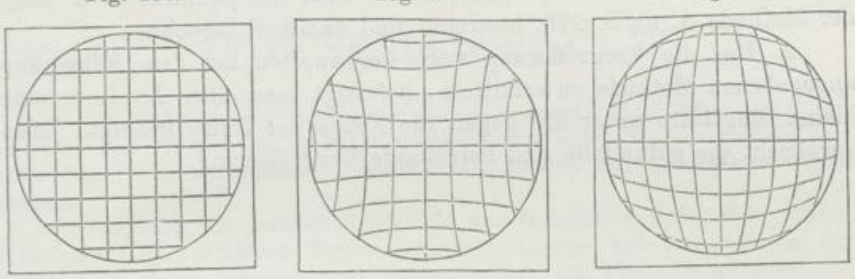
4. Man wiederholt die Übung bei weiter ausgezogenem Okular, wobei jedes Intervall seiner Skala einen anderen Wert z' annimmt.

Die beide Male erhaltenen Werte von d müssen übereinstimmen.

Bemerkung. Zur Beurteilung der Güte des Mikroskopes verwendet man sog. Prüfungsobjekte (Testobjekte). Dieselben bestehen

entweder in einem feinen, auf Glas geteilten Gitter, durch welches die Platte in eine große Zahl sehr kleiner Quadrate geteilt ist, oder in feinen, auf Glas geritzten Skalen, oder aus Objekten aus dem Pflanzen- oder Tierreiche mit feiner Struktur, z. B. von Diatomeen. Bei den Gittern und Skalen müssen die Linien bis zum Rande hin scharf

Fig. 186. Fig. 187. Fig. 188.

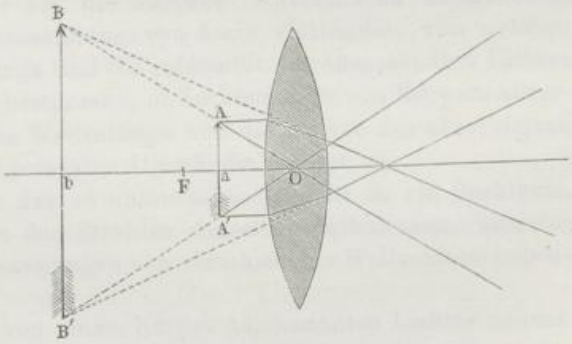


und geradlinig, also wie in Fig. 186 und nicht wie in Fig. 187 oder Fig. 188 erscheinen. Man beurteilt die „auflösende Kraft" des Mikroskopes nach den Einzelheiten, die man mit demselben noch deutlich unterscheiden kann.

c) Lupe (Fig. 189).

Einleitung. Bei der Lupe bringen wir den Gegenstand AA' sehr nahe an das Auge, so daß derselbe unter einem sehr großen Winkel erscheint. Die von jedem Punkte desselben auf das Auge fallenden Strahlen besitzen dann aber eine zu große Divergenz, als daß die brechenden Medien des Auges sie auf der Retina in einem Punkte vereinigen könnten. Wird eine Sammellinse O zwischen Auge und Gegenstand so eingeschaltet,

Fig. 189.



daß der Gegenstand sich an einer bestimmten Stelle zwischen Brennpunkt F und Linse befindet, so kann sich die Divergenz der Strahlen so vermindern, daß sie aus der deutlichen Sehweite zu kommen scheinen. Das Bild BB' in der deutlichen Sehweite ist virtuell. Der Winkel, unter dem dasselbe erscheint, bleibt derselbe wie bei Betrachtung ohne Linse. Die Vergrößerung V ist das Verhältnis der Größe des virtuellen Bildes BB' zur Größe des Objektes AA'. Denn, wollten wir den Gegenstand ohne Lupe sehen, so müßten wir ihn in deutliche Sehweite bringen.

Hält man die Lupe sehr nahe vor das Auge, ist $\Delta = 25$ cm die deutliche Sehweite, φ die Brennweite der Lupe, so ist die Vergrößerung:

$$V = \frac{\Delta}{\varphi} + 1.$$

Übung. 1. Für eine Sammellinse wird die Brennweite φ nach der Methode A. a), S. 279, bestimmt und damit V berechnet.

2. Um die Vergrößerung nach der zweiten bei dem Mikroskop angegebenen Methode zu ermitteln, befestigt man über der Lupe eine kleine Glasplatte unter 45° gegen die Achse der Linse geneigt. Man vergleicht die gefundene und berechnete Vergrößerung.

VI. Spektralanalyse.

Gebraucht wird: Gaslampe; Bunsenbrenner; Platinlöffel für Chlornatrium und -lithium (s. S. 298); Chlornatrium und -lithium; blaues und rotes Glas; Spaltvorrichtung; Sammellinse; Prisma auf Tischchen; weißer Schirm.

Spektroskop mit gerader Durchsicht mit Vergleichsprisma; Stativ dazu; Kirchhoff-Bunsenscher Spektralapparat; Lampe zur Beleuchtung der Skala, z. B. kleine Ligroinlampe; Bunsenbrenner und Platindrahthalter.

Bunsen-, Teclu- und Terquembrenner; Stativ für Reagenzgläser; Probierglasständer mit 12 Präparaten und Platindrähten (s. S. 298).

Koordinatenpapier, kleines Induktorium mit Tauchelementen und Verbindungsdrähten; Geißlersche Röhren mit H, Hg, N, O, CO_2, $HgCl_2$, $HgBr_2$, HgJ_2 event. Helium und Argon und Stativ dazu. Halter für Metallspitzen; Leidener Flasche, Metallspitzen, Fulgurator für Flüssigkeiten; Quarzlinse, Uranglasplatte, Stativ für beide (Fig. 200); Chininschirm.

Gemische mehrerer Chloride für qualitative Analyse.

Fortsetzung s. w. u. bei Absorptionsspektralanalyse.

1. Einleitung.

Die Spektralanalyse hat die Aufgabe, einerseits zu untersuchen, in welcher Weise die Aussendung von Licht stattfindet, von welchen Umständen die Wellenlänge und die Intensität des ausgesandten Lichtes abhängen, anderseits zu bestimmen, ob Lichtstrahlen von Körpern absorbiert werden und wie die Wellenlänge und die Menge des absorbierten Lichtes durch die verschiedensten Umstände bedingt ist.

Wir zerlegen dazu das zu untersuchende Licht in ein Spektrum, d. h. wir breiten die in den Strahlen desselben enthaltenen, übereinander gelagerten Lichtbewegungen von verschiedener Wellenlänge nebeneinander aus.

Das Spektrum des von einem Körper ausgesandten Lichtes nennen wir sein Emissionsspektrum; lassen wir dagegen das von einem weißglühenden Körper ausgesandte Licht durch einen Körper hindurchgehen, so nennen wir das Spektrum des hindurchgegangenen Lichtes das Absorptionsspektrum des letzteren; in ihm sind die Strahlen, die der Körper absorbiert, geschwächt oder sie fehlen.

Da verschiedene Körper sowohl verschiedene Emissions- als auch verschiedene Absorptionsspektra zeigen, so können wir dieselben zur Unterscheidung der Substanzen verwenden und sprechen daher von einer Spektralanalyse.

Man unterscheidet besonders drei Arten von Emissionsspektren.

1. Kontinuierliche Spektra; dieselben erstrecken sich über einen gewissen Bereich im Spektrum, ohne in einzelne Linien zu zerfallen. Dabei brauchen sie nicht alle Farben zu umfassen.

2. Banden- oder kannelierte Spektra; sie zeigen bei schwacher Dispersion breitere helle Teile des Spektrums, die sog. Banden, meist mit einer scharfen Begrenzung an der einen, mit einer verwaschenen an der anderen Seite, manchmal sind auch beide Seiten verwaschen, z. B. bei Strontiumchlorid. Bei einseitiger, scharfer Begrenzung liegt diese bald nach dem Infrarot, bald nach dem Ultraviolett hin. Stärkere Dispersion zeigt oft, daß die Banden aus einer Reihe von Linien von nahezu gleicher Intensität bestehen, die nach dem scharfen helleren Rande näher zusammenrücken und dort nur schwer voneinander getrennt werden können (vgl. das Spektrum des Terquembrenners, S. 308, Nr. 13). Indes gibt es auch Banden, die keine Auflösung in Linien gestatten, sie entsprechen dann Teilen von 1.

3. Linienspektra; sie bestehen aus einzelnen, mehr oder weniger scharfen Linien, die durch dunkle Zwischenräume getrennt sind oder sich von einem schwach erhellten Hintergrunde abheben.

Rühren die Spektra von Bewegungen her, welche von den Elektronen in den Molekülen bzw. Atomen des Körpers ausgehen, so hängt die Natur der Schwingungen und ihre Intensität von dem Bau und den Dimensionen der Moleküle ab. Wir schreiben meist die Linienspektra den Schwingungen an dem einzelnen Atome, die Bandenspektra solchen an Molekülen zu, indes treten auch bei Atomen Bandenspektra auf.

Jede Verbindung hat ihr eigenes Spektrum, ihr Verbindungsspektrum. Dieses Spektrum läßt sich natürlich nur dann beobachten, wenn die Verbindung bei derjenigen Temperatur, bei der eine Lichtemission stattfindet, als solche existiert und nicht durch chemische Prozesse, z. B. in der Flamme, in ihre Atome zerlegt wird oder irgendwelche Umänderungen erfährt.

Beispiele für Verbindungsspektra liefern die Verbindungen $SrCl_2$, $SrBr_2$, SrJ_2, welche mit dem Fulgurator in einer Wasserstoffatmosphäre und in der Bunsenschen Flamme unter Beimischung von HCl, HBr, HJ zu den Gasen derselben erhalten werden. Diese sind untereinander verschieden. In einer gewöhnlichen Bunsenschen Flamme erhitzt, liefern sie stets dasselbe Spektrum, das von Strontiumoxyd.

Auch die Effektkohlen liefern Verbindungsspektra.

Der Charakter der Spektra ändert sich mit dem Aggregatzustande. Feste und flüssige Körper haben fast stets kontinuierliche Emissionsspektra, Gase haben Banden- oder Linienspektra.

Kontinuierliche Spektra, die nur einzelne Teile des Spektrums umfassen, zeigen die festen und flüssigen Körper, wenn sie fluoreszieren oder phosphoreszieren.

Bei den Absorptionsspektren treten die S. 317 besprochenen Haupttypen auf.

Für die Abhängigkeit der Intensität der ausgesandten Strahlung von der Temperatur gelten bei vollkommen schwarzen Körpern, d. h. solchen, die alle auffallenden Strahlen vollkommen absorbieren, folgende Gesetze:

1. Die gesamte Strahlung wächst mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur (vgl. S. 200).

2. Liegt bei der absoluten Temperatur T das Strahlungsmaximum im Spektrum bei der Wellenlänge λ_m (ausgedrückt in Mikrons), so ist nach W. Wien:

$$\lambda_m \cdot T = const = 2940.$$

Das Strahlungsmaximum rückt also nach dem Violett bei wachsender Temperatur.

3. Die Strahlungsintensitäten φ_m und φ'_m derjenigen Wellenlängen, für die sie ein Maximum sind, verhalten sich nach Wien wie die fünften Potenzen der absoluten Temperaturen T und T':

$$\varphi_m : \varphi'_m = T^5 : T'^5.$$

4. Für die Beziehung zwischen Intensität J und Wellenlänge λ bei derselben Temperatur sind verschiedene Formeln aufgestellt. Die zuletzt von Planck angegebene lautet, wenn c_1 und c_2 Konstanten sind:

$$J = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}.$$

Die im Linienspektrum auftretenden Linien können häufig zu bestimmten Gruppen zusammengefaßt werden, zu sog. „Serien". Die Wellenlängen $\lambda\,(\mu\mu)$ der einzelnen Glieder und Serien lassen sich nach der Formel:

$$\frac{10^6}{\lambda} = A - \frac{B}{n^2} - \frac{C}{n^4}$$

berechnen, wo für n der Reihe nach die ganzen Zahlen zu setzen sind (z. B. $n = 3, 4, 5$ usw.).

2. Lichtquellen.

Zur Verwendung kommen folgende Lichtquellen:

1. Die Sonne, Kalk- oder Zirkonlicht, das Gasglühlicht in seinen verschiedenen Formen, das elektrische Licht von Bogenlampen, Glühlampen und Nernstlampen, die leuchtende Gasflamme; alle senden nahezu weißes Licht mit einem kontinuierlichen Spektrum aus.

2. Die in dem Bunsen- bzw. Terquembrenner (Fig. 190 a. f. S.) zum Leuchten gebrachten Dämpfe fester oder flüssiger Substanzen.

Der Terquembrenner hat eine weitere Röhre als der Bunsenbrenner und dadurch eine stärkere Luftzufuhr, seine Flamme ist daher heißer; die Röhre ist, um ein Zurückschlagen der Flamme zu vermeiden, an

ihrem oberen Ende durch ein aufgesetztes Blechkreuz in vier Teile geteilt. Durch Heben oder Senken des Rohres B regelt man den Luftzutritt. Die Flamme ist am heißesten unmittelbar über dem inneren grünlichen (vierteiligen) Kegel. Ähnlich ist der Teclubrenner beschaffen.

Die Substanzen werden meist an Platindrähten in die Flamme eingeführt. Chlornatrium wird z. B. an dem Ende e (Fig. 191) eines zu einer Öse[1]) umgebogenen Platindrahtes d angeschmolzen, der in eine enge Glasröhre g eingeschmolzen ist. Man pulvert geschmolzenes

Fig. 190.

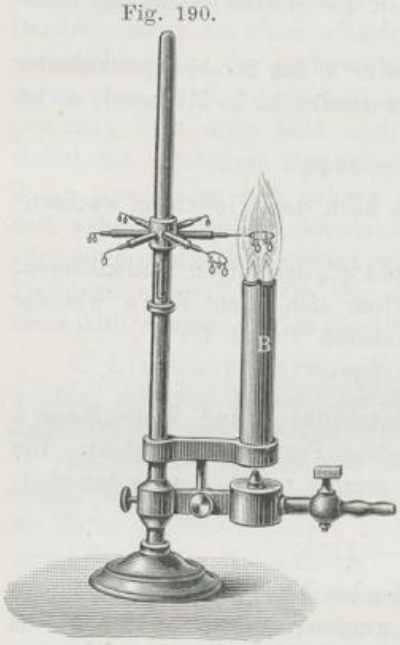
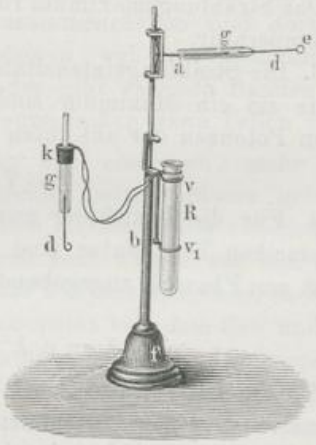


Fig. 191.



Chlornatrium, befeuchtet den Draht, berührt mit ihm das Chlornatrium, hält ihn dann in die Flamme und schmilzt das anhaftende Salz zu einer Perle. Das Glasrohr g wird über den an einem Stativ b auf und ab schiebbaren Arm a geschoben. Man bringt die Perle stets in den vorderen Saum der Flamme des Bunsenbrenners (die Temperatur ist dort 1100 bis 1700°).

Die Salze sind in kleinen Reagiergläsern enthalten, Fig. 191, die am oberen Ende bei v aufgewulstet sind; hier ist ein Bindfaden herumgebunden, der mit seinem anderen Ende in einem Korke k steckt, welcher in das Reagierglas R hineinpaßt und durch den das den Draht d tragende Glasrohr g hindurchgeht.

An dem Stativ sind zwei Ringe v, v_1 angebracht, in die das Reagierglas mit der zu untersuchenden Substanz eingesetzt wird.

3. Die unter der Einwirkung elektrischer Entladungen leuchtenden verdünnten Gase und Dämpfe; sie sind in den Geißlerschen Röhren

[1]) Um längere Zeit mit demselben Salze zu arbeiten, bringt man dasselbe in einen durchlöcherten Platinlöffel, der an einen Platindraht angenietet ist.

enthalten. Zwischen zwei weite Röhren a_1 und b_1, Fig. 192, ist ein Kapillarrohr eingesetzt; in die Enden von a_1 und b_1 sind Platindrähte a, b (die Elektroden [Anode die mit dem +-Pole, Kathode die mit dem —-Pole verbundene]) eingeschmolzen, welche an ihren Enden im Inneren der Röhren Aluminiumdrähte tragen. Über die nach außen gehenden Enden der Platindrähte sind Messingkappen gekittet.

Fig. 192.

4. Salzlösungen, welche durch den elektrischen Funken in dem Fulgurator (Fig. 193) verdampft und zum Leuchten gebracht werden. In ein Reagenzglas A ist bei f ein Platindraht eingeschmolzen, der mit dem einen Pole eines Induktionsapparates verbunden wird. Über f ist das konische Glasröhrchen D geschoben. Es wird nur so viel Salzlösung eingegossen, daß sie durch die in D wirkenden Kapillarkräfte bis zur Spitze von D emporgehoben wird. Der unteren Platinspitze steht ein Platindraht d gegenüber, welcher bis auf sein unteres freies Ende in eine Glasröhre B eingeschmolzen, mit derselben in den Kork C gesteckt ist, und welcher mit dem anderen Pole des Induktionsapparates in Verbindung steht.

5. Metalldämpfe, welche dadurch erzeugt und zum Leuchten gebracht werden, daß man elektrische Funken

Fig. 194.

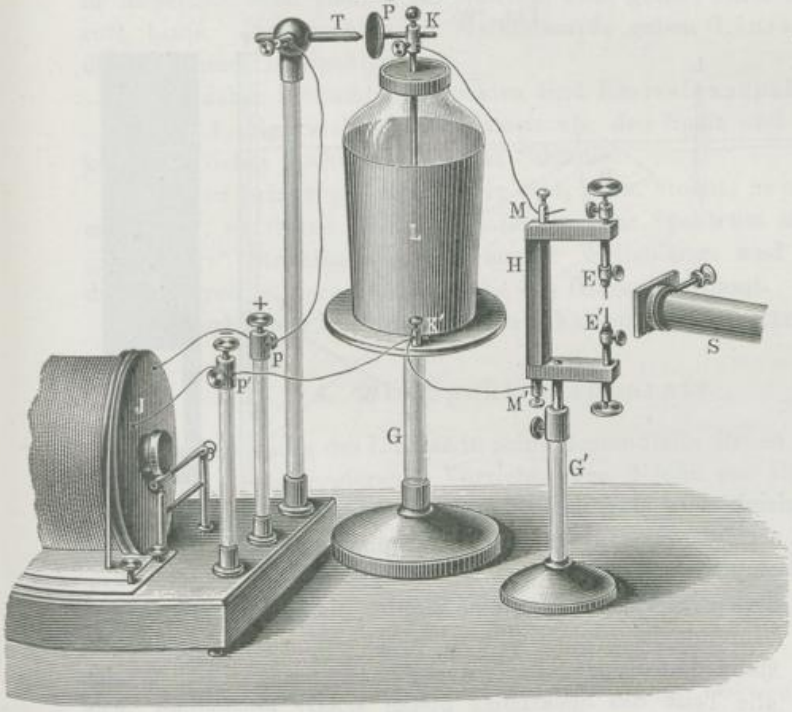
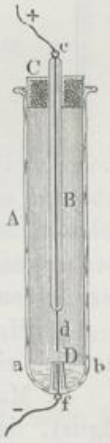


Fig. 193.



zwischen Spitzen aus dem betreffenden Metall überspringen läßt. Die Metallspitzen E und E' (Fig. 194 a. v. S.) sind in dem Halter H von Hartgummi befestigt und mittels der Klemmschrauben M und M' durch Drähte MK und $M'K'$, welche mit Kautschuk überzogen sind, mit der inneren und äußeren Belegung der Leidener Flasche L verbunden. Die Flasche wird durch das Induktorium J geladen, und zwar ist die äußere Belegung der Flasche direkt durch den Draht $K'p'$ mit dem —-Pole des Induktoriums verbunden. Der +-Pol ist mit der isoliert aufgestellten Spitze T leitend verbunden. Von dieser springen Funken auf die mit dem inneren Belege verbundene Platte P über.

Ehe man neue Metallspitzen bei E und E' einsetzt, ist die Flasche mittels eines Entladers zu entladen.

3. Vorübung: Entwerfen eines Spektrums.

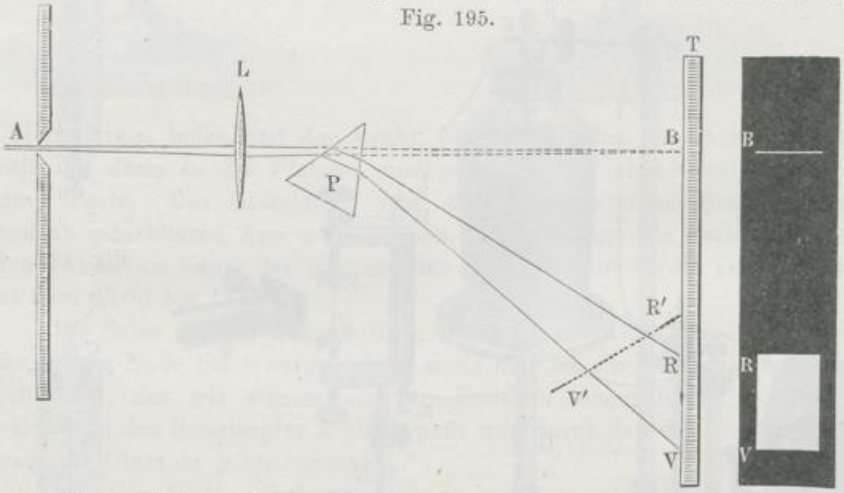
Um die Haupterscheinungen im Spektrum kennen zu lernen, verfahren wir ähnlich wie J. Newton (1643 bis 1727, 1672).

Übung. I. 1. Man stellt eine Lampe vor den vertikal stehenden Spalt A (Fig. 195).

2. Auf einem Schirme T wird durch die Linse L ein scharfes Bild B des Spaltes A entworfen.

3. Man bringt das Prisma P, dessen brechende Kante parallel dem Spalte steht, in den Gang der Strahlen; sie werden nach R ab-

Fig. 195.



gelenkt, zugleich wird das weiße Licht der Lampe in seine farbigen Bestandteile zerlegt. Das auftretende Farbenband ist das Spektrum des weißen Lampenlichtes.

4. Man dreht das Prisma um seine Kante, bis die Ablenkung der Strahlen ein Minimum ist (vgl. S. 256 u. 261).

5. Man stellt den Schirm so (entsprechend der Linie $R'V'$ der Figur), daß alle Teile des Spektrums gleich scharf erscheinen, was

man am besten nach dem Aussehen der oberen und unteren Kante beurteilt; dazu muß der Schirm in den blauen Teilen des Spektrums dem Prisma erheblich näher stehen als in den roten, da die Vereinigungsweite der roten Strahlen größer als die der blauen ist.

An dem so erhaltenen Spektrum ist folgendes zu beobachten.

a) Das weiße Licht besteht aus den allmählich ineinander übergehenden Farben (Regenbogenfarben[1]): Rot (R'), Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett (V') (Fig. 130). Das Rot (R') ist am wenigsten abgelenkt, das Violett (V') am stärksten.

b) Die weißglühenden Kohleteilchen des Gaslichtes liefern eine ununterbrochene Farbenreihe: ein kontinuierliches Spektrum.

c) Die Spaltbilder sind gekrümmt, die mittleren Teile sind am wenigsten abgelenkt, daher ist das Spektrum auch nicht an seinen Grenzen im Rot und Violett durch gerade Linien begrenzt.

6. Man macht den Spalt enger; das Spektrum wird lichtschwächer, aber auch reiner, die Farben treten deutlicher hervor.

7. Man hält quer über den Spalt einen Draht, im Spektrum erscheint eine horizontale dunkle Linie. Ebensolche dunkle Linien treten bei engem Spalte von selbst auf, sie rühren von Staubpartikelchen usw. auf dem Spalte her.

II. Man ersetzt die Flamme durch die nicht leuchtende Flamme des Bunsenschen Brenners und bringt Chlornatrium oder Chlorlithium in dieselbe. Man sieht beim Natrium eine gelbe, beim Lithium eine rote Linie. Die leuchtenden Metalldämpfe geben Linienspektra, diskontinuierliche Spektra.

Die bisher betrachteten Spektra sind Emissionsspektra.

III. 1. Man stellt die Gaslampe vor den Spalt und entwirft ein kontinuierliches Spektrum auf dem Schirme.

2. Man bringt gefärbte Gläser (rot, grün, violett) zwischen Lampe und Spalt, es treten dunkle Streifen in dem Spektrum auf; das Glas „absorbiert" Strahlen von bestimmter Wellenlänge und läßt andere durch; durch letztere ist die Farbe des Glases bestimmt.

Das erhaltene Spektrum ist ein Absorptionsspektrum.

4. Die Spektralapparate.

Zur Zerlegung des Lichtes in seine Bestandteile dienen die Spektralapparate; als dispergierende Vorrichtungen dienen vor allem ein oder mehrere Prismen (S. 256) oder ein Gitter (S. 327). Letztere sind entweder auf ebene oder auf konkave Flächen geritzt. Im ersten Falle müssen noch Linsen zur Erzeugung der Bilder eingeschaltet werden, dies ist im letzten nicht nötig. Auf die Stufenspektroskope usw. kann hier nicht eingegangen werden.

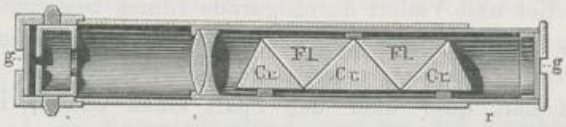
[1]) Der Regenbogen zeigt übrigens nur in ganz besonderen Fällen die ganze Reihe von Farben.

Wir behandeln nur die Spektralapparate mit Prismen. Man unterscheidet bei ihnen solche mit gerader Durchsicht und solche mit Ablenkung.

I. Spektroskope mit gerader Durchsicht (geradsichtige Spektroskope). Beschreibung und Einstellung.

Bei ihnen erfährt ein Strahl aus den mittleren gelben Teilen des Spektrums keine Ablenkung, während die roten und blauen nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt werden. In ihrer einfachsten Form bestehen diese Spektroskope aus einer Messingröhre, in welche bei *g* (Fig. 196) ein Spalt eingesetzt ist; die von diesem ausgehenden Strahlen gehen durch eine Linse *e*; die Prismenkombination Cr Fl

Fig. 196.



(Crown-Flintglas) zerlegt die Strahlen in ihr Spektrum. Hinter *g'* befindet sich das Auge. Die Verengerung und Verbreiterung des Spaltes wird durch eine Kreisschraube *s* bewirkt. Diese Spektroskope können nicht zu Messungen verwendet werden, sondern nur zu Beobachtungen und eventuell zu Vergleichungen, falls man vor die eine Spalthälfte ein Vergleichsprisma (s. w. u.) bringt.

Man stellt den Apparat dadurch ein, daß man ihn gegen den Himmel richtet und das Rohr *r* so lange verschiebt, bis man die in dem Spektrum auftretenden dunklen Linien, die Fraunhoferschen Linien (Fig. 130), scharf sieht.

II. Spektralapparat mit Ablenkung nach Bunsen und Kirchhoff (Fig. 197 bis 199, vgl. auch bei Spektrometer, S. 262)

a) Beschreibung.

Dieser Spektralapparat hat folgende Bestandteile:

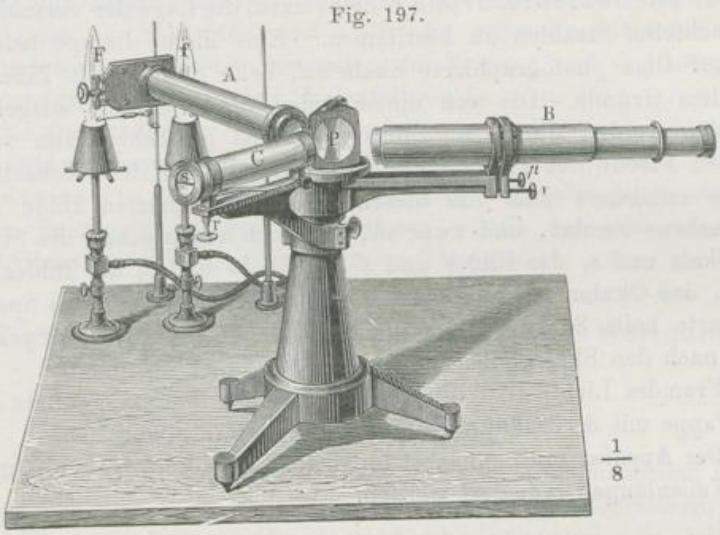
1. Das Kollimatorfernrohr: Die Strahlen, welche durch den Spalt *S* in der Platte *f* (Fig. 197 bis 199) gehen, durchsetzen das Rohr *A* und werden durch die Linse α (Fig. 198) parallel gemacht; der Spalt *S* befindet sich in dem Brennpunkte der Linse α. Die Breite des Spaltes kann durch eine Schraube verändert werden. Über die Mitte desselben ist horizontal ein dünner Platindraht gespannt; Staub in dem Spalte wird mit einem Pinsel aus Dachshaaren entfernt. Wird der Apparat nicht gebraucht, so setzt man über den Spalt eine Kappe aus Pappe. Untersucht man stark spritzende Salze, so bringt man vor den Spalt ein dünnes Glimmerblättchen.

Vor der einen Hälfte des Spaltes kann ein Vergleichsprisma *ab* (Fig. 199) befestigt werden, durch das man vermöge totaler Re-

flexion von der Seite her Licht einfallen läßt, während durch die andere Hälfte das Licht direkt hindurchgeht.

2. Die aus α austretenden Strahlen fallen auf die Vorderfläche des Prismas P, wo sie in ihre Bestandteile Rot bis Violett, r und v,

Fig. 197.



$\frac{1}{8}$

zerlegt werden; durch das Prisma geht also eine Schar von Strahlen; die einer jeden Farbe zugehörigen verlaufen unter sich parallel, die verschiedenen Farben zugehörigen Bündel sind aber verschieden stark abgelenkt. An der zweiten Fläche des Prismas erfahren diese Strahlen eine zweite Brechung, und es tritt aus derselben eine Reihe paralleler,

Fig. 198.

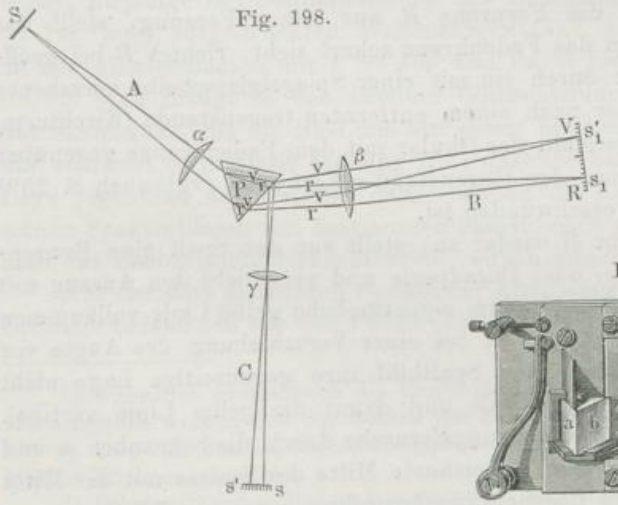
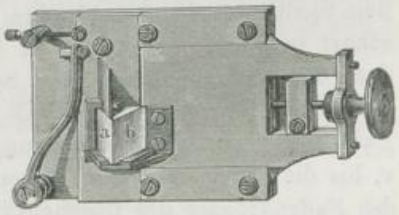


Fig. 199.



verschieden gerichteter und verschieden gefärbter Strahlenbündel aus.

3. Das Beobachtungsfernrohr B nimmt mit seiner Objektivlinse β diese Bündel auf und vereinigt jedes derselben zu einem Spaltbilde in seiner Brennebene. In dieser liegen die verschiedenen Farben neben-

einander; das Rot zunächst der brechenden Kante, das Violett am weitesten von derselben abgelenkt. Das Spektrum wird mittels des Okulars betrachtet. Die Lage der einzelnen Teile des Spektrums wird mittels eines Fadenkreuzes bestimmt.

4. Das Skalenfernrohr C dient dazu, die Lage der verschiedenen beobachteten Strahlen zu bestimmen. Eine kleine Lampe beleuchtet die auf Glas photographierte Skala ss', helle Striche mit Ziffern auf dunklem Grunde. Die von einem jeden dieser Striche ausgehenden Strahlen werden durch die Linse γ parallel gemacht, dann von der zweiten Fläche des Prismas nach dem Objektiv β des Beobachtungsrohres reflektiert und von diesem zu einem scharfen Bilde in der Brennebene vereint, und zwar so, daß sich entsprechen die Striche s der Skala und s_1 des Bildes und s' der Skala und s_1' des Bildes. Das durch das Okular blickende Auge sieht also eine über das Spektrum gelagerte helle Skala. Die Lage der einzelnen Teile des Spektrums wird nach den Skalenteilen, auf welche sie fallen, bestimmt.

Fremdes Licht wird durch eine über das Prisma gesetzte Kappe aus Pappe mit drei Öffnungen für die Fernrohre abgehalten.

Der Apparat muß zunächst eingestellt und die Angaben der Skala auf Wellenlängen reduziert werden.

b) Einstellung des Spektralapparates.

Übung. 1. Das Beobachtungsfernrohr, das Kollimator- und das Skalenfernrohr müssen auf Unendlich eingestellt werden.

Man schraubt das Fernrohr B aus seiner Fassung, stellt das Okular so, daß man das Fadenkreuz scharf sieht, richtet B bei geöffnetem Fenster oder durch ein mit einer Spiegelglasscheibe versehenes geschlossenes Fenster nach einem entfernten Gegenstande (Kirchturm, Blitzableiter) und verstellt das Okular mit dem Fadenkreuze gegenüber dem Objektiv, bis man den Gegenstand scharf sieht (vgl. auch S. 259) und die Parallaxe verschwunden ist.

2. Man schraubt B wieder an, stellt vor den Spalt eine Bunsenflamme mit Kochsalz- oder Boraxperle und verschiebt den Auszug mit dem Spalte, bis die dem Natrium eigentümliche gelbe Linie vollkommen scharf begrenzt erscheint und bei einer Verschiebung des Auges vor dem Okular Fadenkreuz und Spaltbild ihre gegenseitige Lage nicht ändern. Man stellt den Spalt und damit die gelbe Linie vertikal. Dann neigt man das Beobachtungsfernrohr durch die Schrauben μ und ν, bis die durch den Draht bezeichnete Mitte des Spaltes mit der Mitte des Fadenkreuzes des Beobachtungsfernrohres zusammenfällt.

3. Man dreht das Skalenfernrohr und verschiebt mit ihm die Beleuchtungslampe desselben, bis man die Skala im Okularfernrohre sieht, zieht das Rohr mit der Skala aus, bis die Striche scharf erscheinen, und senkt oder hebt die Skala mit der Schraube r (Fig. 197), bis das Bild

in der Mitte des Gesichtsfeldes gelegen ist. Dann dreht man den die Skala haltenden Auszug des Skalenfernrohres um seine horizontale Achse, bis die Skala horizontal erscheint und ihre Striche der gelben Na-Linie parallel sind[1]).

4. Man macht den Spalt so breit, daß er etwa halb so breit erscheint wie ein Skalenteil und stellt die gelbe Na-Linie auf einen bestimmten, je nach der Dispersion des Prismas und der Länge der Skala geeignet zu wählenden Skalenteil ein (s. w. u. 5, a).

Die anzustellenden Versuche zerfallen in drei Gruppen: erstens in qualitative, bestehend in einem Kennenlernen der Spektra, zweitens in quantitative, bestehend in dem Eichen des Spektralapparates und in dem Bestimmen einiger Wellenlängen mittels der geeichten Skala, und drittens in wirkliche analytische Übungen.

5. Eichen der Skala und Bestimmung der Wellenlänge der Linien des Wasserstoffs.

a) Eichen der Skala.

Man bestimmt die Lage der Linien der zu untersuchenden Körper auf der Skala und ermittelt dann die Wellenlängen derselben. Dies geschieht am einfachsten durch graphische Interpolation in folgender Weise.

Übung. 1. Wir nehmen Koordinatenpapier (Dimensionen vgl. d. Beisp.). Die Bezifferung der Abszissenachse entspricht den Skalenteilen, diejenige der Ordinatenachse den in Milliontel Millimetern ($\mu\mu = 10^{-6}$mm) ausgedrückten Wellenlängen (λ). Die letztere beginnt an der Abszissenachse mit $\lambda = 400$ und reicht bis etwa $\lambda = 800$.

2. Man bringt in den Brenner Chlornatrium oder Borax, dreht das Skalenrohr, bis die Na-Linie auf einem bestimmten Striche steht[2]) und schraubt es in dieser Stellung fest; dasselbe hat dann stets dieselbe Lage gegenüber dem Prisma, daher bleiben die Koinzidenzen der einzelnen Spektrallinien mit bestimmten Skalenteilen auch bestehen, wenn man das Beobachtungsfernrohr dreht, wovon man sich überzeugt.

Auf der dem genannten Punkte der Abszissenachse entsprechenden Ordinate bezeichnen wir den Punkt, welcher der Wellenlänge $\lambda = 589{,}3$

---

[1]) Eigentlich müßte noch die Kante des Prismas parallel zur Drehungsachse gestellt werden und die Achsen der Fernrohre senkrecht zu derselben; dies ist indes bei den Laboratoriumsapparaten bereits durch die Konstruktion hinlänglich genau erreicht.

[2]) Bei den meisten Spektralapparaten ist die Skala so eingerichtet, daß sie nahe der von Bunsen und Kirchhoff benutzten entspricht, wenn die Na-Linie auf 50 gelegt wird. Indes kann man auch jeden anderen Skalenteil zur Koinzidenz mit der Na-Linie bringen, nur muß die Skala so liegen, daß man sie in allen Teilen des Spektrums benutzen kann. Die Lage der Skala ist von Zeit zu Zeit mittels der gelben Na-Linie zu kontrollieren.

entspricht; dazu suchen wir auf der Ordinatenachse den Punkt 589,3 und gehen auf der durch ihn gelegten Horizontallinie fort, bis wir die durch Na gehende Vertikale treffen.

3. Man bringt andere Salze (s. folgende Tabelle) in die Flamme, welche Linien von bekannter Wellenlänge liefern, bestimmt die Lage (a) derselben auf der Skala und bezeichnet auf der dem Punkte a entsprechenden Ordinate die ihnen zukommende Wellenlänge λ.

Sind die Linien schwach, so nimmt man die Lampe vor der Skala fort, stellt das Fadenkreuz auf die Linie ein, beleuchtet dann wieder und liest die Lage des Fadenkreuzes ab, seine Lage entspricht derjenigen der Linie. Ferner hält man Strahlen, welche nicht gerade beobachtet werden, durch Vorsetzen geeigneter absorbierender Mittel ab, z. B. die blauen durch rote Gläser bei Untersuchungen im Rot.

Benutzt werden folgende Substanzen mit den Wellenlängen:

Kaliumchlorid	rote Linie K_α	$\lambda = 768{,}2$	Natriumchlorid, gelbe Linie	Na	$= 589{,}3$
	blaue „ K_β	404,6	Thalliumchlorid, grüne „	Tl	535,0
Lithiumchlorid, rote „	Li_α	670,8	Strontiumchlorid, blaue[1]) „	Sr_δ	460,7

Zum Eichen der Skala ist auch Helium sehr geeignet, dessen sieben Hauptlinien über das ganze Spektrum ziemlich gut verteilt sind. Ihre Wellenlängen sind:

707, 688, 587,6 502, 495, 470, 446.

4. Durch alle erhaltenen Punkte zeichnet man eine Kurve. Aus dieser Kurve erhält man die Wellenlänge, welche einem Skalenteile entspricht, wenn man die ihm zugehörige Ordinate aufsucht.

Beispiel: Das von uns benutzte Koordinatenpapier ist 250 mm lang und 210 mm hoch. Die Abszissenachse ist in 90 Tle. geteilt; die jedem fünften entsprechende Linie ist stark ausgezogen und trägt der Reihe nach die Zahlen 0, 10 . . . 180. Die Ordinatenachse ist in 80 Tle. geteilt, von denen jeder zweite mit Ziffern versehen ist von 380, 390 . . . 780. Die den Punkten 400, 450, 500 . . . entsprechenden Linien sind stärker ausgezogen. Bei unserem Apparate entsprechen z. B. die folgenden Ablesungen a an der Skala den oben erwähnten einzelnen Wellenlängen λ in $\mu\mu$ (millionstel Millimeter).

	K_α	K_β	Li_α	Na	Tl	Sr_δ
a	17	159	32	50	68	108
λ	768	405	671	589,3	535	461

Nach diesen Angaben ist die Kurve gezeichnet, welche auf Tafel I (S. 311) durch die Punkte K_α, Li_α, H_α, Na, Tl, H_β, Sr_δ, In, K_β geht.

5. Man bestimmt die Grenzen der einzelnen Farben auf der Skala und sucht die ihnen entsprechenden Wellenlängen auf. Man erhält angenähert die S. 233 gegebenen Zahlen.

b) Ermittelung der Wellenlängen der Wasserstofflinien aus Ablesungen an der Skala.

Übung. 1. Die Elektroden einer mit Wasserstoff gefüllten Geißlerschen Röhre werden mit den Polen eines Induktoriums ver-

[1]) Die Banden dieses Salzes im Rot und Gelb werden nicht benutzt.

bunden. Von den Polen einer Batterie von zwei bis drei Chromsäuretauchelementen oder Akkumulatoren führen Drähte zu den Klemmschrauben des Kommutators.

2. Man schließt den Strom und klopft an den Neefschen Hammer, wenn dieser nicht von selbst schwingt: der Wasserstoff im Rohre leuchtet rot. (Die Drähte zu den Elektroden sind bei geschlossenem Strome nicht zu berühren, da man sonst elektrische Schläge erhält.)

3. Man stellt die Geißlersche Röhre so vor den Spalt, daß sie diesem parallel steht und gleichzeitig in der Richtung der Achse des Kollimators liegt; dazu visiert man über den Kollimator nach der Röhre hin. Man sieht im Spektrum hauptsächlich drei Linien, eine rote α, eine blaugrüne β, eine violette γ; ihre Lagen auf der Skala seien s_α, s_β, s

4. Man liest die s_α, s_β, s_γ entsprechenden Wellenlängen λ an der Kurve ab (S. 311).

Es ist $s_\alpha = 33{,}5$; $\lambda = 656\,\mu\mu$. $s_\beta = 92$; $\lambda = 486\,\mu\mu$. $s_\gamma = 128$; $\lambda = 434\,\mu\mu$ (vgl Tafel I, 4, S. 311).

6. Emissionsspektren.

Die im folgenden aufgeführten Emissionsspektren zeigen teils Banden-, teils Linienspektren.

a) Emissionsspektra im Bunsen- bzw. Terquembrenner.

Übungen. Die Spektra der im folgenden mit ihren Linien usw. aufgeführten Metalle werden im Spektralapparate betrachtet und mit der Beschreibung verglichen, die den einzelnen Linien zukommenden Skalenteile abgelesen und die Spektra gezeichnet. Man zieht auf dem Koordinatenpapiere, in welches die Kurve eingetragen ist, welche die Abhängigkeit zwischen Wellenlängen und Skalenteilen darstellt, eine Reihe von starken horizontalen Linien (bei unserem Papiere sind die bei 400, 450 . . . stärker ausgezogen) und teilt so die ganze Fläche in eine Reihe von Streifen, von denen jeder für das Spektrum eines Metalles bestimmt ist. Die Einzeichnung geschieht in zweierlei Art.

α) Man trägt in die obere Hälfte des Streifens die Linien mit schwarzen Strichen da ein, wo die entsprechenden Skalenteile liegen; hellere Linien werden schwarz gezeichnet, breite Banden schraffiert und durch die Schraffierung die Helligkeitsverteilung angedeutet.

β) Man stellt die Helligkeitsverteilung durch eine Kurve dar. Den größeren Intensitäten entsprechen größere Ordinaten. Eine schmale Linie erscheint als eine steil ansteigende Kurve, die ebenso schnell wieder herabsinkt wie sie ansteigt. — In dieser Weise sind einige Spektra in die Streifen der Tafel I, S. 311, eingezeichnet. Um die Wellenlänge einer Linie zu ermitteln, verlängert man die durch die eingezeichneten Linien gehenden Vertikalen, bis sie die Kurve $K_\alpha Na \ldots K_\beta$ schneiden, und liest die Wellenlänge (vgl. S. 301) ab.

Die Verbindungen der folgenden Metalle werden (Apparate vgl. S. 297) als leicht flüchtige Chloride in die Flamme gebracht.

1. Natriumchlorid. Sehr helle Linie im Gelb (α) $\lambda = 589{,}3\ \mu\mu$. Stärkere Dispersion löst sie in eine enge Doppellinie (D_1 und D_2 des Sonnenspektrums s. w. u.) auf. Bei großen Dampfmengen in der Flamme umgibt die Linie ein heller Schein im Gelb und Grün, der sich zu beiden Seiten allmählich in dem dunkeln Hintergrunde verliert. (Bei höheren Temperaturen treten zu der gelben Doppellinie noch andere Doppellinien im Grün usw., S. 316, hinzu.) — Die gelbe Natriumlinie tritt schon auf, wenn Spuren von einem Natriumsalze, besonders von NaCl, vorhanden sind; sie zeigt sich daher in den Spektren aller Substanzen neben den diesen eigentümlichen Linien.

2. Kaliumchlorid. Helle Linie im äußersten Rot (α) $\lambda = 768\ \mu\mu$, zweite Linie im äußersten Violett (β) $\lambda = 404\ \mu\mu$. Dieselbe ist schwer zu sehen, weil das Auge für das äußerste Violett wenig empfindlich ist. Zur Bestimmung ihrer Lage verfährt man wie oben für schwache Linien (S. 306) angegeben ist. Zwischen beiden Linien erscheint bei größeren Dampfmengen ein heller Schein, welcher etwa im Grün sein Maximum hat, aber auch im Blau und Violett hell ist und gegen die Enden des Spektrums allmählich schwächer wird, ohne die Linien K_α und K_β selbst zu erreichen; durch ihn ist die violette Färbung der Kaliumflamme bedingt.

3. Lithiumchlorid. Intensiv rote Linie $\lambda = 671\ \mu\mu$.

4. Baryumchlorid gibt das Bandenspektrum des Oxydes: Vier intensiv grüne Banden, die gegen das Rot hin scharf begrenzt sind und sich nach dem Violett hin allmählich abschattieren. Außerdem zeigt sich eine sehr helle blaue Bande. (Man lasse die Salzperle längere Zeit in der Flamme.)

5. Strontiumchlorid gibt ein Bandenspektrum mit hellen, roten und orangefarbenen Banden, die nach beiden Seiten gleich schnell abfallen. Dem Metalle, das durch Reduktion der Verbindung entsteht, gehört nur die blaue Linie (δ) mit $\lambda = 461\ \mu\mu$ an.

6. Calciumchlorid. Eine charakteristische violette Linie $\lambda = 422{,}7$. Verwaschene Banden im Gelbgrün und Grün, darunter eine besonders helle.

7. Indiumchlorid. Intensiv blaue Linie (α) $\lambda = 451{,}1\ \mu\mu$ und eine weniger helle Linie (β) mit $\lambda = 410{,}2\ \mu\mu$ fast am Ende des Spektrums. Durch diese beiden Linien wurde das Indium entdeckt.

8. Thalliumchlorid. Sehr helle, scharfe grüne Linie $\lambda = 535{,}1\ \mu\mu$. Durch diese Linie wurde das Thallium entdeckt.

9. Kupferchlorid. Sehr charakteristisches Bandenspektrum; dasselbe ist zu betrachten bei weiterem und bei sehr engem Spalte. Bemerkenswert sind die Banden im Rot, Grün, besonders aber im Blau (hier ist sehr deutlich zu sehen, daß sie gegen das violette Ende zu scharf sind; sie sind paarweise angeordnet, jedes Paar besteht aus einer helleren breiteren Bande und einer brechbareren schmäleren [„Rhythmus" in der Anordnung der Banden]).

10. Bleichlorid. Banden im Grün und Blau.

11. Manganchlorid. Zwei helle, grüne Banden, in denen bei engem Spalte die ersten von den Linien, aus denen sie bestehen, hervortreten; die hellsten liegen an den dem Violett zugekehrten Enden; nach dem Rot folgen immer schwächer werdende Linien.

12. Magnesiumchlorid. Verwaschene Bande im Grün.

13. Das Bandenspektrum der Kohle. Man stellt den Terquembrenner (Fig. 190) so vor den Spalt, daß bei reichlichem Luftzutritt der untere grüne Teil der Flamme vor der Mitte des Spaltes steht. Man sieht

das „Swan-Spektrum", ein Bandenspektrum, welches früher Kohlenwasserstoffen zugeschrieben wurde, welches aber wohl dem Kohlenstoffe selbst zukommt. Im Rot sieht man mehrere schwache und unbestimmt begrenzte Banden; im Grüngelb beginnt die erste der charakteristischen Hauptbanden mit einer scharfen hellen Linie (ungefähr bei $\lambda = 570\,\mu\mu$), der zahlreiche, immer schwächer werdende Linien in sehr nahe gleichen Abständen folgen (Spalt eng!). Jede Linie ist auf der brechbareren Seite von einem Lichtscheine begleitet, und die Linien bilden eine nach dem Rot hin scharfe, nach dem Violett hin verwaschene Bande. Ebenso ist die zweite, eine sehr helle grüne Bande zusammengesetzt. Komplizierter gebaut ist die dritte blaue Bande; einzelne Linien sind aber auch hier noch zu sehen. Unmittelbar auf eine schwächere indigofarbene Bande folgt nach völlig dunklem Zwischenraume die letzte violette Bande. Im Ultraviolett reiht sich an diese sichtbaren Banden eine Reihe ähnlich gebauter unsichtbarer Banden. Dieses Spektrum zeigen die meisten Kometen.

b) Emissionsspektra der Gase und Dämpfe unter dem Einflusse elektrischer Entladungen.

Die Versuchsanordnung ist dieselbe wie beim Wasserstoff (S. 306).

1. Wasserstoff gibt eine intensiv rote Linie (H_α, $\lambda = 656{,}3\,\mu\mu$, die C-Linie des Sonnenspektrums); eine grünblaue (H_β, $\lambda = 486{,}1\,\mu\mu$, die F-Linie des Sonnenspektrums); eine blaue (H_γ, $\lambda = 434{,}0$, eine Linie in der Nähe von G des Sonnenspektrums) und eine nur schwer zu erkennende violette Linie (H_δ, $\lambda = 410{,}2\,\mu\mu$, h des Sonnenspektrums). Außerdem treten oft rote, gelbe, grüne und blaue Linien und Banden auf, welche zum großen Teile von Spuren atmosphärischer Luft herrühren, zum Teil auch einem Bandenspektrum des Wasserstoffs angehören.

2. Stickstoff gibt ein sehr charakteristisches Bandenspektrum. Im Rot, Orange und Gelb zeigen sich etwa gleich weit voneinander entfernte einander sehr ähnliche Banden, welche nach beiden Seiten gleichmäßig an, Intensität abnehmen. Im Blau und Violett tritt eine Reihe von hellen Banden auf, die alle ihre scharfe Seite dem roten Ende des Spektrums zukehren. Alle diese Banden lösen sich bei stärkerer Dispersion in einzelne, ziemlich breite Linien auf.

Man stellt die Röhre so auf, daß die eine Elektrode vor dem Spalte steht, und macht dieselbe durch Umlegen des Kommutators bald zur positiven Elektrode (Anode), bald zur negativen (Kathode). Auf der äußersten Spitze der Anode sitzt ein blaßrötliches Lichtbüschel auf; das Spektrum desselben besteht aus denselben Banden, die auch im Lichte des Rohres auftreten, wenn auch mit etwas anderer Helligkeitsverteilung. Die Kathode ist ihrer ganzen Länge nach in einen violetten Lichtmantel gehüllt, das sog. „Glimmlicht". Das Spektrum des Glimmlichtes zeigt vor allem eine gelbgrüne, eine grüne und neben anderen schwächeren eine intensiv blaue Bande, die alle drei nach dem Rot zu scharf begrenzt sind. Ist das Rohr sehr weit ausgepumpt, so leuchtet die der Kathode benachbarte Glaswand mit grünlichem Fluoreszenzlichte. — Bei sehr starken Entladungen, z. B. bei Einschaltung von Leidener Flaschen, verwandelt sich das Bandenspektrum des Stickstoffs in ein Linienspektrum.

3. Helium zeigt vor allem eine blendend helle gelbe Linie bei $\lambda = 587{,}6$ (nahe der D-Linie, aber nicht mit dieser zusammenfallend; man überzeuge sich davon durch Vergleich mit dem Bunsenbrenner mit Boraxperle), eine sehr starke grüne Linie bei $\lambda = 502$ und starke Linien im Blau

bei $\lambda = 495, 470, 446$. Die gelbe Linie entspricht der in der Sonne nur hell, nicht dunkel (also nicht als Fraunhofersche Linie) vorkommenden Linie D_3, die vor allem glänzend in der Chromosphäre auftritt.

4. Argon zeigt je nach dem Druck und den Entladungsbedingungen verschiedene Spektren, entsprechend seinem Aussehen, und zwar bei hohen Drucken (100 bis 200 mm Quecksilbersäule) ein grünes, bei niederen (etwa 2 mm Quecksilber) ein rotes; schaltet man ähnlich wie in Fig. 194 eine Leidener Flasche parallel und eine Funkenstrecke vor die Röhre oder geht man zu sehr tiefen Drucken über, so erhält man das blaue Argonspektrum.

Helium und Argon bilden zusammen mit Neon, Krypton und Xenon die Klasse der sog. Edelgase, die erst im letzten Jahrzehnt entdeckt worden sind. Das Argon wurde von Ramsay und Lord Rayleigh aus der Atmosphäre gewonnen; das Helium wurde aus einigen sehr seltenen Mineralien dargestellt und ist auch in sehr geringer Menge in der Atmosphäre enthalten. Das Neon, Krypton und Xenon kommen ebenfalls in der Atmosphäre vor und werden nach Verflüssigung durch fraktionierte Destillation vom Argon und voneinander getrennt.

5. Sauerstoff zeigt zwei intensiv rote Linien und mehrere schwächere Banden in Grün und Blau.

6. Kohlensäure zeigt schwächere Banden im Rot und Orange, zwei sehr helle im Grün und mehrere im Grünblau und Blau, sämtlich nach dem Rot hin scharf begrenzt.

7. Quecksilber. (Das Entladungsrohr ist etwas zu erwärmen!) Die Hauptlinie ist eine grüne (α) $\lambda = 546\ \mu\mu$. Im Gelb ist eine Linie (β) $\lambda = 579$ zu sehen (etwas brechbarer als die meist zugleich auftretende Natriumlinie, die von dem Natrium im Glase herrührt), welche bei engem Spalte als Doppellinie erscheint. Weiter ist eine violette Linie (γ) $\lambda = 476{,}9$ vorhanden.

8. Die Haloidverbindungen des Quecksilbers (Taf. I, a. S. 311) $HgCl_2$, $HgBr_2$, HgJ_2. Man verwendet dieselben in etwa 1,4 cm weiten und 15 cm langen, evakuierten Röhren ohne kapillaren Teil, welche einige Körner von $HgCl_2$, $HgBr_2$ und HgJ_2 enthalten.

Übung. 1. Man bringt die Röhren vor den Spalt, erwärmt sie und schickt die Entladungen durch. Sie zeigen Spektra mit sehr charakteristischen Banden. 2. Man bestimmt die Wellenlängen der scharfen Ränder der Banden. Das Chlorid zeigt eine grüne Bande (Rand etwa $\lambda = 564\ \mu\mu$); das Bromid eine grünblaue (Rand $\lambda = 503\ \mu\mu$); das Jodid eine indigofarbene (Rand $\lambda = 445\ \mu\mu$).

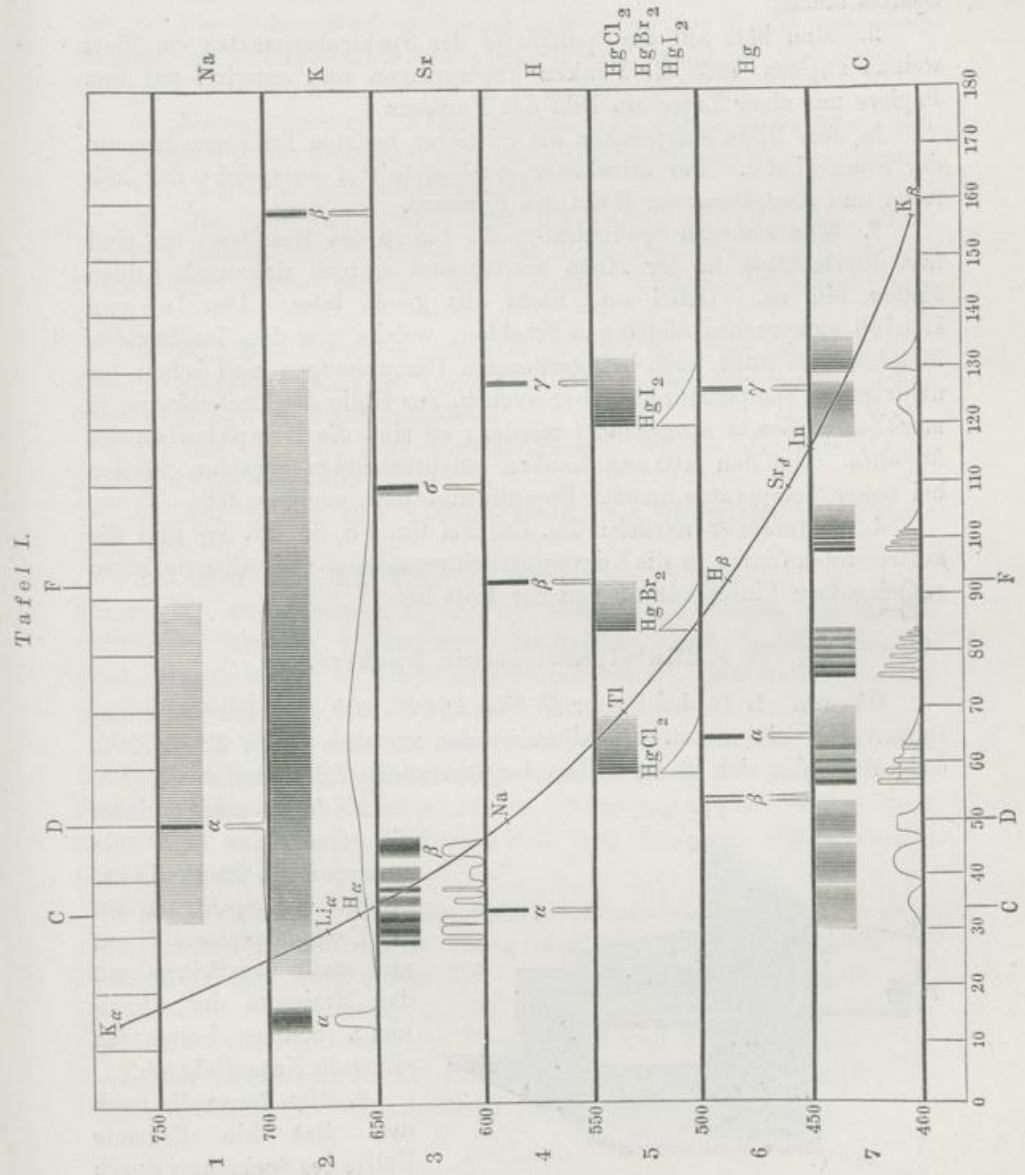
c) Funkenspektra von Salzlösungen.

Übung 1. 1. In einen Fulgurator (Fig. 193) wird eine konzentrierte Lösung von Chlormagnesium gebracht und so vor den sehr engen Spalt gestellt, daß die Strecke zwischen den Platinspitzen in der Mitte desselben steht. 2. Beim Durchgange der Funken sieht man das Magnesiumspektrum, welches besonders durch drei dicht beieinander stehende Linien im Grün ausgezeichnet ist. Solche Linientripel wiederholen sich im violetten Teile des Magnesiumspektrums.

Übung 2. Die gleiche Übung wird mit einem zweiten Fulgurator angestellt, der eine konzentrierte Chlornatriumlösung enthält. Man sieht je eine enge Doppellinie in Gelb, Grün und Blau. In den

ultravioletten Teilen des Spektrums wiederholen sich solche Linienpaare noch mehrere Male.

Das Natriumspektrum ist also durch das Auftreten von Linienpaaren ausgezeichnet, das Magnesiumspektrum durch Linientripel.



Diese Wiederholungen bestimmter Liniengruppen deuten auf gewisse Regelmäßigkeiten in der Schwingungsweise der das Licht aussendenden Moleküle oder Atome, auf „harmonische Schwingungen“.

d) Funkenspektra der festen Metalle; lange und kurze Linien.

Übung. 1. Die Seite 299 unter 5. beschriebene Vorrichtung H wird mit ihrem Fuße G in ein Stativ so festgeklemmt, daß die Spitzen E und E' in einiger Entfernung horizontal vor der Mitte des Spaltes stehen.

2. Man hält auf die Spaltplatte des Spektralapparates ein Blatt weißen Papiers, läßt die Funken überspringen und entwirft auf dem Papiere mit einer Linse ein Bild des Funkens.

In dem Bilde entsprechen die mittleren hellsten Teile dem Inneren der Funkenbahn. Der schwächer leuchtende Hof entspricht der kälteren und dampfärmeren Hülle des Funkens.

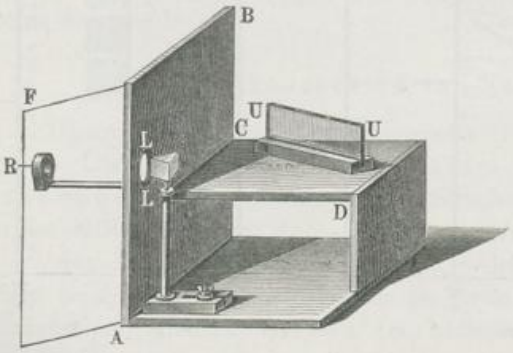
3. Man sieht im Spektroskope die Linien des Metalles. Sie sind fast durchgängig in der Mitte breiter und spitzen sich nach beiden Enden hin zu. Dabei sind nicht alle gleich lang. Den langen Linien entsprechen diejenigen Strahlen, welche von dem leuchtenden Metalldampfe auch noch bei geringeren Dampfmengen und schon bei niedrigeren Temperaturen, daher auch in der Hülle der Funkenbahn, in merklichem Grade ausgesendet werden; es sind die Hauptlinien des Metalles. Die den kurzen Linien entsprechenden Strahlen werden bei hoher Temperatur, großer Dampfmenge usw. ausgesendet.

4. Untersucht werden: Zn, Cd, Fe, Cu, Pb, Sn, Pt, Ag und die auftretenden Linien in die Kurventafel eingezeichnet. Die allen Spektren gemeinsamen Linien rühren von der Luft her.

e) Die ultravioletten Spektra.

Übung. 1. In den Halter H, Fig. 194 (S. 299), werden Cadmiumspitzen EE' eingesetzt. Dieselben werden vor dem Ringe R, Fig. 200, aufgestellt, der sich in der Achse der Quarzlinse LL befindet.

Fig. 200.



2. Man stellt hinter die Quarzlinse LL ein Quarzprisma, fängt wie auf S. 300 das Spektrum auf der Uranglasplatte UU auf und stellt das Prisma auf das Minimum der Ablenkung. Schirme halten das störende Nebenlicht ab.

3. Man fängt die nach dem Rot hin liegende Hälfte des Spektrums durch einen Papierstreifen ab. Auf der Uranglasplatte erscheint eine ganze Reihe von Linien, welche außerhalb des auf dem Papierstreifen sichtbaren Spektrums liegen: ultraviolettes Spektrum.

Die ultravioletten Strahlen rufen an den Stellen des Uranglases, die sie treffen, Fluoreszenz hervor und machen dieselben dadurch selbstleuchtend.

Das ultraviolette Spektrum des Cadmiums ist besonders durch eine Reihe heller Linien ausgezeichnet.

4. Die Übung wird wiederholt mit einem zur Hälfte mit einer Lösung von Chininbisulfat und etwas Gummi arabicum bestrichenen Schirm, ferner mit den oben bei 4. genannten Metallen.

5. Man ersetzt die Cadmiumspitzen z. B. durch solche aus Zink, und erhält auf der Uranglasplatte ein ultraviolettes Spektrum, das von dem des Cadmiums sich unterscheidet.

6. Man hält vor L eine dicke Glasplatte: die äußersten ultravioletten Linien verschwinden. Das Glas absorbiert das äußerste Ultraviolett. Daher bestehen die optischen Teile des Apparates aus Quarz.

7. Man hält vor die Funkenstrecke einen Absorptionstrog, S. 315, dessen Verschlußplatten aus Quarzplatten bestehen. Das Spektrum hat dieselbe Länge wie ohne denselben.

8. Man füllt den Trog mit destilliertem Wasser, das Ultraviolett ist nur wenig verkürzt.

9. Man nimmt eine Salpeterlösung, das Ultraviolett wird stark absorbiert.

10. Man füllt den Trog mit Benzol, das Ultraviolett ist stark absorbiert. Die Versuche 6., 9., 10. lehren, daß Körper, die für die sichtbaren Strahlen vollkommen durchsichtig sind, solche anderer Wellenlängen in hohem Grade absorbieren können, daß die Eigenschaft der Durchsichtigkeit also eine relative ist.

11. An Stelle des Chininschirmes wird eine mit Balmainscher Leuchtfarbe bestrichene Papptafel gesetzt: Die vom Lichte getroffenen Stellen leuchten in bläulichem Lichte. Nimmt man den Schirm fort, so leuchten die erregten Teile eine Zeit lang nach; diese Erscheinung nennt man Phosphoreszenz.

Bemerkung. Alle diejenigen Leuchtprozesse, bei denen eine Lichtentwickelung stattfindet, die größer ist als diejenige, welche der Temperatur der leuchtenden Teile entspricht, faßt man unter der gemeinsamen Bezeichnung „Lumineszenzerscheinungen“ zusammen. Dahin gehören die Fluoreszenz und Phosphoreszenz, bei denen der leuchtende Körper sich nicht merklich erwärmt, ebenso die Lichtentwickelungen bei langsamen Oxydationen.

f) Verwendung der Emissionsspektra zur Analyse.

Einleitung. Daß verschiedene Körper verschiedene Spektra geben, folgt schon daraus, daß viele Substanzen, in die Flamme gebracht, dieselbe färben: Lithium rot, Natrium gelb, Kupfer grün usw. Läßt sich

schon die Flammenfärbung zur Erkennung gewisser Stoffe verwenden, so ist dies in noch weit höherem Grade mit den Spektren der Fall. Schon die ersten Erforscher dieses Gebietes, Bunsen und Kirchhoff (R. Bunsen 1811 bis 1899, 1860, G. Kirchhoff 1824 bis 1887), haben aus dem Auftreten von Linien im Spektrum auf das Vorhandensein bestimmter Elemente geschlossen.

Besonders geeignet ist die Spektralanalyse zur Auffindung der Metalle der Alkali- und Erdalkaligruppe, sowie einiger anderer; die meisten Schwermetalle geben so viele Linien, daß sie schwierig zu identifizieren sind. Mit dem Spektralapparate lassen sich noch erkennen von

Na $0{,}0_6 3$ mgr [1])	Cs $0{,}0_4 5$ mgr	Rb $0{,}0_3 3$ mgr
Li $0{,}0_6 9$ „	Sr $0{,}0_4 6$ „	K $0{,}0_2 1$ „
Ca $0{,}0_4 1$ „	Tl $0{,}0_4 2$ „	Ba $0{,}0_2 1$ „

Treten in einem Spektrum eines Körpers Linien auf, die bei keinem bekannten Elemente aufgefunden sind, so liegt die Vermutung nahe, daß in dem Körper ein neues Element enthalten ist. Der Gang der Gewinnung des betreffenden Elementes läßt sich durch die Spektralanalyse kontrollieren; man fällt etwa aus der Lösung des zu behandelnden Körpers durch ein Reagens einen Niederschlag. Das Spektroskop läßt, wenn man die eingedampfte Lösung und den Niederschlag auf ihr Emissionsspektrum untersucht, erkennen, in welchem von beiden der neue Körper vollständig oder überwiegend enthalten ist.

Auf diese Weise sind entdeckt worden: Cäsium und Rubidium von Bunsen und Kirchhoff, Thallium von Crookes und Lamy, Indium von Reich und Richter, Gallium von Lecoq de Boisbaudran.

Übung 1. Der Praktikant erhält ein Gemisch von Chloriden solcher Metalle, welche im Bunsenbrenner ein charakteristisches Spektrum liefern (vgl. S. 308). Er ermittelt aus den auftretenden Linien durch Vergleichung mit den von ihm gemachten Aufzeichnungen der Metallinien, welche Metalle das Gemisch enthält.

Übung 2. Verwendung des Vergleichsprismas. Um zu konstatieren, ob eine Linie einem bekannten Elemente zukommt oder nicht, verwendet man das Vergleichsprima.

1. Man stellt vor die Fläche *a* des Vergleichsprimas (S. 303) und direkt vor den Spalt je eine Lampe. Man sieht zwei Spektren, die durch eine dunkle horizontale Linie getrennt sind. Man hält abwechselnd ein Blatt Papier vor die obere Spalthälfte und vor die Fläche *a*: der oberen Hälfte entspricht das untere Spektrum und umgekehrt.

2. Man stellt vor beide Spalthälften Bunsenbrenner mit Chlornatrium: die gelben Linien liegen genau übereinander.

---

[1]) Wir setzen $0{,}0_6 3 = 0{,}0000003$.

3. Prüfung, ob in einer roten Flamme neben Strontium noch Lithium vorhanden ist oder nicht. Man bringt die zu untersuchende Substanz in die Flamme vor den Spalt, während vor dem Vergleichsprisma eine Flamme mit Chlorlithium steht.

Liegt eine der roten Linien über der roten Lithiumlinie, so ist Lithium vorhanden, sonst nicht.

7. Absorptionsspektra.

Einleitung. Wie die Emissionsspektra für die einzelnen Körper charakteristisch sind, so auch ihre Absorptionsspektra. Die Moleküle eines Körpers vermögen nur Schwingungen zu absorbieren, die mit denjenigen in naher Beziehung stehen, welche sie selbst oder in ihnen enthaltene Atomkomplexe ausführen. Die Beobachtung der Absorptionsspektra liefert daher eine wichtige Ergänzung der letzteren.

Für die praktische Verwendung der Farbstoffe sind Untersuchungen von Bedeutung, welche ersehen lassen, wie sich die Absorption ändert, wenn man in einer färbenden Verbindung ein Element, etwa den Wasserstoff, durch andere Elemente oder Atomgruppen ersetzt.

a) Untersuchung und Aufzeichnung der wichtigsten Absorptionsspektra[1]).

Gebraucht wird: Gestelle mit Absorptionsröhren, welche die unten erwähnten Präparate enthalten; farbige Gläser; Uran- und Didymglas; Gaslampe mit Rundbrenner; Spektralapparat nach Bunsen und Kirchhoff, mit einem Träger für die Absorptionsröhren; Reißbrett und Kurventafel.

Vorbemerkung. Die unter „Beispiele“ beschriebenen Versuche sind als Übung in folgender Weise auszuführen:

Bei der Untersuchung der Absorptionsspektra wird das Licht untersucht, welches Schichten des betreffenden Körpers durchsetzt hat; dazu stellt man in den Weg der von einer weißen Lichtquelle kommenden und auf den Spalt eines Spektralapparates fallenden Lichtstrahlen Schichten der absorbierenden Substanz. — Ist sie fest, so verwendet man Platten derselben, ist sie flüssig oder gasförmig, so bringt man sie in planparallele Glaströge oder in Glasröhren.

1. Man stellt Tröge oder Röhren mit den unter „Beispiele“ aufgeführten Substanzen vor den Spalt, letztere so, daß die infolge ihrer cylindrischen Gestalt entstehende Brennlinie auf denselben fällt.

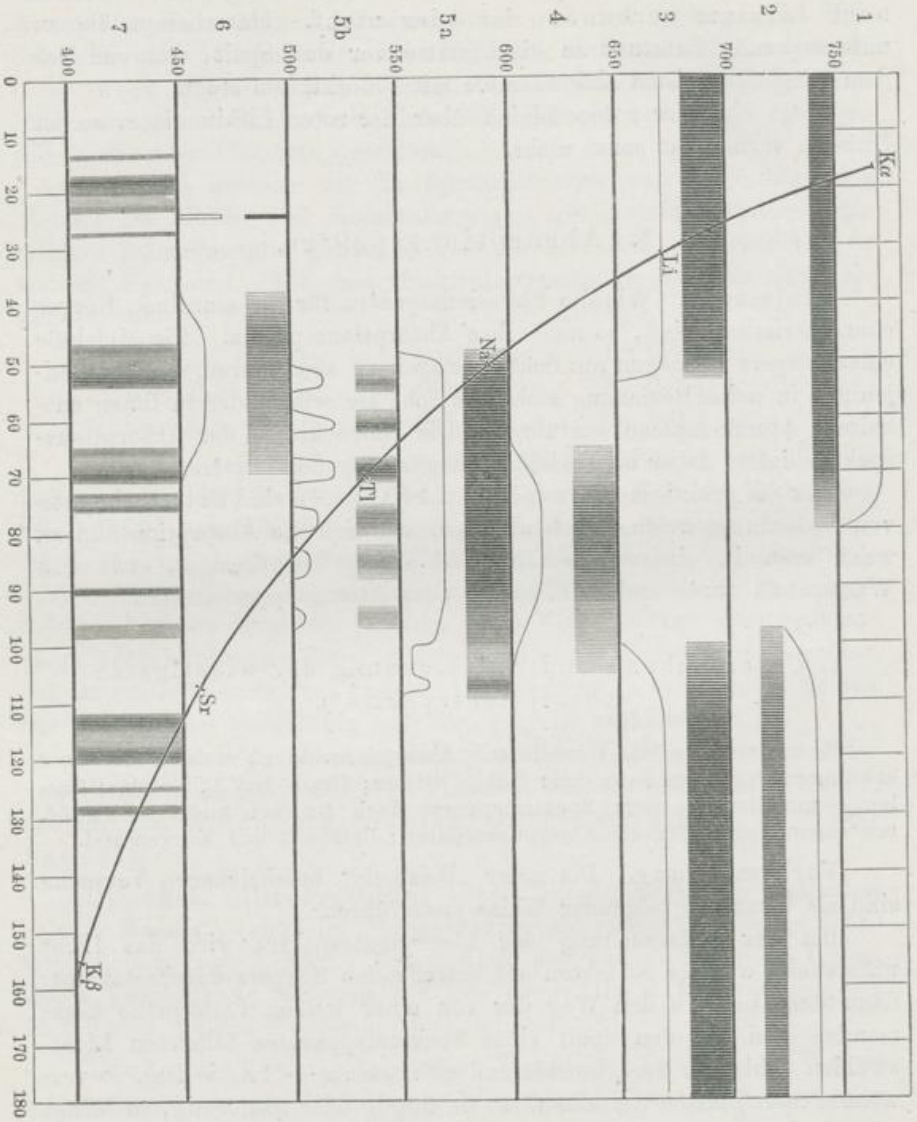
2. Man bestimmt für die unten angeführten Substanzen an der Skala die Lage der dunklen Stellen, der Absorptionsstreifen.

3. Man zeichnet dieselben in die Kurventafel in ähnlicher Weise

---

[1]) Über die Untersuchung der ultravioletten Absorptionspektra vgl. S. 312.

Tafel II.


1
2
3
4
5a
5b
6
7
750
700
650
600
550
500
450
400
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180
Kα
Li
Na
Tl
Sr
Kβ
Schwefelsaures Kupferoxyd-Ammoniak
Typus I.
Pikrinsäure
Kupferchlorid konzentriert
Typus II.
Kobaltchlorid
Übermangansaures Kali konzentriert
Typus III.
Übermangansaures Kali verdünnt
Oxalsaures Chromoxydkalium
Typus IV.
Didymglas

ein, wie die Emissionsspektra, und gibt die Helligkeitsverteilung in jedem einzelnen Streifen wieder: 1. durch Schattierung, 2. durch Kurven, deren höchste Stelle der stärksten Absorption entspricht; so sind die Kurven auf Taf. II, S. 316 gezeichnet; die Kurve $K_\alpha, Li \ldots K_\beta$ ist die S. 306 erwähnte.

Beschreibung einiger Absorptionsspektra. Die Absorptionsspektra kann man in vier Typen einteilen.

1. Typus: Einseitige Absorption. Eine Hälfte des Spektrums, gewöhnlich die blaue, wird vollständig absorbiert. Die Grenze der Absorption rückt mit steigender Konzentration stetig nach dem Rot vor.

Beispiele: Eisenchlorid; Kaliumbichromat; Pikrinsäure (Taf. II, Nr. 2) (sie lassen Rot, Gelb und etwas Grün durch und absorbieren das blaue Ende); Kupfersulfat; schwefelsaures Kupferoxyd-Ammoniak, hergestellt durch Zusatz von NH_3 zu einer Kupfersulfatlösung, bis der Niederschlag gelöst ist (Taf. II, Nr. 1) (läßt Blau durch, absorbiert Rot, Gelb und Grün ganz oder zum Teil).

2. Typus: Zweiseitige Absorption. Die beiden Enden des Spektrums werden absorbiert, die mittleren Teile werden durchgelassen.

Beispiele: Kupferchlorid (konzentriertere wässerige Lösungen absorbieren alle Strahlen bis zum Grün und auf der anderen Seite vom Grünblau an; die Lösung erscheint grün [vgl. auch S. 319]); Nickelchlorid, Kupferacetat.

3. Typus: Bandenspektra. Bei diesen treten innerhalb des sichtbaren Spektrums mehr oder weniger breite, an den Rändern verwaschene Banden oder dunkle Felder („Schatten") auf. Nicht selten gesellt sich dazu eine einseitige oder zweiseitige Absorption der Enden des Spektrums. Die oben als einseitige und zweiseitige Absorption beschriebene Erscheinung ist in vielen Fällen ein Bandenspektrum, bei dem der eine Rand einer Bande im ultravioletten oder infraroten Spektrum liegt und nur der andere im sichtbaren Spektrum.

Beispiel: Verdünnter Rotwein; Kobaltchlorid (Taf. II, Nr. 4); rote und blaue Gläser. Hierher gehören auch die beim Joddampfe zu beobachtenden Erscheinungen (s. unter 4).

4. Typus: Linienspektra. Das Spektrum ist durchzogen von einzelnen dunkeln Absorptionslinien. Linienabsorptionsspektra zeigen besonders die Gase und Dämpfe.

Beispiel: Man erwärmt ein etwas Jod enthaltendes, zugeschmolzenes Reagierglas. Das Spektrum zeigt im Grün drei dunklere Absorptionsbanden, die bei viel Dampf zu einem tiefen Schatten zusammenfließen; beim allmählichen Erkalten erkennt man in den Banden, sowie im ganzen Gelb bis tief ins Rot hinein bei engem Spalte eine große Zahl feiner, scharfer Linien.

Untersalpetersäure (NO_2), welche in eine Röhre eingeschmolzen ist, zeigt dunkle Linien vor allem im Grün und Blau; beim Erhitzen mit einem Bunsenbrenner werden dieselben dunkler und zahlreicher. Es beruht dies auf einer Dissoziationserscheinung; bei sehr niedrigen Temperaturen hat der Körper die Zusammensetzung $(NO_2)_2$. $(NO_2)_2$ ist ungefärbt; beim Erwärmen

zerfällt je 1 Mol. $(NO_2)_2$ in 2 Mol. NO_2, die gefärbt sind. Je höher die Temperatur, um so mehr Moleküle $(NO_2)_2$ sind in Moleküle NO_2 zerfallen, um so dunkler ist die Farbe. Natürlich erreicht die Dunkelheit der Streifen eine Grenze, sobald alle Moleküle $(NO_2)_2$ in NO_2 zerfallen sind.

Zu dieser Klasse von Spektren gehört auch das Sonnenspektrum (S. 325).

Auch einige Salze zeigen ein Linienabsorptionsspektrum.

Beispiel: Kaliumchromoxalat. Man stellt in einem Reagierglase eine nicht zu verdünnte Lösung desselben kalt her und hält sie vor den Spalt: Das Spektrum zeigt im Gelb eine verwaschene breite Bande (Typus 3), im Rot eine dunkle scharfe Linie (Typus 4) (Taf. II, Nr. 6). Das Spektrum stellt also eine Verbindung vom 3. und 4. Typus dar.

Didym in Didymglas oder Lösungen von Didymsalzen. — Da das Helligkeitsverhältnis der Linien bei Didymverbindungen nach den Fundorten wechselt, so muß das Didym verschiedene Substanzen enthalten. Man hat in der Tat aus demselben eine Reihe neuer Elemente (Neodidym, Praseodidym usw.) gewonnen, nach analogen Prinzipien, wie sie bei der Emissionsspektralanalyse (S. 314) besprochen wurden, nur daß hier die Absorptionsspektra die Anhaltspunkte für die zur Reindarstellung der einzelnen Bestandteile dienenden Prozesse geben.

b) Einfluß von Temperatur, Schichtdicke usw. auf die Absorptionsspektra.

Gebraucht wird: Keilförmiges Hohlprisma; Pfefferminztee; Alkohol und Äther. Jodblei und Chromgelb, Quecksilberjodid und Kupferjodid-Quecksilberjodid. Wässerige und alkoholische Safraninlösung; wässerige Kupferchloridlösung (verdünnt und konzentriert); Jod in Alkohol und in Schwefelkohlenstoff gelöst; Kobaltchloridlösung mit und ohne Zusatz von Kochsalz; Reagenzgläser.

I. Einfluß der Schichtdicke. Je dicker die absorbierende Schicht ist, um so dunkler und breiter sind die Absorptionsstreifen. Bei sehr dicken Schichten können mehrere Absorptionsstreifen zu einem einzigen zusammenfließen. Dem entsprechend ändert sich in manchen Fällen die Farbe der Lösung.

Beispiel: 1. Man extrahiert durch Übergießen von Pfefferminztee mit Alkohol den grünen Pflanzenfarbstoff, das Chlorophyll.

2. Man füllt mit dem Aufguß eine keilförmige Glasflasche, welche man vor dem Spalt vorüberschiebt, und verfolgt die Änderung des Absorptionsspektrums, wenn man von dünneren Schichten allmählich zu immer dickeren übergeht. Bei dünnen Schichten und nicht zu starken Konzentrationen zeigt der alkoholische Aufguß nahe beieinander fünf getrennte Absorptionsstreifen im Gelb, Grün und Grünblau.

II. Einfluß der Konzentration. Mit zunehmender Konzentration verbreitern sich die Absorptionsbanden wie bei zunehmender Schichtdicke und werden dunkler. Dabei können unter Umständen mehrere derselben zu einer einzigen breiten Bande verschmelzen, so daß dadurch der Charakter des Spektrums verändert erscheint. (Vor-

ausgesetzt ist, daß bei Konzentrationsänderungen nicht auch chemische Veränderungen eintreten [vgl. das zweite Beispiel].)

Beispiel: Kaliumpermanganat (vgl. Taf. II, Nr. 5a und 5b) zeigt in konzentrierten Lösungen eine dunkle, vom Gelb bis in das Blau gehende Bande; in verdünnten Lösungen löst sich dieselbe in eine Reihe (6) sehr nahe gleich weit voneinander abstehender Banden im Grün auf.

Eine verdünnte wässerige Lösung von Kupferchlorid zeigt eine blaue Färbung; im Absorptionsspektrum fehlen die äußersten roten und violetten Teile. Konzentrierte Lösungen zeigen eine intensiv grüne Farbe, das durchgelassene Licht besteht nur noch aus Grün und etwas Blau. Hier gesellt sich zu dem Einflusse der Konzentration der Einfluß einer Bildung von wasserhaltigen $CuCl_2$-Molekülen bei wachsender Verdünnung oder einer Dissoziation.

Bemerkung. Infolge der Verbreiterung der Absorptionsstreifen kann die Farbe verdünnter Lösungen eine ganz andere sein als diejenige konzentrierter, z. B. bei vielen Anilinfarben, beim Chlorophyll, das in hinlänglich dünnen Schichten in verdünnten Lösungen grün, in sehr konzentrierten dagegen rot erscheint; man bezeichnet diese Erscheinung oft unpassend als Dichroismus, ein Ausdruck, der nur auf gewisse Erscheinungen bei Kristallen (vgl. bei Polarisation) angewandt werden sollte.

III. Einfluß des Lösungsmittels. Je nach dem Lösungsmittel ändern sich die Absorptionsspektra für einen Körper. Der Einfluß des Lösungsmittels kann 1. ein rein physikalischer sein; die Absorptionsstreifen sind in den Lösungen vieler Substanzen um so weiter nach dem Rot verschoben, je stärker das Lösungsmittel dispergiert, d. h. je größer die Konstante B in der Cauchyschen Formel (S. 251) ist (Kundtsche Regel); 2. ein chemischer sein; durch den Einfluß des Lösungsmittels bedingte Änderungen im molekularen Bau des absorbierenden Körpers verändern das Spektrum wesentlich.

1. Beispiel für physikalische Veränderung. Von einem konzentrierten alkoholischen Chlorophyllauszuge werden mit der Pipette gleiche Mengen zu gleichen Mengen von Äther, Alkohol, Chloroform, Benzol und Schwefelkohlenstoff gesetzt; der dem Rot zunächst liegende Absorptionsstreifen erscheint bei jedem folgenden Lösungsmittel weiter nach dem Rot zu verschoben; die obigen Lösungsmittel sind so geordnet, daß jedes folgende eine größere Dispersion besitzt, als das vorhergehende.

2. Beispiel für chemische Veränderungen. Safranin in Wasser zeigt einen sehr breiten, verwaschenen, matten Absorptionsstreifen, der fast das ganze Grün erfüllt; Safranin in Alkohol zeigt zwei verhältnismäßig dunkle und schmale Streifen im Gelbgrün.

Jod in Alkohol gelöst zeigt eine braune Färbung. Die Lösung läßt nur Rot und Gelb durch, aber kein Blau und Violett, selbst nicht in großen Verdünnungen. Eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff zeigt die violette Färbung des Joddampfes. Blau und Violett werden durchgelassen und nur das Grün wird absorbiert. Hier treten wohl lockere Bindungen zwischen dem Lösungsmittel und dem gelösten Körper auf.

IV. Einfluß der Temperatur. Mit zunehmender Temperatur ändern sich die Absorptionsspektra; die Temperatur kann dabei 1. rein physikalisch einwirken, dann nimmt die Absorption zu; 2. chemisch, indem molekulare Umlagerungen oder chemische Umsetzungen eintreten.

Beispiel für physikalische Umänderung. Man erhitzt das hellgelbe Jodblei und das gelbe Chromgelb auf einem Platinbleche, sie werden dunkelgelb, fast rotbraun, schon ehe sie schmelzen. Beim Abkühlen tritt die alte Farbe wieder hervor. Für die Annahme einer chemischen Umänderung, welche die Farbenwandlung bedingte, liegt hier kein Grund vor.

Beispiel für chemische Umänderung. 1. Man erhitzt das rote Jodquecksilber, es wird gelb und behält die Farbe beim Abkühlen, es geht in eine andere Modifikation über. 2. Man reibt es oder läßt es länger liegen; das Rot erscheint wieder. 3. Rotes Kupferjodid-Quecksilberjodid wird beim Erwärmen schwarz, auch hier bildet sich eine neue Modifikation.

Das Dunklerwerden des Pulvers rührt daher, daß die in die Körnchen des heißen Pulvers eindringenden und nach der Reflexion an der Rückfläche wieder austretenden Strahlen stärker geschwächt, also stärker absorbiert werden, als bei Anwendung des kalten Pulvers; die verschiedene Farbe rührt daher, daß die Absorptionspektra selbst sich ändern.

Beispiel für chemische Umsetzungen in der Lösung unter gleichzeitigem Einfluß der Temperatur. 1. Man erwärmt eine wässerige Lösung des Kobaltchlorides, welche einen breiten, verwaschenen Absorptionsstreifen im Grün zeigt, es ist keine Veränderung bemerklich.

2. Man setzt der Lösung des Kobaltchlorides etwas Chlornatrium zu und erwärmt, sie wird bläulich und zeigt neben dem verwaschenen Streifen im Grün ein breites, aus einem helleren und einem weniger brechbaren, sehr dunkeln Teile bestehendes Band im Rot und zwei feine, scharfe Linien im Rot. Beim Abkühlen verschwinden diese Linien und Banden und die Lösung nimmt wieder ihre ursprügliche Färbung an.

3. Man erwärmt eine verdünnte blaue Lösung von Kupferchlorid, sie wird grün.

c) Verwendung der Absorptionsspektra zur Analyse.

Gebraucht wird: Spektralapparat. Mit Fuchsin gefärbte Gelatineplatte; Lösung von KCl, von NaCl und von KCl + NaCl; Bunsenbrenner. — Urannitratlösung; granuliertes Zink; Salzsäure; Eisenchloridlösung mit und ohne Zusatz von Urannitrat; Reagenzgläser. — Frisches Blut; Schwefelammoniumlösung; Salzsäure; Ätzkali (oder kohlensaures Natron); Leinewand mit eingetrockneten Blutflecken; Reagenzglas zur Entwickelung von Kohlenoxyd; Oxalsäure; Schwefelsäure; weinsaure Eisenoxydullösung (1 Tl. Eisenvitriol, 1 Tl. Weinsäure, 10 Tle. Wasser).

I. Nachweis von Kalium neben Natrium.

Eine dünne, mit Fuchsin gefärbte Gelatineplatte oder eine Platte aus Kobaltglas läßt nur das Rot und äußerste Blau durch, absorbiert aber das Gelb; man benutzt sie zum Nachweise von Kalium neben Natrium in der Flamme.

Übung. 1. An einer Platindrahtöse wird ein Tropfen einer mäßig konzentrierten Chlornatriumlösung in die Flamme des Bunsen-

brenners gebracht und die Flamme durch eine mit Fuchsin gefärbte, dünne Gelatineplatte oder eine Kobaltglasplatte betrachtet: die Flammenfärbung ist fast unmerklich.

2. Die Flamme wird durch eine Chlorkaliumperle gefärbt und durch die Platte betrachtet; die Flamme erscheint hellviolett; die Platte läßt die roten und violetten Strahlen des Kaliums durch, die gelben des Natriums dagegen nicht.

3. Von zwei Lösungen enthält die eine nur Chlornatrium, die andere auch Chlorkalium. Mit Hilfe der Flammenfärbung ist zu ermitteln, in welcher Lösung sich das Kalium befindet.

II. Spektralreaktionen der Uransalze.

Erkennung des Urans. Uraninitrat ($UO_2N_2O_6 + 6H_2O$) zeigt in wässerigen, konzentrierten Lösungen eine gleichförmige Absorption im Indigo und Violett; in der Nähe der $F(H_\beta)$-Linie eine schwache, schmale Absorptionsbande, weiter nach dem Violett eine ganze Reihe von Banden; ähnliche Erscheinungen zeigen andere Uranisalze.

Die Uranosalze haben Absorptionsbanden im Rot bis Grün s. w. u.

Übung 1. 1. In eine in einem Reagenzglase enthaltene konzentrierte Uraninitratlösung wirft man einige Stückchen granulierten Zinks und gießt reichlich Salzsäure dazu. Unter lebhafter Wasserstoffentwickelung färbt sich die Lösung allmählich schmutzig dunkelgrün, das Uranisalz wird zu dem Uranosalz reduziert.

2. Man gießt etwas von dieser Lösung in ein etwa 12 mm weites Reagenzglas und stellt sie vor den Spektralapparat. Man erhält das Absorptionsspektrum der Uranosalze. Dasselbe zeigt eine sehr kräftige, breite Absorptionsbande im Orange und eine schmälere, aber ebenfalls sehr dunkle Linie nach dem Rot zu. Beide sind in einen schwächeren Schatten gehüllt, in dem nach dem Gelb zu noch ein schwaches, drittes Absorptionsmaximum zu sehen ist. Im Grün erscheint eine breite, verwaschene, schwächere Bande, im Blau mehrere schwache Banden, an letztere schließt sich eine starke Absorption des Violett. Durch dieses Spektrum, besonders durch die Linien im Orange, kann man Spuren von Uran nachweisen; Gegenwart von anderen Metallen stört die Reaktion nicht.

Übung 2. Von zwei Eisenchloridlösungen, von denen der einen Uraninitrat zugesetzt ist, werden Proben in zwei gleich weite Reagenzgläser gegossen, beide werden durch Zink und (reichlichen) Salzsäurezusatz reduziert. Das Auftreten des Absorptionsspektrums der Uranosalze zeigt, welche von den beiden Lösungen Uran enthält.

III. Die Blutreaktionen.

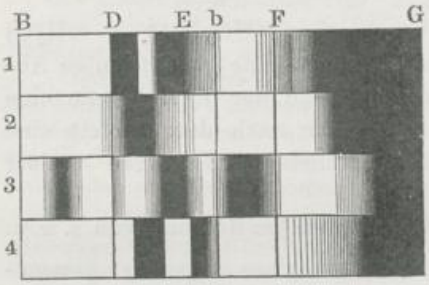
Übung. 1. Man verdünnt frisches Blut mit 40 Tln. Wasser; die Lösung zeigt die zwei sehr intensiven Absorptionsstreifen des

Oxyhämoglobins im Gelb und Grüngelb (Fig. 201, Nr. 1). Der eine Streifen beginnt fast genau an der Natriumlinie (*D*). Im Blau hinter *F* beginnt die totale Absorption.

2. Man verdünnt die wässerige Blutlösung mehr und mehr: die Streifen werden schmäler, behalten aber ihre mittleren Lagen bei. Man bestimmt die Lage der Mitten der beiden Streifen an der Skala.

3. Zu einer verdünnten Blutlösung setzt man etwas Schwefelammonium und läßt sie eine Zeitlang stehen: die Oxyhämoglobinstreifen verschwinden; ein sehr blasser, breiter, verwaschener Streifen im Grün tritt auf (Fig. 201, Nr. 2). Der Blutfarbstoff wird reduziert, das Band im Grün kommt dem reduzierten Hämoglobin zu. Alkalische Reduktionsmittel reduzieren also das Oxyhämoglobin.

Fig. 201.



4. Man schüttelt die Lösung, der Blutfarbstoff oxydiert sich wieder, die beiden Streifen des Oxyhämoglobins treten wieder auf.

5. Man stellt eine konzentrierte Blutlösung her und tropft einige Tropfen Salzsäure zu: die Lösung wird braun, die Hämoglobinstreifen verschwinden. Es tritt ein dunkler Streifen im Rot und zwei sehr breite und verwaschene Streifen im Grün auf (Fig. 201, Nr. 3). Das im Rot auftretende Band nennt man das Säureband. Saure Reduktionsmittel zerstören das Oxyhämoglobin.

6. Man erwärmt eine verdünnte Blutlösung mit einer konzentrierten Lösung von Ätzkali oder Natriumcarbonat. Die Lösung wird grün: es entsteht Oxyhämatinalkali. Beim Erkalten wird die Lösung rötlich. Das Spektrum zeigt einen leichten Schatten im Gelb, daneben aber manchmal noch einen intensiv schwarzen Streifen im Gelbgrün.

7. Man schüttelt die Lösung kräftig mit Luft: es tritt wieder eine Oxydation ein; der dunkle Streifen verschwindet, es bleibt nur der matte Schatten. Häufig kommt der Streifen gar nicht zum Vorschein.

8. Man setzt zu der soeben erhaltenen Lösung einige Tropfen Schwefelammonium: sogleich erscheinen zwei sehr dunkle Streifen im Grün (vgl. Fig. 201, Nr. 4), die große Ähnlichkeit haben mit den Oxyhämoglobinstreifen. Der nach dem Rot hin gelegene Streifen ist aber ungleich intensiver als der andere, viel mehr, als dies bei den Oxyhämoglobinstreifen der Fall ist. Beide Streifen liegen ferner dem Blau näher. Sie gehören dem reduzierten Hämatin an.

9. Untersuchung eingetrockneter Blutflecke. Von einem mit eingetrocknetem Blute befleckten Stück Leinwand schneidet man einige Streifen ab und erhitzt sie mit Na_2CO_3-Lösung (1 : 10) einige

Zeit. Man gießt etwas von der entstandenen braunen Lösung in ein Reagenzglas und tropft etwas $(NH_4)_2S$ zu. Sofort erscheinen die für das reduzierte Hämatin charakteristischen Streifen (Fig. 201, Nr. 4).

10. Nachweis einer Blutvergiftung durch Kohlenoxyd. Eine Lösung von Ferrotartrat (1 Tl. Eisenvitriol, 1 Tl. Weinsäure und 10 Tle. Wasser) wird mit 0,6 ihres Volumens Ammoniak versetzt.

11. Man tropft von dieser Lösung einige Tropfen in eine sehr verdünnte Lösung von reinem, frischem Blut: die Oxyhämoglobinstreifen verschwinden, und ein sehr verwaschener Streifen im Grün tritt auf.

12. Man gießt von der ursprünglichen Blutlösung etwas in ein Reagenzglas und leitet einige Minuten lang einen Strom von Kohlenoxyd hindurch. Man stellt dies dar, indem man in einem Reagenzglase über kristallisierte Oxalsäure konzentrierte Schwefelsäure gießt und gelinde erwärmt. (Die bei dem Zerfall der Oxalsäure neben dem Kohlenoxyd auftretende Kohlensäure braucht man nicht zu entfernen.)

Die Blutlösung nimmt eine etwas mehr rosafarbene Farbe an.

13. Man gießt zu dieser CO-haltigen Blutlösung etwas von der alkalischen Ferrotartratlösung: die Oxyhämoglobinstreifen verschwinden nicht; dadurch unterscheidet sie sich von der reinen Blutlösung.

d) Summations- und Differenzfarben.

Gebraucht wird: Rotationsapparat; Farbenscheiben; Spektralapparat; Absorptionströge; Kupfersulfatammoniak und Kaliummonochromatlösung, Gummigutt, Indigo, Reibschale. Die S. 324 aufgeführten Lösungen.

Einerseits geben auf der Palette gemischt Gelb und Blau Grün, anderseits sind sie komplementäre Farben, geben also auf der rotierenden Scheibe des Farbenkreisels oder sonst übereinander gelagert Weiß.

Übung 1. Nachweis, daß auf der rotierenden Scheibe Blau und Gelb Weiß geben. Auf irgend eine rotierende Vorrichtung wird eine halb gelb, halb blau gefärbte Scheibe gesteckt und gedreht, der Eindruck ist grau. Bei der Rotation der Scheibe lagern sich auf derselben Netzhautstelle die beiden Farben übereinander, man erhält als Summationsfarbe Weiß[1]).

Übung 2. Nachweis, daß hintereinander geschaltete blaue und gelbe Schichten Grün geben.

1. Man stellt vor den Spalt eines Spektralapparates einen Trog mit Kupfersulfatammoniaklösung. Im Spektrum ist vorhanden Grün, Blau, Violett.

2. Man stellt einen Trog mit Kaliummonochromat vor den Spalt. Im Spektrum ist vorhanden Rot, Gelb, Grün.

---

[1]) Anschließend kann man den Praktikanten mit den anderen Hauptkomplementärfarben Grün und Rot bekannt machen.

3. Man stellt vor den Kaliummonochromattrog denjenigen mit Kupfersulfatammoniak. Es ist nur noch Grün zu sehen, denn von den von der Kupfersulfatlösung durchgelassenen Strahlen läßt die Kaliumchromatlösung nur die grünen hindurch. Man hat eine Differenzfarbe.

4. Man reibt in einer Reibschale gelbes Gummigutt und Berlinerblau zusammen, die Farbe ist grün.

Die Farbe ist hier dadurch bedingt, daß das weiße Licht nacheinander die gelben und blauen Farbkörnchen durchsetzt, man also auch eine Differenzfarbe erhält.

e) Verbindung verschiedener absorbierender Substanzen zur Erzeugung ziemlich homogenen Lichtes.

Schaltet man Tröge gefüllt mit passenden Substanzen in passender Konzentration und passender Schicht dicht hintereinander, so erhält man ziemlich homogenes Licht von der Wellenlänge λ (man nennt solche Vorrichtungen mit Landolt Strahlenfilter).

Beispiele nach Landolt:

Farbe	Dicke der Schicht in mm	Wässerige Lösungen von	g-Substanz in 100 ccm Lösung	Opt. Schwerpunkt in $\mu\mu$	Drehung für 1 mm Quarz
Rot	20	Kristallviolett, 5 BO,	0,005	665,9	16,78°
	20	Kaliummonochromat	10		
Gelb	20	Nickelsulfat, $NiSO_4 + 7$ aq.	30	591,9	21,49°
	15	Kaliummonochromat	10		
	15	Kaliumpermanganat	0,025		
Grün	20	Kupferchlorid, $CuCl_2 + 2$ aq.	60	533,0	26,85°
	20	Kaliummonochromat	10		
Hellblau	20	Doppelgrün, SF	0,02	488,5	32,39°
	20	Kupfersulfat, $CuSO_4 + 5$ a.	15		
Dunkelgrün	20	Kristallviolett, 5 BO	0,005	448,2	39,05°
	20	Kupfersulfat	15		

Übung. Es werden die obigen Lösungen hergestellt und für die Tröge einzeln und bei Hintereinanderschaltung von zwei oder drei derselben die Transmissionsspektra bestimmt.

Bemerkung. Entsprechende Gläser werden von Schott und Genossen in Jena in den Handel gebracht.

8. Untersuchung des Sonnenspektrums.

Gebraucht wird: Heliostat; Spektralapparat; Papptafel; Kurventafel; Vergleichsprisma; Natriumflamme.

Übung. 1. Man leitet das von der Sonne oder dem hellen Himmel kommende Licht durch einen Heliostaten auf den Spalt des Spektralapparates, wobei man es durch ein vorgesetztes Papier ev. abschwächt.

2. Man macht den Spalt eng: man sieht in dem Farbenbande eine Reihe von dunkeln Linien, die „Fraunhoferschen Linien" (Fig. 202), vgl. S. 234.

3. Man bestimmt die Lage derselben auf der Skala in folgender Weise:

Man beleuchtet die Skala, stellt das Fadenkreuz auf die betreffende Linie im Sonnenspektrum, blendet durch ein vor den Spalt gehaltenes Stück Pappe die Sonnenstrahlen ab, liest die Lage des Fadenkreuzes auf der Skala ab und trägt die Punkte in die Kurventafel ein.

Man sieht, daß auf dieselbe Stelle fallen: Linie D und die gelbe Na-Linie; ferner b und die S. 310 beschriebenen Mg-Linien im Grün, sowie die Fraunhoferschen Linien C, F und h und die Wasserstofflinien H_α, H_β, H_γ.

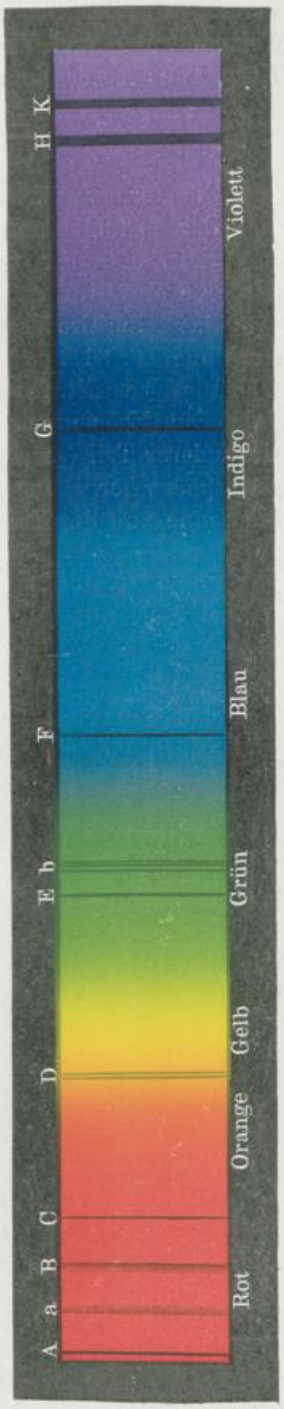
4. Die Koinzidenz der D-Linie und der Na-Linie ist noch mit dem Vergleichsprisma zu konstatieren.

5. Man stellt eine Na-Flamme vor den Spalt, während auf ihn die Sonnenstrahlen treffen. Die D-Linie erscheint viel dunkler als zuvor.

6. Man stellt eine Lithiumflamme vor den Spalt; an der Stelle, wo die rote Li-Linie liegt, erscheint eine dunkle Linie.

Aus solchen Beobachtungen wie 5. und 6. und entsprechenden theoretischen Betrachtungen hat G. Kirchhoff (1859) den Satz abgeleitet:

Fig. 202.



Das Verhältnis des Emissionsvermögens E zum Absorptionsvermögen A ist für alle Körper ein und dieselbe Funktion f von Temperatur T und Wellenlänge λ. Da für einen absolut schwarzen Körper das Absorptionsvermögen gleich 1 ist, so ist:

$$\frac{E}{A} = f(T\lambda) = E_s \text{ (schwarz)}.$$

Die Formeln für die Größe E_s (J) sind S. 297 gegeben.

Daraus folgt dann:

„Ein Körper sendet gerade diejenigen Strahlen aus, die er absorbiert."

Das Kirchhoffsche Gesetz gilt aber nicht für die Lumineszenzstrahlung. S. 313.

Die Fraunhoferschen Linien entsprechen zum Teil Absorptionslinien von Elementen, die in der Sonnenatmosphäre vorhanden sind, ein anderer Teil (so A und B) rührt von der Absorption in der Erdatmosphäre her. Aus dem Auftreten der ersteren schließt man, daß die Sonne und die Erde dieselben Elemente enthalten.

VII. Interferenz des Lichtes.

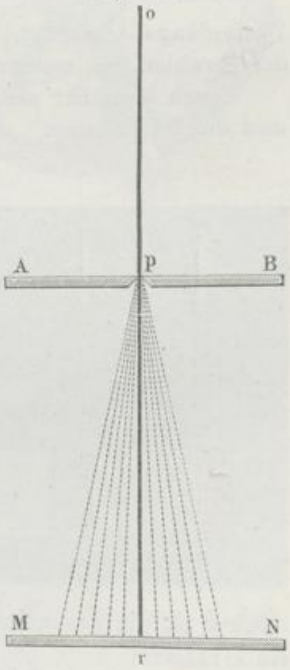
1. Bestimmung der Wellenlänge λ mit dem Gitter.

Einleitung.

Gebraucht wird: Spektrometer; kleines Prisma; verstellbarer Spalt; Glasgitter; Gaslampe; Bunsenbrenner; Natrium- und Lithiumchlorid; Mikroskop; geteilte Glasplatte.

Fällt auf einen Spalt eine Lichtwelle, so verhält sich das den Spalt erfüllende Stück der Welle wie eine Lichtquelle, d. h. von jedem Punkte des Spaltes breitet sich nach allen Seiten Licht aus (Fig. 203) (Prinzip von Huygens, 1629 bis 1695, 1690), der einfallende Strahl wird gebeugt. Die Intensität des Lichtes ist um so kleiner, je stärker der gebeugte Strahl gegen den geradlinig fortschreitenden geneigt ist.

Fig. 203.



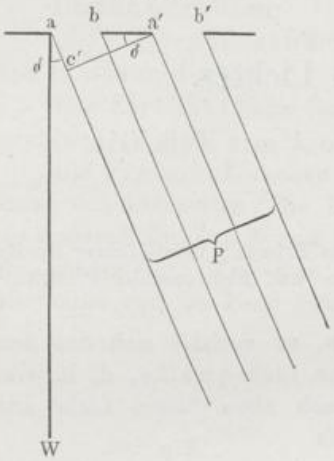
Der Spalt hat stets eine endliche Breite, von jedem Punkte desselben geht ein divergierendes Strahlenbündel aus; die in einer bestimmten Richtung ausgehenden, untereinander parallelen Strahlen, welche in den verschiedenen Bündeln enthalten sind, haben durch die Beugung verschiedene Gangunterschiede erhalten.

Wir vereinen die in einer bestimmten Richtung ausgehenden, untereinander parallelen Strahlen durch eine in ihren Weg gestellte Linse auf einem Schirm zu einem Bilde des Spaltes und untersuchen die Helligkeit desselben. Durch Einschaltung der Linse werden die Gangunterschiede zwischen den einzelnen Strahlen nicht geändert, und es treten Minima und Maxima auf.

Es seien zwei Spalte ab und $a'b'$ (Fig. 204 a. f. S.) gegeben; wir beleuchten dieselben mit homogenem Licht von der Wellenlänge λ. Von jedem Spalt gehen Bündel paralleler Strahlen aus, welche verschieden

stark gegen das Lot aW auf der Spaltebene geneigt sind. Wir vereinigen zunächst Strahlen derjenigen zwei Bündel, die so verlaufen, daß der Gangunterschied zwischen den am weitesten links gelegenen Strahlen eines jeden derselben $ac' = {}^1/_2\,\lambda$ ist, dann heben sich diese beiden Strahlen auf (vgl. S. 138), es tritt Dunkelheit ein, und da der Gangunterschied auch für alle anderen von entsprechenden Stellen, z. B. den Mitten der Spalte, ausgehenden Strahlen derselbe ist, so heben sich die ganzen Strahlenbündel auf. Ist der Gangunterschied der beiden zuerst erwähnten Strahlen $= \lambda$, so verstärken sich dieselben und ebenso alle anderen paarweise, es tritt Helligkeit auf. Wächst der Winkel, den die Strahlenbündel mit dem auf der Spaltebene errichteten Lot bilden, so nimmt der Gangunterschied stetig zu, er nimmt z. B. die Werte ${}^1/_2\,\lambda$, λ, ${}^3/_2\,\lambda$, $2\,\lambda$, ${}^5/_2\,\lambda$ an, und es wechseln helle und dunkle Stellen auf dem Schirme ab.

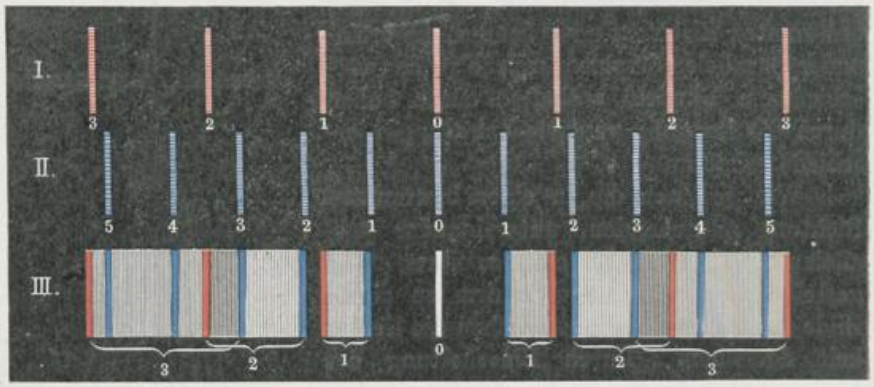
Fig. 204.



Je kleiner der Abstand aa' ist, um so stärker müssen die Strahlen geneigt sein, damit der Gangunterschied ac' eine Wellenlänge λ beträgt. Je kleiner λ ist, um so kleiner ist die Neigung der Strahlen, bei welcher $ac' = \lambda$ wird.

Auch bei mehr als zwei Spalten erhalten wir eine Reihe von hellen und dunkeln Stellen. Je größer die Zahl der Spalte ist, um so licht-

Fig. 205.



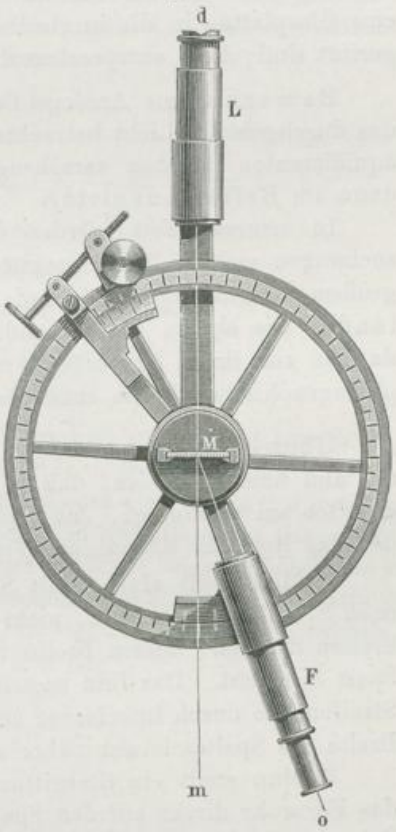
stärker ist die Erscheinung. Man nennt eine solche Reihe von Spalten ein Gitter.

Fällt weißes Licht auf das Gitter, so erhalten wir auf dem Schirm Spektren, bei denen das Violett (II) (Fig. 205), da es der kleinsten Wellenlänge entspricht und daher bei der kleinsten Neigung

der Strahlen ein Maximum der Helligkeit liefert, am nächsten dem direkt durchgehenden Strahl (0) liegt, das Rot (I) dagegen am weitesten von demselben abliegt. Weiter von dem gerade durchgehenden Strahl abliegende Spektren greifen übereinander (III).

Bei einem Gitter heißt die von einer dunkeln Stelle und einem Zwischenraum eingenommene Strecke $C = aa'$ die Gitterkonstante; diese und nicht etwa die Breite des dunkeln oder diejenige des hellen Zwischenraumes für sich ist für die Lage und Breite der Spektren maßgebend; die Spektren bezeichnet man als das erste, zweite, dritte Gitterspektrum; bei ihnen beträgt der Gangunterschied zwischen entsprechenden Strahlen 1, 2, 3 ... Wellenlängen, man zählt sie von dem direkt durchgegangenen Strahl an, dessen Bild als das 0te Spektrum bezeichnet wird.

Fig. 206.



Ist δ der Winkel zwischen der Normalen aW (Fig. 204) auf dem Spalt und den parallelen Strahlen P, und ist die Gitterkonstante $aa' = C$, so tritt Helligkeit auf, sobald

$$C \sin \delta = ac' = \lambda \text{ oder } = 2\lambda,$$

allgemein, wenn $C \sin \delta_n = n\lambda$,

wo δ_n die Ablenkung für den untersuchten Strahl im n^{ten} Spektrum ist.

Statt der $\sin \delta$ kann man für kleine Winkel auch die Winkel δ selbst, gemessen durch die Kreisbögen, setzen, also die in Graden gemessenen Winkel, dividiert durch 57,296. Man findet dann:

$$C\delta_n = n\lambda.$$

Der dem n^{ten} Maximum entsprechende Winkel δ_n verhält sich zu dem dem ersten Maximum entsprechenden δ_1 wie $n:1$:

$$\delta_1 : \delta_n = 1 : n \text{ [1]}.$$

Messen wir die Winkel δ'_n und δ''_n, wie sie in irgend einem Spektrum zwei Linien mit den Wellenlängen λ' und λ'' zukommen, so ist:

$$C\delta'_n = n\lambda' \text{ und } C\delta''_n = n\lambda'' \text{ oder } \delta'_n : \delta''_n = \lambda' : \lambda'' \text{ [1]},$$

[1]) Diese Proportionalität gilt auch, wenn man die Winkel in gewöhnlicher Weise mißt.

d. h. es verhalten sich die Ablenkungen wie die Wellenlängen. Das von einem Gitter entworfene Spektrum heißt Normalspektrum, da die Ablenkungen der einzelnen Strahlen proportional den Wellenlängen sind.

Apparat. Derselbe besteht aus einem Spektrometer, dessen Fernrohre senkrecht zur Drehungsachse gestellt sind (s. S. 263), und auf dessen Tisch man ein Prisma oder ein Gitter aufstellen kann, d. h. eine Glasplatte, in die in gleichen Abständen voneinander Linien eingeritzt sind; diese entsprechen den dunkeln Stellen des Gitters.

Bemerkung. Analoge Betrachtungen gelten, wenn man nicht das durchgehende Licht betrachtet, sondern das an einer mit parallelen, äquidistanten Strichen versehenen Platte reflektierte Licht; man hat dann ein Reflexionsgitter.

In neuerer Zeit werden bei wissenschaftlichen Spektraluntersuchungen vielfach Reflexionsgitter benutzt, welche auf Hohlspiegel mit großem Radius eingeritzt sind: Konkav- oder Hohlgitter (Rowland). Sie eignen sich besonders zur Photographie des Spektrums, da das von ihnen entworfene reelle Bild derselben direkt auf einer photographischen Platte entworfen werden kann.

Übung. 1. Vorübung. 1. Man stellt zunächst das Prisma auf und überzeugt sich, daß in dem von diesem erzeugten Spektrum das Rot am wenigsten, das Violett am stärksten abgelenkt ist, und daß das Rot sehr schmal, das Violett sehr breit ist.

2. Man stellt einen Spalt S auf das Tischchen. Man sieht, wie nach S. 327 zu erwarten, nicht eine feine Lichtlinie, sondern einen breiten Streifen, dessen Breite um so größer wird, je enger man den Spalt S macht. Das Bild besteht aus mehreren hellen und dunkeln Streifen, die durch Interferenz entstehen. Sie rücken mit zunehmender Breite des Spaltes immer näher zusammen.

3. Man stellt ein Glasgitter M statt des Prismas auf und richtet das Fernrohr direkt auf den Spalt d. Dreht man es nach rechts oder links, so sieht man Spektren (Fig. 205), deren rote Enden am stärksten, deren violette am wenigsten abgelenkt sind, das Gelb liegt etwa in der Mitte des Spektrums; das Rot ist breit, das Violett schmal.

2. Senkrechtstellen des Gitters. Zu den Messungen muß man das Gitter senkrecht zur Kollimatorachse stellen. (Auf Benutzung des Minimums der Ablenkung bei der Bestimmung der Wellenlängen gehen wir hier nicht ein.) 1. Man setzt in das Beobachtungsfernrohr ein Gaußsches Okular ein, bzw. verwendet die oben erwähnte Glasplatte (S. 263 oben). 2. Man stellt vor den Spalt eine Gaslampe und stellt das Fadenkreuz direkt auf den Spalt ein. 3. Man stellt das Gitter auf das Tischchen und dreht es, bis das direkt gesehene Fadenkreuz sich mit seinem Spiegelbilde am Gitter deckt.

3. Messung. a) Man stellt das Fadenkreuz auf den Spalt ein und liest die Stellung des Fernrohres ab; Ablesung: α_0.

Man stellt das Fadenkreuz auf das Rot im ersten, zweiten, dritten Spektrum; Ablesung: α_1, α_2, α_3.

Die Ablenkungen sind $\alpha_1 - \alpha_0$, $\alpha_2 - \alpha_0$, $\alpha_3 - \alpha_0$. Es ist

$$\alpha_1 - \alpha_0 : \alpha_2 - \alpha_0 : \alpha_3 - \alpha_0 = 1 : 2 : 3.$$

b) Man ersetzt die Gaslampe durch eine Natrium- und Lithiumflamme, welche Strahlen von den Wellenlängen λ_{Na} und λ_{Li} liefern, und macht dieselben Ablesungen wie oben:

$$\text{für } Na\text{: } \beta_1 \ldots \beta_n, \text{ für } Li\text{: } \gamma_1 \ldots \gamma_n.$$

Dann ist z. B.:

$$\beta_1 - \alpha_0 : \beta_2 - \alpha_0 : .. = \gamma_1 - \alpha_0 : \gamma_2 - \alpha_0 : .. = 1 : 2 : ..$$

Hieraus ergibt sich das Verhältnis der Wellenlängen:

$$\lambda_{Na} : \lambda_{Li} = \beta_n - \alpha_0 : \gamma_n - \alpha_0.$$

Kennen wir λ_{Na}, so können wir auch λ_{Li} finden.

c) Bestimmung der Wellenlänge λ_{Na}. Es ist

$$C \sin \delta_n = n \lambda_{Na}.$$

In dieser Gleichung kennen wir δ_n und n; um λ_{Na} zu berechnen, müssen wir noch: d) die Gitterkonstante C bestimmen.

Man legt auf den Tisch eines Mikroskopes eine in $^1/_m$ mm geteilte Glasplatte p mit der Teilung nach oben und auf diese das Glasgitter, mit der geteilten Fläche nach unten, und zählt ab, wieviel Teilstriche x auf dem Gitter dem Zwischenraum zwischen zwei Strichen der Platte p entsprechen. Die Gitterkonstante ist $C = {}^1/_{mx}$ mm, denn mx Zwischenräume des Gitters kommen auf 1 mm; also ist:

$$\lambda_{Na} = \frac{C \sin \delta_n}{n}.$$

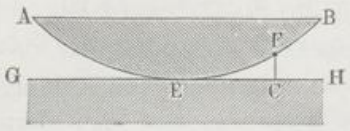
2. Newtonsche Farbenringe.

Gebraucht wird: Teilmaschine; Gläser für die Newtonschen Farbenringe; Natrium- und Lithiumflamme; rotes Glas oder mit Fuchsin gefärbte Gelatineplatte; Linse; planparallele Glasplatte; Fernrohr, Stative.

Prinzip. Fallen parallele Lichtstrahlen auf eine durchsichtige Platte, so wird ein Teil derselben an der Vorderfläche reflektiert, ein anderer Teil dringt in die Platte ein und wird zum Teil an der Hinterfläche zurückgeworfen. An der Vorderfläche treffen also Strahlen zusammen, welche verschieden lange Wege von ihrem Ausgangspunkte in der Lichtquelle zurückgelegt haben, die also mit einem gewissen Gangunterschiede weiter gehen. Solche Strahlen geben zu Interferenzerscheinungen Anlaß (vgl. S. 138).

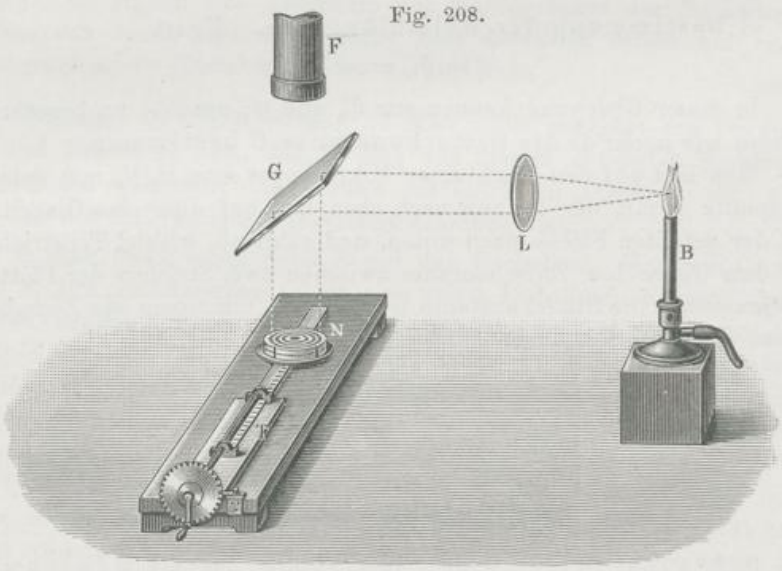
Wir erhalten eine dünne Luftplatte, wenn wir auf die ebene Glasplatte GH (Fig. 207) eine schwach gekrümmte Plankonvexlinse AEB legen; der Radius der gekrümmten Fläche sei R. Fallen senkrecht auf die ebene Fläche AB homogene Strahlen von der Wellenlänge λ, so interferieren Strahlen, welche zum Teil an der Glasplatte GH, zum Teil an der Fläche AEB reflektiert worden sind. Die Größe des Gangunterschiedes zwischen denselben hängt von der Dicke $FC = d$ der Luftschicht zwischen AEB und GEH ab; da diese in gleichen Entfernungen r von dem Berührungspunkte E bei senkrechter Inzidenz immer die gleiche ist, so entstehen konzentrische helle und dunkle Ringe (Fig. 208 bei N).

Fig. 207.



Ist der Durchmesser eines beliebigen hellen oder dunkeln Ringes gleich D, und ist der des nächst größeren hellen oder dunkeln Ringes gleich D_1, so ist $D_1^2 - D^2 = 8\,R\,.\,{}^1/_2\,\lambda$, ist der Durchmesser des zweitnächsten gleich D_2, so ist $D_2^2 - D^2 = 8\,R\,.\,{}^2/_2\,\lambda$ usf. Bestimmt man für Licht mit einer bekannten Wellenlänge, z. B. λ_{Na}, einige Ringdurchmesser, so kann man hieraus R berechnen[1]). Für jede andere Strahlengattung kann man dann umgekehrt aus dem gemessenen D und dem bekannten R die Wellenlänge λ berechnen.

Fig. 208.



Apparat (Fig. 208). Auf den Schlitten einer Teilmaschine T werden die zur Erzeugung der Farbenringe dienenden Newtonschen Gläser N gelegt; dieselben werden durch das durch die Linse L parallel

[1]) Dabei brauchen die Gläser sich nicht zu berühren.

gemachte und durch die Glasplatte G senkrecht nach unten geworfene Licht einer Natrium- oder Lithiumflamme erleuchtet. Über der Glasplatte G steht das Fernrohr F.

Übung 1. Messung der Radien der Ringe. 1. Man beleuchtet das Plattensystem N mit gelbem Natriumlicht, stellt das Fernrohr F in die Vertikalebene, welche durch die Achse der Linse L und die Flamme geht, bringt das auf der Teilmaschine befestigte System N gleichfalls in diese Ebene und stellt auf die Ringe ein.

2. Man dreht das Fernrohr so, daß ein Faden des Fadenkreuzes senkrecht zu der Schraube der Teilmaschine steht.

3. Man dreht die Schraube der Teilmaschine und bringt dadurch die einzelnen Ringe der Reihe nach auf den Faden, der senkrecht zur Schraube steht.

4. Man liest für die beiden rechts und links vom Mittelpunkt gelegenen Mitten eines und desselben hellen (oder dunkeln) Ringes, der der Mitte nicht zu nahe liegt, sowie für die nach außen auf ihn folgenden hellen (oder dunkeln) Ringe die Stellungen an der Teilmaschine a, a', a_1, a_1', a_2, a_2', ... ab.

Dann ist $D = a - a'$, $D_1 = a_1 - a_1'$, $D_2 = a_2 - a_2'$, ..., die Differenzen $D_1^2 - D^2$, $D_2^2 - D^2$, ... verhalten sich wie die aufeinander folgenden Zahlen 1, 2, 3 ...

Übung 2. Bestimmung des Krümmungsradius R. Aus den Durchmessern des größten D_g und kleinsten D_k der gemessenen hellen oder dunkeln Ringe und der Wellenlänge $\lambda = 0{,}000\,589$ mm des gelben Natriumlichtes berechnet man R nach der Formel:

$$R = (D_g^2 - D_k^2)/4\,n\,\lambda,$$

wo n die Zahl der zwischen D_k und D_g liegenden hellen oder dunkeln Ringe ist[1]).

Übung 3. Bestimmung der Wellenlänge des Lithiumlichtes. 1. Man färbt die Flamme durch Einbringen von Lithiumchlorid rot. Wenn die Ringe nicht rein rot erscheinen, sondern noch gelbe Säume zeigen, so ist neben Lithium zu viel Natrium in der Flamme. Man hält letzteres durch eine in den Gang der Strahlen gebrachte Gelatineplatte ab, welche mit Fuchsin rot gefärbt ist.

---

[1]) Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Ganghöhe der Schraube genau 1 mm beträgt, daß man also die D durch die Ablesungen von a in Millimetern erhält. Ist dies nicht der Fall, so muß man die Schraube eichen. Dazu legt man eine in Millimeter geteilte Skala auf die Teilmaschine und bestimmt in der unter 1. angegebenen Weise die Ablesungen A und A', welche einer bestimmten Anzahl n von Millimetern entsprechen. Dann ist $(A - A')/n = c$ die Ganghöhe der Schraube, und jede der Differenzen $a - a'$, $a_1 - a_1'$ usw. muß mit c multipliziert werden.

2. Man bestimmt die Durchmesser einer Anzahl p aufeinander folgender heller Ringe. Dann ist

$$\lambda_{Li} = (D_a^2 - D_i^2) / 4\, p\, R,$$

wo D_a und D_i die Durchmesser des äußersten und innersten der gemessenen Ringe sind.

Bemerkung. Da die Ringdurchmesser bei verschieden gefärbtem Lichte verschieden groß sind, so entstehen bei Beleuchtung mit weißem Lichte farbige Ringe, die freilich nur da deutlich zu sehen sind, wo die Luftplatte sehr dünn ist. Diese sowohl im auffallenden wie im durchgehenden weißen Lichte sichtbaren Farben gehören zu den „Interferenzfarben dünner Blättchen".

VIII a. Polarisation und Polarisationswinkel.

I. Einleitung.

Gebraucht wird: Der Nörrembergsche Apparat (Fig. 214) mit analysierendem Spiegel, Glasplattensatz und drehbarem Nicol; Glasplatte; Kalkspatkristall (Spaltungsstück in Fassung); Fadenmodell des Kalkspatrhomboeders; Nicolsche Prismen und Modell derselben; Turmalinzange; Crown- und Flintglasplatte, Apparat Fig. 219 mit Fernrohr und Mattglasglühlampe.

Das Licht besteht aus transversalen Schwingungen, d. h. Schwingungen senkrecht zum Lichtstrahl; bei dem gewöhnlichen, natürlichen Lichte erfolgen die Schwingungen in allen Ebenen, die durch den Lichtstrahl gelegt sind. Jede dieser Schwingungen läßt sich theoretisch in zwei zerlegen (vgl. S. 346), von welchen die eine in einer gegebenen Ebene, die andere in einer dazu senkrechten Ebene stattfindet.

Durch besondere Vorrichtungen können wir nun einen natürlichen Strahl in zwei zerlegen, die so beschaffen sind, daß bei jedem oder doch bei einem derselben die Schwingungen sämtlich nur in einer einzigen Ebene stattfinden; ein solcher Lichtstrahl heißt geradlinig polarisiert. Dies geschieht mehr oder weniger vollkommen bei der Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen an ebenen Flächen.

Von Vorrichtungen zur Erzeugung von polarisierten Strahlen besprechen wir den Nörrenbergschen Polarisationsapparat, das Nicolsche Prisma (auch kurz Nicol genannt) und die Turmalinplatte.

a) Polarisation durch Reflexion und Brechung an ebenen Glasflächen.

Wird ein Lichtstrahl ab von einer ebenen Fläche A_1 (Fig. 214) eines durchsichtigen Körpers unter einem für jede Substanz bestimmten Winkel P, dem Polarisationswinkel, reflektiert, so ist der reflektierte Strahl vollkommen polarisiert (S. 339). Die Einfalls- bzw. Reflexionsebene des Spiegels A_1 heißt die Polarisationsebene des reflektierten Strahles.

Nach der jetzt allgemein angenommenen elektromagnetischen Lichttheorie erfolgt die elektrische Zustandsänderung, die den Lichtschwingungen entspricht (vgl. S. 232), senkrecht zur Polarisationsebene, die damit verbundene magnetische Änderung in derselben. Fresnel hatte

dieselbe Anschauung, nach Neumann sollten die Schwingungen in der Polarisationsebene erfolgen.

Bezeichnet n den Brechungsindex, so ist der Polarisationswinkel bestimmt durch $n = tg P$. Für Glas ist daher $P =$ etwa 57^0.

Der durch die ebene Fläche hindurchgehende gebrochene Strahl ist gleichfalls polarisiert, aber nicht vollkommen, er enthält einen Überschuß von Strahlen, deren Polarisationsebene senkrecht steht zu derjenigen der reflektierten Strahlen, daneben aber auch solche, deren Polarisationsebene die gleiche Lage hat wie diejenige der reflektierten. Läßt man den Strahl durch eine ganze Reihe aufeinander gelegter Platten, einen sog. Plattensatz, gehen, auf deren erste er unter dem Polarisationswinkel einfällt, so wird der letztere Anteil immer kleiner; das aus dem Plattensatze austretende Licht ist fast vollkommen polarisiert, seine Polarisationsebene steht senkrecht zur Einfallsebene.

b) Polarisation durch Doppelbrechung.

A. Erscheinung der Doppelbrechung (Fig. 209 und 210). Fällt auf einen von einer ebenen Fläche begrenzten Körper ein Lichtstrahl, so können zwei Fälle eintreten.

Fig. 209.

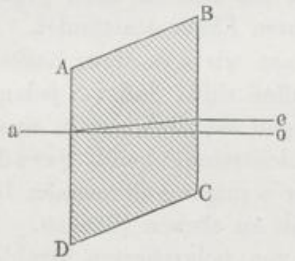
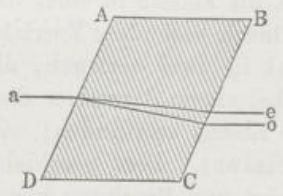


Fig. 210.



1. Aus dem einfallenden Strahle entsteht nur ein gebrochener Strahl. Körper, die sich so verhalten, heißen einfach brechende, isotrope. Dahin gehören alle amorphen Körper, solange keine Spannungen im Inneren derselben vorhanden sind (Gase, Flüssigkeiten, Glas), sowie die Kristalle des regulären Systems.

2. Aus dem einfallenden Strahle entstehen, und zwar auch, wenn der Einfallswinkel 0^0 (Fig. 209) ist, zwei gebrochene Strahlen. Körper, die sich so verhalten, heißen doppelbrechende, anisotrope. Dahin gehören amorphe Körper, falls in ihnen Spannungen vorhanden sind (gekühltes und gepreßtes Glas); ferner alle Kristalle, die nicht dem regulären Systeme angehören. Wir behandeln nur die Erscheinungen an Kristallen.

Da nach S. 250 der Brechungsindex gleich dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in Luft und dem zweiten Medium ist, so müssen sich in doppelbrechenden Körpern zwei Strahlen, richtiger zwei Wellen, mit verschiedenen Geschwindigkeiten fortpflanzen.

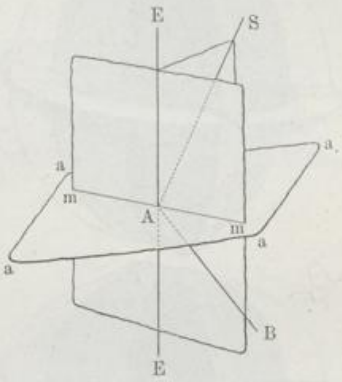
Man unterscheidet zwei Fälle.

a) Von den beiden entstehenden Strahlen gehorcht der eine stets dem Snelliusschen Brechungsgesetze, für ihn ist der Brechungsindex eine Konstante, man nennt ihn daher den ordentlichen oder ordinären Strahl; für den zweiten Strahl ist dies nicht der Fall, man nennt ihn den außerordentlichen oder extraordinären Strahl.

Hierher gehören die Kristalle des quadratischen und des hexagonalen Systems, also der Systeme mit einer ausgezeichneten Achse. Die kristallographische Hauptachse ist auch in optischer Hinsicht ausgezeichnet. Man nennt diese Kristalle optisch einachsige.

b) Von den beiden entstehenden Strahlen gehorcht keiner dem Snelliusschen Brechungsgesetze, für beide ändert sich je nach der Lage der einfallenden Strahlen der Brechungsindex. Die hierher gehörigen Körper kristallisieren im rhombischen, monoklinen und triklinen System. Da bei ihnen zwei Richtungen in optischer Hinsicht ausgezeichnet sind, heißen sie optisch zweiachsige.

Fig. 211.



Bei den optisch einachsigen unterscheidet man wieder zwischen positiven und negativen Kristallen. Bei den positiven ist der Brechungsindex der ordinären Strahlen kleiner als der der extraordinären, bei den negativen ist ersterer größer als der letztere. Negativ ist der hexagonal rhomboedrisch kristallisierende Kalkspat ($CaCO_3$), positiv der hexagonal tetartoedrisch kristallisierende Quarz (SiO_2). Eine ähnliche Unterscheidung macht man auch bei den optisch zweiachsigen Kristallen.

B. Polarisation der durch Doppelbrechung entstehenden Strahlen. Trifft (Fig. 211) ein Strahl SA, der in der Einfallsebene SAE liegt, in einem Punkte A auf eine ebene Kristallfläche $aaaa$ eines optisch einachsigen Kristalls, errichtet man in A das Einfallslot AE und zeichnet die durch A gehende Hauptachse des Kristalls AB, so heißt die Ebene, die durch EAE und AB geht, d. h. die Ebene, in der die Hauptachse und das Einfallslot liegen, der Hauptschnitt, mm ist seine Schnittlinie mit der Grenzfläche. Die Polarisationsebene des ordinären Strahles liegt parallel, die des extraordinären senkrecht zu dem Hauptschnitte.

C. Erklärung der Doppelbrechung aus den Wellenflächen nach Fresnel (1788 bis 1827, 1821). In einem Punkte O eines Körpers möge sich ein leuchtender Punkt befinden. Die zur Zeit $t = 0$ von dem Punkte ausgehenden Bewegungen ergreifen zur Zeit τ eine Reihe von anderen Punkten, diese sind in gleicher Phase und

bilden zusammen die Wellenfläche. Befindet sich der leuchtende Punkt im Inneren eines einfach brechenden isotropen Körpers, so ist die Wellenfläche eine Kugel. Ist z. B. $\tau = 10^{-10}$ Sek., so ist im Vakuum die Wellenfläche eine Kugeloberfläche von 3 cm Radius. Ist n der Brechungsindex des Körpers, d. h. das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im Vakuum und dem Körper, so hat die betreffende Kugel in ihm zur Zeit $\tau = 10^{-10}$ Sek. den Radius von $3/n$ cm.

Bei den anisotropen doppelbrechenden Körpern pflanzen sich im allgemeinen in jeder Richtung zwei zueinander senkrecht polarisierte Bewegungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten fort.

Fig. 212.

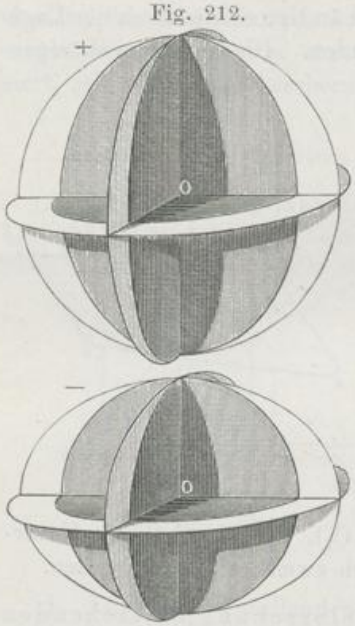
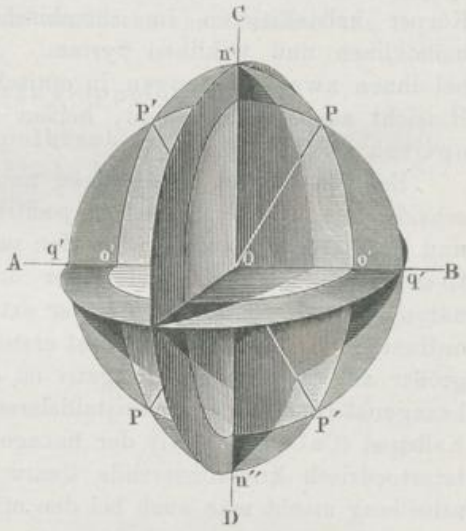


Fig. 213.



Bei den optisch einachsigen Kristallen besteht die Wellenfläche (Fig. 212) aus einer Kugel und einem Umdrehungsellipsoid, erstere entspricht dem ordinären mit der nach allen Richtungen konstanten Geschwindigkeit, letzteres dem extraordinären Strahle. Die Länge der Rotationsachse, der optischen Achse, ist gleich der des Kugeldurchmessers. Je nachdem die kleine oder die große Achse Rotationsachse ist, unterscheidet man zwischen negativen und positiven Kristallen. In der Richtung der optischen Achse pflanzt sich nur ein Strahl mit einer Geschwindigkeit fort, der Kristall ist in dieser Richtung einfach brechend. Die Fig. 212 gibt drei zueinander senkrechte Schnitte der Wellenfläche, von denen zwei durch die optische Achse gelegt sind. Die Ebene senkrecht zu derselben wird von den beiden Oberflächen in Kreisen geschnitten. In dieser Ebene sich fortpflanzende extraordinäre Strahlen haben in jeder Lage gleiche Geschwindigkeit v_e, daher auch

beim Eintritt aus der Luft den gleichen Brechungsindex (den extraordinären Hauptbrechungsindex).

Die Wellenoberfläche der zweiachsigen Kristalle ist weit komplizierter (vgl. Fig. 213). Die durch AB und CD gelegte Ebene enthält die größte und kleinste Fortpflanzungsgeschwindigkeit. In dieser Ebene gibt es zwei Richtungen, längs deren die zwei sonst entstehenden

Fig. 214.

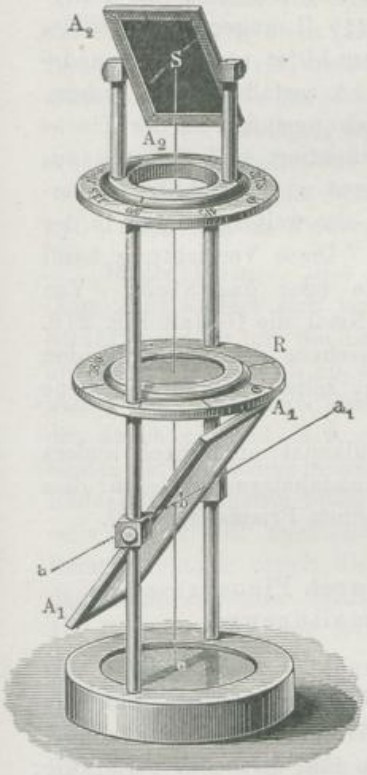


Fig. 215.

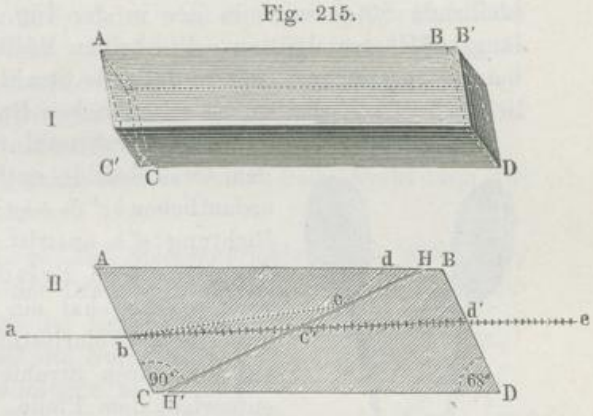
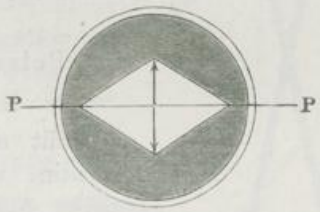


Fig. 216.



senkrecht zueinander polarisierten Strahlen gleiche Geschwindigkeiten besitzen: PP und $P'P'$. Man nennt diese Richtungen die optischen Achsen.

Pflanzen sich in einem Körper ebene Wellen fort, bei denen die in einer Ebene liegenden Teilchen sich in gleicher Phase befinden, so steht in isotropen Körpern der Strahl zu diesen ebenen Wellen senkrecht, im anisotropen aber nicht immer. Man betrachtet daher hier meist die Wellennormalen.

II. Apparate.

a) Der Nörrembergsche Polarisationsapparat.

Er besteht aus einer ebenen Glasplatte $A_1 A_1$ (Fig. 214), die um eine horizontale Achse drehbar ist, und aus einer schwarzen Glasplatte $A_2 A_2$,

die ebenfalls um eine horizontale, aber auch um eine vertikale Achse um einen an einem Kreise meßbaren Winkel gedreht werden kann. Die Platte A_2 kann man auch durch einen Glasplattensatz ersetzen.

b) Das Nicolsche Prisma.

Von einem Spaltungsstücke eines Kalkspates $AB'C'D$ (Fig. 215 I) werden zunächst Stücke $BB'D$ und $CC'A$ abgeschliffen, das übrigbleibende Stück wird in der in der Fig. 215 II angegebenen Weise längs HH' zerschnitten. Die beiden Hälften kittet man mit Kanadabalsam zusammen. Der einfallende Strahl ab zerfällt in den ordentlichen bc (...), der wegen seines hohen Brechungsindex an der Fläche HH' nach cd total reflektiert und dadurch aus dem Gesichtsfelde entfernt wird, und den außerordentlichen bc' (++++), der weitergeht und in der Richtung $d'e$ austritt. Diese Vorrichtung heißt das Nicolsche Prisma oder das Nicol. Von vorn gesehen hat ein Nicol die Gestalt Fig. 216. PP ist die Polarisationsebene des durchgehenden extraordinären Strahles, seine Schwingungsebene entspricht dem Pfeile.

Fig. 217.

Man kann den Kalkspat auch noch anders zerschneiden und den Kanadabalsam fortlassen; dies ist z. B. bei dem Glanschen Prisma der Fall.

c) Polarisation durch Pleochroismus. Die Turmalinzange.

Fällt ein Lichtstrahl auf eine Platte aus Turmalin, welche so geschnitten ist, daß die optische Achse des Kristalles den Begrenzungsflächen parallel liegt, so läßt diese nur geradlinig polarisiertes Licht durch, dessen Polarisationsebene senkrecht zur optischen Achse steht; das parallel zur optischen Achse polarisierte wird im Kristall absorbiert; er ist pleochroitisch[1]). Legt man daher zwei Turmalinplatten aufeinander, so lassen sie kein Licht durch, wenn die optischen Achsen beider gekreuzt sind, das Maximum der Helligkeit tritt ein, wenn beide einander parallel sind.

Man faßt zwei Turmalinplatten (Fig. 217) in Metallringe, welche mittels einer zangenartigen Vorrichtung federnd gegeneinander gedrückt werden: Turmalinzange; der eine Turmalin ist der Polarisator, der andere der Analysator (S. 341).

---

[1]) Einen solchen Pleochroismus zeigen viele Mineralien.

III. Übungen mit den Polarisationsapparaten.

Übung 1 mit dem Nörrembergschen Apparate. 1. Man stellt den Spiegel $A_1 A_1$ so, daß der einfallende Strahl ab einen Winkel von 57^0 mit der Spiegelnormale bildet.

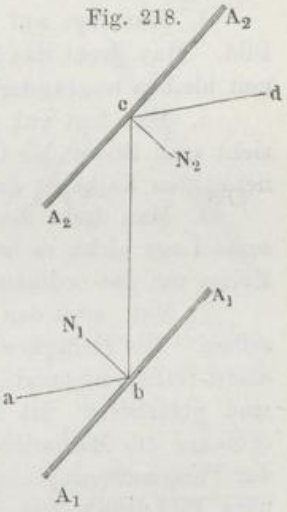
2. Man stellt den Spiegel $A_2 A_2$ so, daß seine Ebene parallel der des unteren $A_1 A_1$ steht (Fig. 218), dann wird das von $A_1 A_1$ reflektierte Licht auch von $A_2 A_2$ reflektiert. Blickt man auf die Platte $A_2 A_2$, so erscheint demnach das Gesichtsfeld hell.

3. Man dreht $A_2 A_2$ um 90^0, so daß er die Stellung in der Fig. 214 erhält, dann erscheint das Gesichtsfeld dunkel.

4. Man dreht um 180^0, dann wird es wieder hell. Dreht man um 270^0, dann wird es wieder dunkel.

Bemerkung. Die Lage der Spiegelnormalen $N_2 c$ auf $A_2 A_2$ (Fig. 218) ändert sich bei der Drehung nicht gegen den einfallenden Strahl, sondern nur die Lage der Einfallsebene auf $A_2 A_2$, die durch cb und die Normale $N_2 c$ gelegt ist, gegen die Einfallsebene auf $A_1 A_1$, die durch cb und $N_1 b$ gelegt ist. Sind die beiden Einfallsebenen einander parallel, so findet Reflexion am oberen Spiegel statt; stehen dieselben senkrecht zueinander, so findet keine Reflexion statt; durch die erste Reflexion hat das Licht also eine Seitlichkeit in bezug auf die Einfallsebene auf $A_1 A_1$ erhalten, es ist polarisiert.

Fig. 218.



Statt daß man den Lichtstrahl ab (Fig. 214) nach oben reflektieren läßt, kann man auch, was meist bequemer ist, einen Strahl $a_1 b$ von $A_1 A_1$ nach unten reflektieren lassen; er fällt dann auf einen horizontalen Spiegel e und wird von diesem vertikal nach oben reflektiert. Er verhält sich nach dem Durchgange durch den Spiegel $A_1 A_1$ beim Auftreffen auf den Spiegel $A_2 A_2$ gerade so, wie der Strahl ab nach seiner Reflexion.

Man nennt den Spiegel $A_1 A_1$ die polarisierende Vorrichtung, den Polarisator, $A_2 A_2$ die analysierende Vorrichtung, den Analysator.

Wird ein auf den Analysator fallender Lichtstrahl beim Drehen desselben ausgelöscht, so ist er polarisiert, und die Polarisationsebene des einfallenden Lichtstrahles steht senkrecht zu der Polarisationsebene des Analysators; wird er teilweise ausgelöscht, und zwar bei verschiedenen Lagen des Analysators verschieden stark, so ist er teilweise polarisiert.

Übung 2 mit dem Glasplattensatze. 1. Man ersetzt die Platte

$A_2 A_2$ durch einen Glasplattensatz und blickt von oben durch denselben nach $A_1 A_1$.

2. Man dreht den Plattensatz; man erhält ein Maximum der Dunkelheit, wenn seine Einfallsebene mit der von $A_1 A_1$ zusammenfällt, ein Maximum der Helligkeit, wenn sie auf derselben senkrecht steht.

Die Polarisationsebene des durch den Plattensatz gegangenen Lichtes steht also senkrecht zu der Einfallsebene desselben.

Übung 3: Doppelbrechung im Kalkspat. 1. Man ersetzt die Glasplatte $A_1 A_1$ des Nörrembergschen Apparates, Fig. 214, durch einen belegten Spiegel n, legt auf den Ring R ein Messingblech M mit einer 2 bis 3 mm weiten runden Öffnung und auf dieselbe ein Stück durchscheinenden weißen Papiers oder ein Stück Beinglas.

2. Man dreht den Spiegel $A_2 A_2$ mit der Fassung um seine Achse, das Bild der weißen Öffnung bleibt stets gleich hell. Das diffus durch das Papier gehende Licht ist unpolarisiert.

3. Man nimmt den Spiegel $A_2 A_2$ fort und blickt von oben auf die Öffnung in M.

4. Man legt auf M eine dicke Glasplatte. Man erhält nur ein Bild. Man dreht das Glasstück, die Lage des Bildes und seine Helligkeit bleiben ungeändert.

5. Man legt auf M ein Spaltungsstück eines Kalkspates. Man sieht zwei Bilder der Öffnung in M, der Kalkspat bricht doppelt; man nennt den Kalkspat daher auch Doppelspat.

6. Man dreht den Kalkspat um seine Achse, das eine Bild ändert seine Lage nicht, es ist das ordinäre, das andere bewegt sich in einem Kreise um das ordinäre, es ist das extraordinäre.

7. Man setzt den Analysator $A_2 A_2$ wieder ein. Man dreht denselben. Die Helligkeit der beiden Bilder wechselt von Dunkelheit zu einem Helligkeitsmaximum. Der extraordinäre und der ordinäre Strahl sind polarisiert. Ist das ordinäre Bild dunkel, so zeigt das extraordinäre ein Maximum der Helligkeit und umgekehrt. — Die Lagen der Polarisationsebenen, bei denen für das extraordinäre und das ordinäre Bild Dunkelheit eintritt, sind um 90° verschieden. Die Polarisationsebenen der beiden Strahlen stehen also senkrecht zueinander.

8. Man bestimmt die Lage der Polarisationsebene des ordinären und extraordinären Strahles in bezug auf den Kristall. Der ordinäre Strahl ist parallel, der extraordinäre senkrecht zum Hauptschnitt (S. 337) polarisiert.

Übung 4 mit dem Nicolschen Prisma. Man entfernt von dem Nörrembergschen Apparate den Spiegel $A_2 A_2$ und ersetzt ihn durch ein Nicol, das man dreht. Steht PP der Einfallsebene des unteren Spiegels $A_1 A_1$ parallel, so ist das Gesichtsfeld hell; steht PP senkrecht zu derselben, so ist es dunkel.

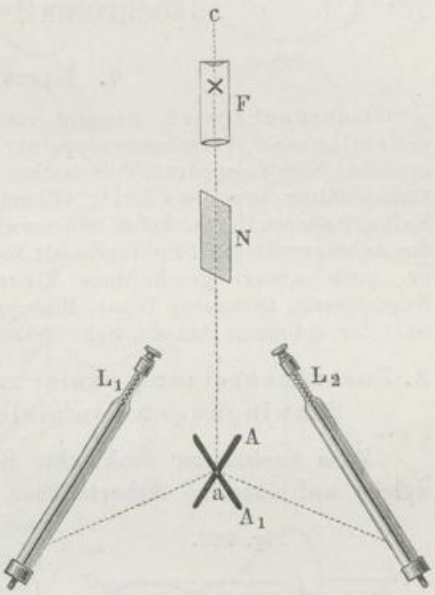
Übung 5 mit dem Turmalin. Man ersetzt in dem Nörrembergschen Apparate den oberen Spiegel durch eine horizontale Tur-

malinplatte: das Gesichtsfeld wird hell, wenn die optische Achse senkrecht zur Einfallsebene des unteren Spiegels steht.

IV. Messung des Polarisationswinkels.

Prinzip und Apparat (Fig. 219). Unter dem Polarisationswinkel reflektiertes Licht ist vollständig in der Einfallsebene polarisiert, wird also durch ein Nicol, dessen Polarisationsebene senkrecht zur Einfallsebene steht, ausgelöscht.

Fig. 219.



N sei ein Nicol, A eine um eine vertikale Achse a meßbar drehbare Platte [1]), L_1 bzw. L_2 eine Lichtquelle, am besten eine Glühlampe mit geradem Faden; dieser wird horizontal gestellt. Man umgibt die Röhre nicht mit Papier. F ist ein, wenn auch nicht unumgänglich notwendiges Fernrohr mit kleiner Brennweite, aber großem Gesichtsfelde.

Übung. 1. Man stellt das Nicol so, daß die lange Diagonale des Rhombus an der Endfläche vertikal steht, stellt die Lichtquelle nach L_1 und dreht A; dann ändert sich die Helligkeit des Gesichtsfeldes; bei einer bestimmten Lage von A ist es am dunkelsten. Dabei wandert beim Drehen der Glasplatte ein dunkler Streifen durch das Gesichtsfeld, z. B. über den glühenden Faden der Glühlampe.

2. Steht der Streifen in der Mitte des Feldes, liegt er auf dem Fadenkreuze von F, so liest man die Lage α_1 von A am Kreise ab. In dieser Lage werden Strahlen von A nach aF reflektiert, die unter dem Polarisationswinkel J auf A gefallen sind.

3. Man stellt L_1 nach L_2 und liest die entsprechende Lage α_2 ab.

Von α_1 nach α_2 hat man die Platte um den Winkel $2\,J$ gedreht, es ist also

$$J = {}^1/_2\,(\alpha_2 - \alpha_1) \qquad n = tg\ {}^1/_2\,(\alpha_2 - \alpha_1).$$

Beispiel: Crownglas und möglichst schweres Flintglas.

---

[1]) Man befestigt sie z. B. an dem Träger d des Kohlrauschschen Totalreflektometers (S. 268).

VIIIb. Interferenz polarisierten Lichtes in Kristallen. Isochromatische Kurven.

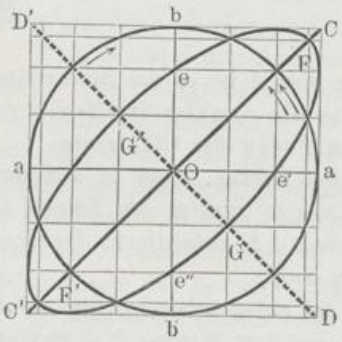
1. Einleitung.

Gebraucht wird: Apparat von Nörremberg; Turmalinzange; Mitscherlichscher Polarisationsapparat; Apparat Fig. 224, ev. Achsenwinkelapparat; Spektralapparat; Polarisationsmikroskop; Gaslampe; Natriumflamme; Strahlenfilter von Landolt; Glimmerblättchen; Gipsblättchen; Gipskeil; Kalkspatplatten ⊥ zur Achse von verschiedener Dicke; Quarzplatten senkrecht zur Achse, rechts- und linksdrehend; Kalkspat- und Quarzplatten ∥ zur Achse, ev. noch anders geschnittene Platten; Salpeter, Aragonit, Schwerspat, Seignettesalz, Glimmer, Topas, Bittersalz, Gips, Borax senkrecht zur Mittellinie der optischen Achsen, Schwefelkohlenstoff, Wasser.

A. Zusammensetzung zweier zueinander senkrecht stehender Schwingungen von gleicher Schwingungsdauer.

Zwei zueinander senkrechte Schwingungen u_h und u_v, Fig. 220, welche auf dasselbe Ätherteilchen einwirken (etwa zwei zueinander senkrecht polarisierte Strahlen, die in gleicher Richtung fortschreiten), erfolgen in den Richtungen $b\,O\,b$ und $a\,O\,a$ (die Schwingungsdauer sei T).

Fig. 220.



I. Ihre Amplituden seien zunächst gleich, und zwar $O\,a$ und $O\,b$. Die einzelnen Punkte der Abszissen- und Ordinatenachse, durch welche die dünnen vertikalen und horizontalen Linien gezogen sind, entsprechen Stellen, die nach je $^1/_{16}$ der Schwingung erreicht werden. Die Phasendifferenz φ, vgl. S. 12, gibt an, um wieviel die horizontale Bewegung hinter der vertikalen zurück ist. Von derselben hängt die Form der vom Ätherteilchen beschriebenen Kurve ab. Sie sind in Fig. 221 zusammengestellt. Die Gestalt derselben ist aus der Figur leicht zu konstruieren, wir geben nur das Resultat[1]).

[1]) In der Optik spielt nur die Zusammensetzung von zueinander senkrechten Schwingungen von gleicher Schwingungsdauer eine Rolle, in der Akustik dagegen auch eine von Schwingungen verschiedener Schwingungsdauer. Man erhält dann die sog. Lissajousschen Figuren.

1. $\varphi = 0$. Das Teilchen beschreibt die Gerade $O\,C\,O\,C'\,O$ (Fig. 220).

2. $\varphi = \pi$ ($^1/_2\,T$ oder $^1/_2$). Das Teilchen beschreibt die Gerade $D\,O\,D'$, die um 90^0 gegen die erste geneigt ist (Fig. 220).

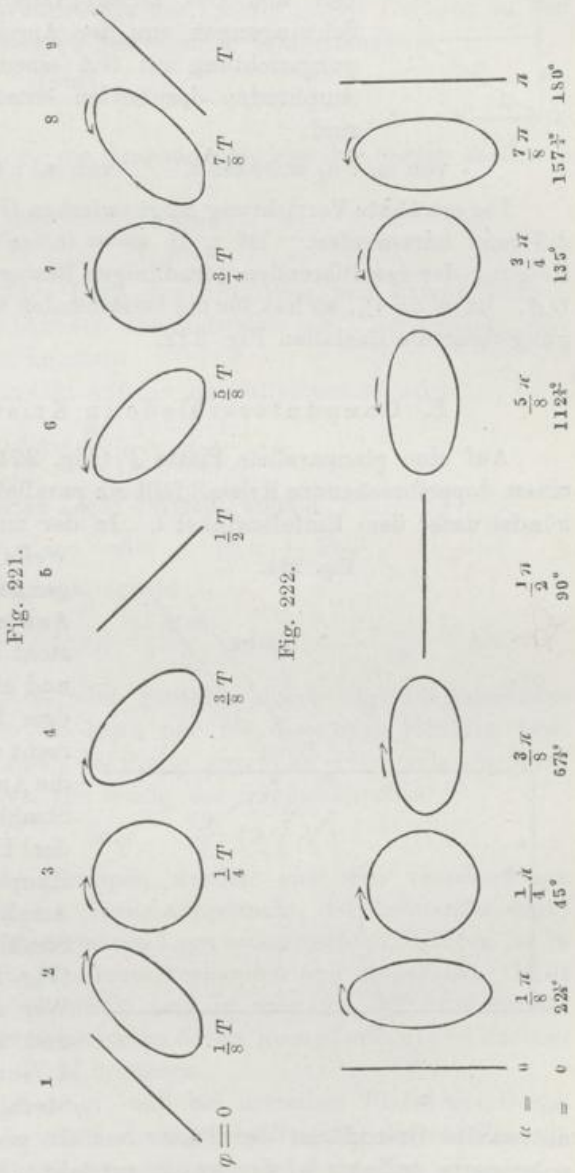
3. $\varphi = {}^1/_2\,\pi$ ($^1/_4\,T$ oder $^1/_4$). Das Ätherteilchen durchläuft im Sinne des einfachen Pfeiles einen Kreis, also wie der Uhrzeiger von links nach rechts. Das von den Ätherschwingungen erzeugte Licht ist rechts zirkularpolarisiert.

4. $\varphi = {}^3/_2\,\pi$ ($^3/_4\,T$ oder $^3/_4$). Die Bewegung ist eine kreisförmige im Sinne der Doppelpfeile. Das Licht ist links zirkularpolarisiert.

5. Die Phasendifferenz ist eine beliebige. Die resultierende Bewegung ist eine Ellipse, z. B. $e\,F\,e'\,G\,e''\,F'\,G'\,e$, deren Achse gegen die Vertikale geneigt ist.

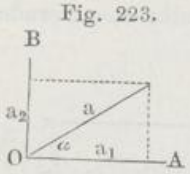
Statt des Phasenunterschiedes φ kann man auch den Gangunterschied Δ zweier in O senkrecht zueinander schwingender Strahlen betrachten (vgl. S. 346), dabei entsprechen sich:

$$\varphi = 0 : \Delta = 0; \qquad \varphi = {}^1/_4\,T : \Delta = {}^1/_4\,\lambda;$$
$$\varphi = {}^1/_2\,T : \Delta = {}^1/_2\,\lambda; \qquad \varphi = T : \Delta = \lambda \text{ usw.}$$



II. Die Amplitude der beiden sich zusammensetzenden Schwingungen sei verschieden. Auf eine Vorrichtung, welche Schwingungen, die auf sie auffallen, in solche u_h und u_v längs OA und OB zerlegt, falle polarisiertes Licht mit Schwingungen von der Amplitude a, deren Schwingungsrichtung mit OA einen Winkel α bildet. Die Amplituden der beiden entstehenden Schwingungen sind:

Fig. 223.



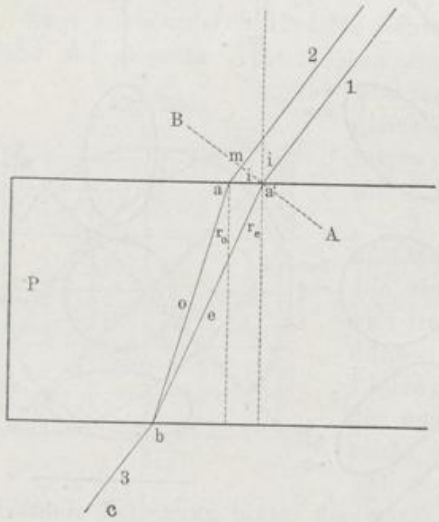
$$\text{von } u_h : a_1 = a \cos \alpha, \qquad \text{von } u_v : a_2 = a \sin \alpha.$$

Die erwähnte Vorrichtung möge zwischen OA und OB eine Phasendifferenz hervorrufen. Ist z. B. $\varphi = 0$, so ändert sich mit α die Neigung der resultierenden geradlinigen Bewegung gegen die Richtung OA. Ist $\varphi = {}^1/_4$, so hat für die beistehenden Werte von α die Schwingungsfigur die Gestalten Fig. 222.

B. Gangunterschiede in Kristallplatten.

Auf eine planparallele Platte P (Fig. 224) von der Dicke d aus einem doppelbrechenden Kristall fällt ein paralleles polarisiertes Strahlenbündel unter dem Einfallswinkel i. In der zu demselben senkrechten Welle AB finden die Schwingungen in gleicher Phase statt. Aus jedem dieser Strahlen entsteht im Kristall ein ordinärer und ein extraordinärer, die in dem Hauptschnitt und senkrecht dazu polarisiert sind. Ist die Amplitude der auffallenden Strahlen a und die Neigung der Einfallsebene gegen den Hauptschnitt α, so sind die Amplituden im einfallenden Strahl in diesen beiden Ebenen (Fig. 224) $a \cos \alpha$ und $a \sin \alpha$. Wir wählen zwei Strahlen 1 und 2 so aus, daß der aus 1 entstehende extraordinäre Strahl e in demselben Punkte die zweite Grenzfläche der Platte verläßt wie der zu ihr senkrecht polarisierte ordinäre o, der aus 2 entsteht. Die beiden austretenden Strahlen bilden zusammen den Strahl (3) bc, der je nach dem Phasenunterschiede zwischen o und e geradlinig, zirkular oder elliptisch polarisiert ist. Ist v_L die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft, v_o und v_e die der ordinären und extraordinären Welle, so ist die Phasendifferenz derselben in b:

Fig. 224.



$$\varphi = \frac{2\pi}{T}\left\{\frac{a'b}{v_e} - \left(\frac{am}{v_L} + \frac{ab}{v_o}\right)\right\}.$$

Ist ferner r_o und r_e der Brechungswinkel der ordinären und extraordinären Welle, λ die Wellenlänge des Lichtes in der Luft, so ist der entsprechende Gangunterschied gemessen in Wellenlängen:

$$\Delta = \frac{d \sin i}{\lambda_L}(cotg\, r_e - cotg\, r_o),$$

dabei ist, wenn n_o und n_e die Brechungsindizes der beiden Wellen o und e sind:

$$\frac{\sin i}{\sin r_o} = \frac{v_L}{v_o} = n_o \quad \text{und} \quad \frac{\sin i}{\sin r_e} = \frac{v_L}{v_e} = n_e,$$

n_o und n_e hängen von der Lage des ordinären und extraordinären Strahles gegenüber den Achsen des Kristalles ab. Bei optisch einachsigen Kristallen ist n_o konstant.

Fällt das Licht senkrecht auf die Kristallplatte, so wird:

$$\Delta = \frac{d}{\lambda}\left\{\frac{1}{v_e} - \frac{1}{v_o}\right\}.$$

Geradlinig polarisiertes Licht entsteht, sobald

$$\Delta = 2n \,.\, {}^1/_2 \quad \text{oder} \quad (2n + 1) \,.\, {}^1/_2$$

ist, wo n eine ganze Zahl, d. h. sobald

$$d \sin i \,\{cotg\, r_e - cotg\, r_o\} = \frac{2n}{2} \quad \text{oder} \quad = \frac{2n + 1}{2} \text{ ist.}$$

Läßt man die austretenden Strahlen durch ein analysierendes Nicolsches Prisma gehen, so kann nur für diejenigen Strahlen bzw. nur für diejenigen Neigungen der Platte gegen die einfallenden Strahlen eine Auslöschung eintreten, für welche der Gangunterschied

$$\Delta = 2n \cdot {}^1/_2 \quad \text{oder} \quad = (2n + 1) \,.\, {}^1/_2$$

ist; diese beiden Strahlengruppen werden aber bei verschiedenen Stellungen des analysierenden Nicols ausgelöscht, die zueinander senkrecht stehen. Für die bei der einen Lage ausgelöschten Strahlen ist in der um 90° gedrehten ein Maximum vorhanden und umgekehrt. Fällt daher weißes Licht auf, so erhält man in zwei um 90° voneinander abstehenden Lagen des analysierenden Nicols komplementäre Farben, d. h. Farben, die sich zu Weiß ergänzen.

Die Gleichung für Δ zeigt, daß bei derselben Platte der Gangunterschied sich ändert 1. mit Änderung der Neigung der einfallenden Strahlen, 2. mit der Wellenlänge, und zwar wächst er im allgemeinen mit abnehmendem λ. Ist demnach Δ für eine Wellenlänge λ ein gerades oder ungerades Vielfaches von ${}^1/_2\,\lambda$, so ist dies für größere und kleinere Wellenlängen nicht der Fall. Bei dicken Platten kann Δ auch für verschiedene Strahlen aufeinander folgende gerade oder ungerade Vielfache von ${}^1/_2\,\lambda$ sein, so daß diese alle ausgelöscht werden.

Fällt der Hauptschnitt des Kristalls mit der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes zusammen oder steht er senkrecht zu derselben, so entsteht nur ein geradlinig polarisierter Strahl (vgl. S. 337). Stellt man daher den Analysator senkrecht zum Polarisator und schaltet den Kristall so ein, daß sein Hauptschnitt mit der Polarisationsebene des einen derselben zusammenfällt, so bleibt das Gesichtsfeld dunkel.

Fällt statt eines Bündels paralleler polarisierter Strahlen ein konvergentes Bündel auf die Platte, so besteht dies aus einer ganzen Schar von Bündeln paralleler Strahlen, die gegeneinander geneigt sind. Für Bündel, die unter gewissen Winkeln i auf die Platte fallen, ist $\Delta = 2n \cdot {}^1/_2 \lambda$; diese werden gleichzeitig durch ein Nicol ausgelöscht; dasselbe ist für Bündel der Fall, die $\Delta = (2n + 1) \cdot {}^1/_2 \lambda$ entsprechen. Vereinigt man durch eine Linse, etwa die des Auges, oder durch ein auf unendlich eingestelltes Fernrohr die einzelnen Bündel in einem Punkte, so erscheinen bei Beleuchtung mit homogenem Lichte in dem Gesichtsfelde helle und dunkle Kurven: die isochromatischen Kurven; sie entsprechen den Strahlen, für die $2n$ bzw. $2n + 1$ denselben Wert haben. — Da die Winkel i, für die Δ die angegebenen Werte hat, sich mit der Farbe ändern, so fallen die isochromatischen Kurven für die verschiedenen Farben nicht zusammen, man erhält im weißen Lichte farbige Kurven.

Die auftretenden Farbenerscheinungen sind am deutlichsten, wenn der Hauptschnitt unter 45° gegen die Hauptschnitte des Nicols geneigt ist.

Bei der eben besprochenen Anordnung läßt man auf die Kristallplatte ein konvergierendes Strahlenbündel fallen, die Zahl der isochromatischen Kurven usw. ist durch den Öffnungswinkel des Strahlenkegels bestimmt, den man mit dem zur Untersuchung dienenden Instrumente noch beobachten kann. Derselbe ist aber stets beschränkt. Man kann die den verschiedenen Neigungen der Platte gegen die einfallenden Strahlen entsprechenden Erscheinungen auch an derselben Stelle des Gesichtsfeldes wahrnehmen, wenn man die Platte um eine in ihrer Ebene gelegene Achse dreht.

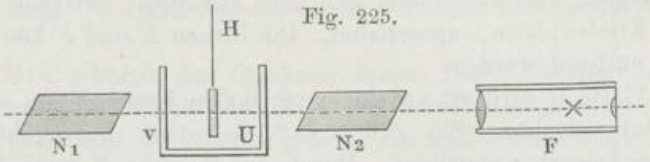
2. Apparate.

Bei allen Apparaten wird zwischen einen Polarisator und einen Analysator die zu untersuchende Platte eingeschoben, die zweckmäßig um eine in ihr liegende, wie um eine zu ihr senkrechte Achse drehbar ist. Letzteres wird dadurch erreicht, daß sie auf eine Hülse befestigt wird, die sich in einer kreisförmigen Fassung dreht. Je nachdem man die Erscheinungen in parallelem oder nahezu parallelem Lichte beobachten will, oder diejenigen, die in konvergenten Strahlenbündeln auftreten, modifiziert man die Anordnungen.

1. Der Nörrembergsche Apparat dient ohne weiteres für Versuche in parallelem und schwach konvergentem Lichte. Die

Kristallplatte legt man auf R (Fig. 214). Für die Beobachtung in konvergentem Lichte schaltet man oberhalb und unterhalb von

Fig. 225.



R eine Linse von etwa 2 cm Brennweite ein. Dies genügt für kurz- und normalsichtige Augen. Für weitsichtige muß noch nahe an A_2 eine Linse von etwa 8 cm Brennweite eingeschaltet werden.

Fig. 226.

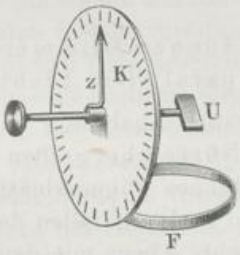
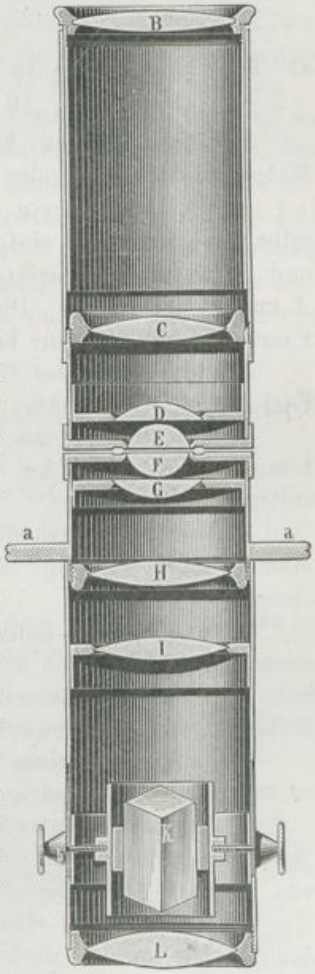


Fig. 227.



2. Die Turmalinzange, bei der man die Kristallplatte mit den polarisierenden Vorrichtungen sehr nahe an das Auge bringen kann, hat ein ziemlich großes Gesichtsfeld.

3. Apparate mit zwei Nicols. a) Der gewöhnliche Mitscherlichsche Apparat dient ohne weiteres zur Untersuchung im parallelen Lichte. Stellt man hinter den Analysator einen Spektralapparat, so können die Erscheinungen für Strahlen verschiedener Wellenlänge untersucht werden.

b) Um die Lagen der isochromatischen Kurven bei verschiedenen Einfallswinkeln zu untersuchen, verwendet man die Anordnung Fig. 225. N_1 und N_2 sind Nicolsche Prismen [1]), die um eine horizontale Achse drehbar sind, F ist ein astronomisches Fernrohr von kurzer Brennweite. U ist die Kristallplatte, die an der Achse H drehbar ist. Als solche kann man etwa den vertikalen Stab des Kohlrauschschen Totalreflektometers (S. 268) benutzen. v ist ein Trog, um die Platte U in einer Flüssigkeit zu untersuchen.

c) Sollen stark konvergente Strahlen untersucht werden, so schaltet man in Fig. 225 entsprechende Linsen ein oder benutzt das Polarisationsmikroskop, von

[1]) Auf demselben Prinzip der Anordnung beruhen die Apparate zur Bestimmung der optischen Achsenwinkel von Groth u. a.

dem Fig. 227 (a. v. S.) einen Längsschnitt gibt. Je nach der Brennweite der Linsen wechselt der Öffnungswinkel des auf die Platte U fallenden Strahlenkegels; über B befindet sich noch ein Nicol; zwischen E und F wird die Kristallplatte eingeschaltet. Die Linsen E und F können voneinander entfernt werden.

Die Platte U wird oft an einem vertikalen Kreise K um eine horizontale Achse drehbar (Fig. 226 a. v. S.) befestigt. Die Drehung wird mittels des Zeigers z abgelesen. Durch eine Fassung F kann der Kreis, sei es auf dem Tische R der Nörrembergschen Apparate, sei es an dem Polarisationsmikroskop, befestigt werden.

3. Übungen.

a) Erscheinungen in dünnen Glimmer- oder Gipsblättchen in parallelem Lichte.

Übung. 1. Man kreuzt Analysator A und Polarisator P im Mitscherlichschen oder Nörrembergschen Apparate.

2. Man schaltet ein dünnes Glimmerblättchen ein und dreht dasselbe, bis Dunkelheit eintritt. Dann fallen der Hauptschnitt desselben und die zu diesem senkrechte Ebene mit den Polarisationsebenen von A und P zusammen. Diese Richtungen werden mit Strichen auf der Fassung des Blättchens bezeichnet.

3. Man dreht das Glimmerblättchen um 45°, es treten lebhafte Farben auf, vgl. S. 348.

4. Man dreht A um 90°. Die Farben wechseln; nach einer Drehung um 90°, d. h. bei parallelen Nicols, ist die Farbe die zu der ersten komplementäre.

5. Man stellt sich durch Spalten zahlreiche dünne Blättchen her. Man bestimmt die Lage der Hauptschnitte nach 2. und die der Achsenebene nach S. 354.

6. Man legt eine Reihe von Glimmerblättchen mit parallelen Achsenebenen nach und nach übereinander, stellt also ein dickeres Blättchen her. Die Farben wechseln und zeigen eine bestimmte „aufsteigende" Reihenfolge, die aufzuschreiben ist.

7. Dreht man eines oder mehrere der Glimmerblättchen um 90°, so zeigt sich eine niedrigere Farbe, die Wirkungen subtrahieren sich.

8. Man stellt hinter den Analysator A einen Spektralapparat. Im Spektrum erscheint ein dunkler Streifen, an dessen Stelle beim Drehen von A um 90° eine besonders helle Stelle tritt.

9. Man schaltet eine wachsende Zahl von Glimmerblättchen ein, der Streifen wandert nach dem Rot, verschwindet dort, erscheint wieder im Blau usf.

10. Man schaltet ein ziemlich dickes Blättchen ein, im Spektrum treten mehrere Streifen auf, für je zwei aufeinander folgende unterscheidet sich der Gangunterschied um λ (vgl. S. 347).

b) Erscheinungen in Gipskeilen.

Übung. 1. Man beleuchtet mit Na-Licht und kreuzt die beiden Nicols.

2. Man schaltet den Gipskeil, dessen Kante parallel der Hauptachse liegt, wie oben bei a) 3. ein, so daß die Hauptachse um 45° gegen die Hauptschnitte des Nicols geneigt ist. Es treten dunkle Streifen parallel zu der Kante des Keiles auf, da für gleich dicke Stellen der Gangunterschied der gleiche ist: isochromatische Kurven.

3. Man dreht das analysierende Nicol um 90°, an Stelle der Minima treten Maxima und umgekehrt.

4. Man ersetzt das Na-Licht durch weißes Licht, an Stelle der dunkeln Stellen zeigen sich farbige Streifen, deren Farbe nahezu derjenigen bei verschieden dicken Glimmerblättern entspricht.

5. Man legt auf ein oder mehrere Gipsblättchen den Gipskeil so, daß seine Kante mit einer der oben bezeichneten Richtungen auf den ersteren zusammenfällt. Dann erscheint in dieser oder in der um 90° gedrehten Lage eine dunkle Stelle im Interferenzbilde des Keiles. Für die ihr entsprechende Dicke des Gipskeiles wird die optische Wirkung des Gipsblättchens durch diejenige des Keiles aufgehoben, sie ist ihr also optisch äquivalent. Man kann so die Dicke von Gips- und auch von Glimmerblättchen bestimmen.

c) Isochromatische Kurven in optisch einachsigen Kristallen.

Die Gestalt der isochromatischen Kurven ist je nach der Lage der Begrenzungsfläche der Platte zu der Achse des Kristalles und der Lage der Polarisationsebene zu derselben eine sehr mannigfaltige.

I. Platte aus optisch einachsigen Kristallen senkrecht zur optischen Achse geschnitten.

Bei einer optisch einachsigen Platte, die senkrecht zur optischen Achse geschnitten ist, gilt als Hauptschnitt die Einfallsebene. Aus jedem einfallenden Strahle entstehen im allgemeinen zwei, ein ordinärer und ein extraordinärer; nur für diejenigen, deren Einfallsebene mit der Polarisationsebene des Polarisators zusammenfällt oder zu ihr senkrecht steht, entsteht ein einziger, im ersten Falle ein ordinärer, im zweiten Falle ein extraordinärer; in beiden ist die Polarisationsebene parallel zu derjenigen des einfallenden Strahles. Steht daher der Analysator senkrecht zum

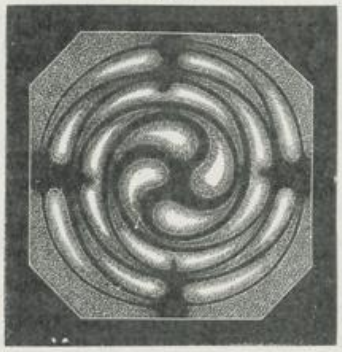
Fig. 228.

Fig. 229.

Polarisator, so werden die Strahlen in diesen beiden Ebenen ausgelöscht, und es entsteht ein schwarzes Kreuz, stehen sie parallel, ein weißes.

Da alle durch die Achse gehenden Ebenen gleichwertig sind, so sind für die in allen verlaufenden Strahlen die Gangunterschiede Δ gleich. Die isochromatischen Kurven sind Kreise.

Fig. 230.



Für die senkrecht einfallenden Strahlen ist $\Delta = 0$, da längs der Achse der ordinäre und extraordinäre Strahl die gleiche Geschwindigkeit besitzen. Die Mitte ist bei parallelen Nicols hell, bei gekreuzten dunkel.

Übung. 1. 1. Zwischen zwei polarisierende Vorrichtungen wird eine Kalkspatplatte gebracht, man erhält bei zueinander senkrechten Nicols usw. das Bild Fig. 228, bei zueinander parallelen das Bild Fig. 229.

Bei schnellem Drehen des Analysators sieht man deutlich, wie an Stelle der dunkeln Ringe helle treten.

2. Zwischen die Nicols wird eine dickere Platte gelegt. Die Ringe sind enger. Nach der Formel S. 347 erhält man denselben Wert von $2n \cdot {}^1/_2\,\lambda$ bzw. $(2n+1) \cdot {}^1/_2\,\lambda$ bei einer größeren Dicke d für ein kleineres i.

3. Man beleuchtet erst mit rotem, dann mit blauem Lichte, die Ringe werden enger, einem kleineren λ entspricht ein kleineres i.

Übung 2. 1. Man schaltet eine Platte aus einer drehenden Substanz ein: die Mitte ist nicht dunkel, sondern hell und gefärbt, beim Drehen des Analysators wechseln die Farben, vgl. S. 363.

2. Man legt zwei gleich dicke Platten einer rechts- und einer linksdrehenden Substanz (Quarz) aufeinander. Man erhält die sog. Airyschen Spiralen, Fig. 230.

Übung 3. Bestimmung des Vorzeichens der Doppelbrechung eines optisch einachsigen Kristalles.

Prinzip. Legt man eine senkrecht zur Achse geschnittene Platte eines optisch einachsigen Kristalles zwischen die gekreuzten Nicols eines Polarisationsapparates, so daß die Erscheinung Fig. 228 auftritt, und auf dieselbe eine Glimmerplatte, in der die beiden senkrecht zueinander polarisierten Strahlen einen Gangunterschied von ${}^1/_4\,\lambda$ erfahren, eine sog. Viertel-Undulationsplatte, so daß ihre Achsenebene, die dem Pfeile in der Fig. 231 entspricht, um 45^0 gegen die Polarisationsebene der beiden Nicols geneigt ist, so ändert sich bei positiven Kristallen das Bild der isochromatischen Kurven (Fig. 228) in das von Fig. 231a, bei den negativen in das von Fig. 231b.

Übung 4. 1. Man legt auf eine senkrecht zur Achse geschliffene Kalkspatplatte eine Glimmerplatte von $^1/_4\,\lambda$ Gangunterschied und

Fig. 231 a.

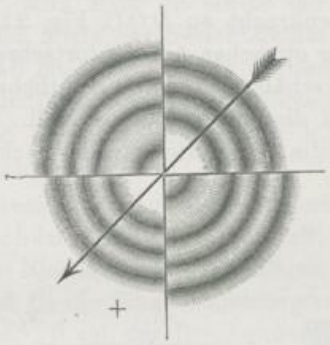
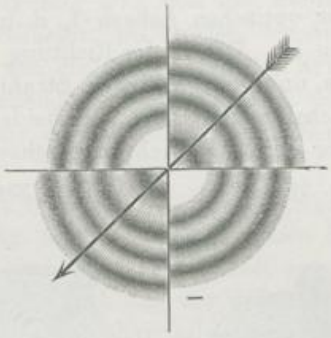
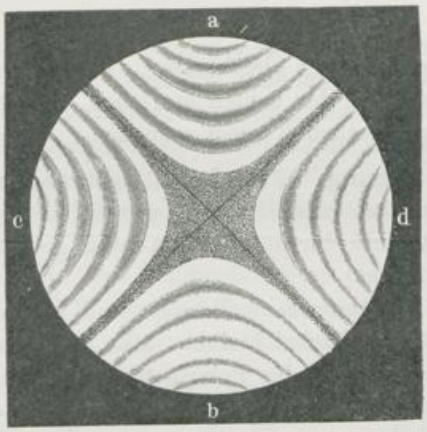


Fig. 231 b.



beide zusammen in den Nörrembergschen Apparat, oder bringt sie zwischen die Turmalinzange; man dreht die Glimmerplatte, bis eine der Fig. 231 b entsprechende Erscheinung eintritt.

Fig. 232.



2. Man bezeichnet die Richtung auf dem Glimmerblättchen, in der die Ringe auseinander weichen, d. h. auf der die beiden schwarzen Punkte liegen, durch eine Linie; diese Richtung ist die Achsenebene des Glimmers.

3. Man nimmt den Kalkspat fort, legt den zu untersuchenden Kristall ein und bestimmt nach der oben gegebenen Regel das Vorzeichen.

Der Versuch wird auch mit einem positiven Kristall, z. B. Quarz, angestellt (Fig. 231 a).

II. Die Begrenzungsfläche ist parallel zur Hauptachse.

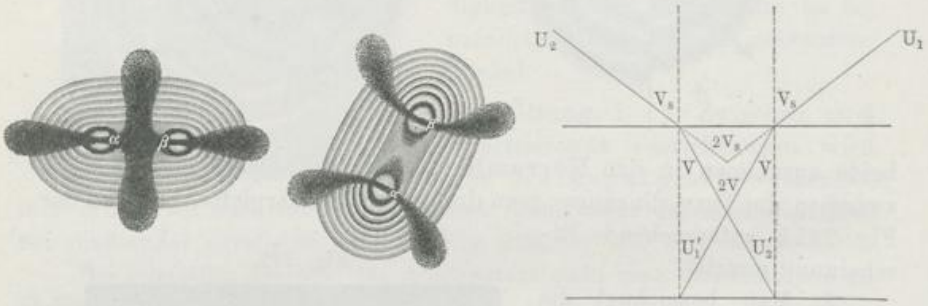
Man erhält vier Hyperbelsysteme, deren Asymptoten mit der Richtung der Achse Winkel von nahezu 45° bilden (Fig. 232). Diese sind dunkel, wenn die Nicols gekreuzt, hell, wenn sie parallel sind. Für die Schärfe der Erscheinung ist es am besten, wenn die Achse mit der Ebene der Nicols einen Winkel von 45° bildet.

Übung. Es wird eine parallel zur Achse geschnittene Kalkspat- oder Quarzplatte untersucht.

d) Erscheinungen an optisch zweiachsigen Kristallen.

Wir behandeln nur den Fall, daß die Platte senkrecht zur Mittellinie der optischen Achsen[1]), d. h. senkrecht zu DOC, Fig. 213, geschnitten ist. Der in der Richtung der optischen Achsen fortschreitende ordinäre und extraordinäre Strahl verhält sich im wesentlichen wie bei einachsigen Kristallen, für beide ist die Phasendifferenz Null. In der Nähe der optischen Achsen wachsen die Gangunterschiede nach allen

Fig. 233. Fig. 234. Fig. 235.



Seiten ziemlich gleichmäßig. Bei Platten von passender Dicke erscheint daher jede der beiden optischen Achsen von in sich geschlossenen isochromatischen Kurven umgeben.

Übung. Zwischen die gekreuzten Nicols des Nörrembergschen Apparates zunächst im parallelen Lichte wird eine senkrecht zur Mittellinie der optischen Achsen geschnittene Platte von Salpeter[2]) geschaltet.

1. Man dreht dieselbe und bestimmt die Lage, bei der das Gesichtsfeld dunkel bleibt. Man bezeichnet die Richtungen der Polarisationsebenen des Polarisators und Analysators auf der Fassung der Platte, sie entsprechen der Ebene der optischen Achsen und der senkrecht dazu stehenden.

2. Man bringt die Platte in konvergentes Licht und dreht sie. Das Bild der isochromatischen Kurven besteht aus Lemniskaten (Fig. 233 u. 234). Die Stellen α und β entsprechen den optischen Achsen und rühren von Strahlen her, die im Kristall in der Richtung der optischen Achsen fortschreiten, beim Austritte aber gebrochen werden.

3. Fällt die Ebene der optischen Achsen mit den Polarisationsebenen der Nicols zusammen, so hat man Fig. 233, ist sie um 45° gegen dieselbe geneigt, Fig. 234.

---

[1]) Platten parallel zur optischen Achsenebene geben Hyperbeln als isochromatische Kurven.

[2]) Der optische Achsenwinkel ist bei Salpeter klein, daher ist dieser für die ersten Beobachtungen besonders geeignet.

4. Man dreht die Platte um eine zu der Verbindungslinie $\alpha\beta$ senkrechte Achse an dem Apparate Fig. 225, dann fallen die Stellen α und β nacheinander in die Mitte des Gesichtsfeldes.

5. Man mißt die Größe der Drehung $2V_s$ von der Stellung, wo α in der Mitte des Gesichtsfeldes erscheint, bis zu der, wo dies für β der Fall ist. $2V_s$ ist der Winkel, den die im Inneren des Kristalls in der Richtung der Achsen fortschreitenden Strahlen nach dem Austritt in die Luft miteinander bilden: der scheinbare Winkel der optischen Achsen.

Bemerkung. Aus V_s erhält man den wahren Winkel der optischen Achsen im Kristall, Fig. 235: U_1 und U_2 seien Strahlen, die der Richtung der scheinbaren optischen Achsen in Luft entsprechen, U_1' und U_2' die ihnen zugehörigen in der Richtung der wahren optischen Achsen. β sei der Brechungsexponent des Kristalls in der Richtung der optischen Achsen, dann ist

$$\frac{\sin V_s}{\sin V} = \beta \qquad \sin V = \frac{\sin V_s}{\beta},$$

woraus sich V und also auch $2V$ ergibt. β muß durch besondere Versuche ermittelt werden.

Sobald der scheinbare optische Achsenwinkel 180° erreicht, kann das Interferenzbild S. 354 nicht mehr zustande kommen, da selbst die aus streifend einfallenden Strahlen entstehenden gebrochenen Strahlen einen kleineren Winkel mit der Plattennormalen bilden als die optischen Achsen. (Bei den Kristallen ist meist nahezu $\beta = 1{,}6$, $V_s = 90^0$ entspricht $2V = 77^0$, d. h. es können höchstens wahre Achsenwinkel von 70 bis 80° beobachtet werden.)

Taucht man die Kristallplatte in eine Flüssigkeit vom Brechungsindex n, so wird der Austrittswinkel V_s', der den den optischen Achsen entsprechenden Strahlen zukommt, die unter dem Winkel V einfallen, kleiner, es ist

$$\frac{\sin V_s'}{\sin V} = \frac{\beta}{n} \quad \text{und} \quad \sin V = \frac{n}{\beta} \sin V_s'.$$

Ist z. B. $n = 1{,}5$, so wird $V_s' = 90^0$, für $V = 70$, $2V = 140^0$.

Übung. Die Versuche werden angestellt mit Platten aus: a) Salpeter, Arragonit, Schwerspat, Seignettesalz; b) Glimmer, Topas, Bittersalz; c) Gips, Borax, und man beachtet die Farbenverteilung des ovalen Fleckes, welcher von dem ersten die Pole umgebenden Ringe eingeschlossen wird.

Bei a) ist die dem anderen Pole zugewandte Seite rot, die abgewandte blau, der optische Achsenwinkel ist für Rot kleiner als für Blau.

Bei b) ist die dem anderen Pole zugewandte Seite blau. Der optische Achsenwinkel ist für Rot größer als für Blau.

Bei c) ist die Verteilung der Farben komplizierter: die Mittellinien der optischen Achsen, d. h. die Halbierungslinien des Winkels der optischen Achsen oder gar die Ebenen der optischen Achsen für ver-

schiedene Wellenlängen, fallen nicht zusammen, wie Beobachtungen mit homogenem Lichte, durch die Strahlenfilter von Landolt, S. 342, gewonnen, zeigen.

e) Messung isochromatischer Kurven und Bestimmung optischer Achsenwinkel.

Prinzip: Dreht man in dem Apparate, Fig. 225, eine Platte eines doppelbrechenden Kristalls in homogenem Lichte um die Achse, so fallen auf das Fadenkreuz nacheinander die den isochromatischen Kurven entsprechenden dunkeln Streifen. Man bestimmt die Einfallswinkel, bei denen dies der Fall ist.

a) Ist die Erscheinung symmetrisch zur Normalen der Platte, bestehen etwa die Kurven aus zu ihr konzentrischen Ringen, so liest man die Lagen α_1 und α_2 des mit der Platte verbundenen Index am Kreise ab, wenn beim Drehen nach rechts und links entsprechende Kurven mit dem Fadenkreuz zusammenfallen. Dann ist

$$i = {}^1/_2\,(\alpha_1 - \alpha_2).$$

b) Ist die Erscheinung unsymmetrisch zur Normalen, so bestimmt man zunächst die Lage α_0, wenn die Platte senkrecht zur Achse des Fernrohres steht, dann ist

$$i = \alpha - \alpha_0.$$

A. Kalkspat senkrecht zur optischen Achse geschnitten.

Die Polarisationsebenen der Nicols sind um 45° gegen die Einfallsebene geneigt. Es seien a und c die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des ordinären und des extraordinären Strahles senkrecht zur Achse (in Luft = 1 gesetzt), sie entsprechen den reziproken Werten der Brechungsindizes in diesen Richtungen, dann ist für kleine Winkel i der Gangunterschied $\varDelta$ (S. 347)

$$\varDelta = \frac{d}{2\,a}\,\{a^2 - c^2\}\,sin^2 i.$$

Bei gekreuzten bzw. parallelen Nicols tritt Dunkelheit ein, wenn

$$sin^2 i_{\perp} = 2\,n\,\frac{\lambda}{d}\,\frac{a}{a^2 - c^2} \quad \text{bzw.} \quad sin^2 i_{||} = (2\,n + 1)\,\frac{\lambda}{d}\,\frac{a}{a^2 - c^2}.$$

Ist i klein, so kann man $sin^2 i$ durch i^2 ersetzen und erhält den Satz: Die Einfallswinkel, welchen im konvergenten Lichte die Durchmesser der dunkeln Ringe proportional sind, verhalten sich für die dunkeln Ringe bei gekreuzten Nicols wie die Wurzeln aus den geraden Zahlen, bei parallelen Nicols wie die Wurzeln aus den ungeraden Zahlen.

Übung. 1. Für eine ganze Reihe von Streifen wird für eine Platte von der Dicke d_1 in obiger Weise i_1 bestimmt und der Satz geprüft.

2. Für eine Platte mit anderer Dicke d_2 werden dieselben Messungen ausgeführt; es müssen die $sin^2 i$ sich wie die Dicken verhalten.

3. Für gelbes Licht wird aus λ (0,0006 etwa), n und der Dicke d $\frac{a}{a^2 - c^2}$ berechnet und aus dem gegebenen a ($1/a = 1{,}654$, $1/c = 1{,}483$) die Größe c gefunden; danach wird ein Schnitt der Wellenfläche für die senkrecht zur optischen Achse gelegene Ebene konstruiert.

Analoge Übungen werden mit Kalkspat und Quarz, die parallel zur optischen Achse geschnitten sind, ausgeführt, und zwar wenn die optische Achse in oder wenn sie senkrecht zur Einfallsebene steht.

B. Bestimmung des optischen Achsenwinkels.

Übung 1 in Luft. 1. Man bestimmt angenähert mit einem der Apparate S. 339 die Lage der Ebene der optischen Achsen in einer senkrecht zu der Mittellinie derselben geschnittenen Platte.

2. Man befestigt die Platte an einer der Vorrichtungen (Fig. 225 *H* und Fig. 226 *U*) etwa mit etwas Wachs.

3. Man neigt die Polarisationsebenen von Polarisator und Analysator um 45° gegen die Einfallsebene.

4. Man neigt und dreht die Platte, bis beim Drehen um die Achse *H* die Achsenbilder durch den Mittelpunkt des Fadenkreuzes wandern.

5. Man bestimmt im weißen Lichte die Lagen der Platte α_1 und α_2 auf beiden Seiten der Mittellinie, bei denen das Achsenbild mit dem Fadenkreuz zusammenfällt, dann ist für weißes Licht der scheinbare Achsenwinkel

$$2\,V_s = \alpha_1 - \alpha_2.$$

6. Man führt dieselbe Bestimmung mit Natriumlicht und den Landoltschen Strahlenfiltern, S. 342, aus.

7. Man berechnet den wahren Achsenwinkel aus $2\,V_s$ und dem bekannten Brechungsindex β.

Übung 2 in Wasser oder Schwefelkohlenstoff. 1. Die Übung gestaltet sich genau wie Übung 1., nur daß zwischen die polarisierende und analysierende Vorrichtung ein Trog *U* (Fig. 225) mit parallelen Wänden gestellt wird, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist.

2. Man findet den scheinbaren Achsenwinkel in Wasser usw.: $2\,V_s'$ und berechnet daraus nach S. 355 den wahren $2\,V$.

Die hier und nach Übung 1. gefundenen Werte von $2\,V$ müssen gleich sein.

Beispiele: Die Zahlen beziehen sich auf die *D*-Linie. Arragonit $2\,V = 18^0\ 5{,}3'$, $\beta = 1{,}6810$, Schwerspat $2\,V = 36^0\ 48'$, $\beta = 1{,}6374$, Gips $2\,V = 58^0\ 5'$, $\beta = 1{,}5226$, Zucker $2\,V = 48^0$, $\beta = 1{,}5667$, Salpeter (Kaliumnitrat) $2\,V = 7^0\ 12'\ 10''$, $\beta = 1{,}5056$.

IX. Drehung der Polarisationsebene[1]).

Einleitung.

Gebraucht wird: Cylindrische Glasröhre mit abgeschliffenen Enden; Verschlußplatten und -kappen, Fig. 239; Maßkölbchen (50 cm³ Gehalt); Rohrzucker, Weinsäure, Terpentinöl.

Mitscherlichs Polarisationsapparat mit Röhre und verschiedenen Quarzplatten 1,5 und 3 mm dick (senkrecht zur Achse geschnitten); Halter für die Röhren, Halter für die Platten, Fig. 237; Bunsenbrenner auf Stativ mit Schlauch; zwei durchlöcherte Platinlöffel; Stativ für die Platinlöffel; Chlornatrium und Chlorlithium; Dickenmesser; Glasplatte; Terpentinöl; Alkohol; Pyknometer; Spektralapparat; Gaslampe; Strahlenfilter.

Lippichscher Apparat und Laurentscher Apparat mit Brenner.

Apparat von Wild mit Beleuchtungslampe: Savartsche Doppelplatte; Nörrembergsches Polariskop.

Apparat von Soleil-Ventzke[2]).

Löscht man einen durch einen Polarisator, etwa ein Nicolsches Prisma, polarisierten, homogenen Lichtstrahl, z. B. von Natriumlicht, durch einen Analysator aus und stellt zwischen Analysator und Polarisator eine Glasplatte oder einen Trog mit Wasser, so bleibt das Gesichtsfeld dunkel. Ersetzt man diese Körper durch eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Quarzplatte oder eine an den beiden Enden durch ebene Glasplatten verschlossene Röhre voll Zuckerlösung, so wird das Gesichtsfeld hell. Dreht man das analysierende Nicol um einen bestimmten Winkel, so erhält man wieder Dunkelheit. Die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes hat eine Drehung erfahren, und zwar nach rechts oder links, je nachdem das analysierende Nicol nach rechts oder links gedreht werden muß, um wieder Dunkelheit zu erzielen.

Körper, die in dieser Weise auf das Licht wirken, heißen die Polarisationsebene drehende oder optisch aktive, und zwar rechtsdrehende (dextrogyre) und linksdrehende (lävogyre), was

---

[1]) Eine erschöpfende Behandlung des Gebietes ist in H. Landolt: Das optische Drehungsvermögen usw., Braunschweig, Friedr. Vieweg u. Sohn, 1890, 2. Aufl., 1898, gegeben.

[2]) Nach allen Methoden, mit Ausnahme der letzterwähnten, sind die Drehungen einer Quarzplatte, von Terpentinöl und zwei Zuckerlösungen zu bestimmen.

durch $\overset{\curvearrowright}{a}$ und $\overset{\curvearrowleft}{a}$ oder durch + und — angedeutet wird; das positive Vorzeichen entspricht einer Rechts-, das negative einer Linksdrehung. Nicht drehende Körper heißen optisch inaktive.

Feste Körper untersucht man als planparallele Platten, Flüssigkeiten in Röhren, welche an beiden Seiten durch planparallele Glasplatten geschlossen sind (vgl. Fig. 239).

Die Größe der Drehung ist direkt proportional der Dicke der drehenden Schicht, sie ist abhängig von der Wellenlänge des angewandten Lichtes und nimmt im allgemeinen zu, wenn die Wellenlänge abnimmt. Man bezeichnet die letztere Erscheinung als Rotationsdispersion der Polarisationsebene. Man muß stets angeben, für Strahlen von welcher Wellenlänge die mitgeteilte Drehung gilt. Meist ist dies für das Gelborange der D-Linie der Fall, indem man eine Kochsalzflamme als Lichtquelle zu den Messungen verwendet.

Die Drehung wächst bei Lösungen der meisten drehenden Substanzen mit der Konzentration.

Man nennt die Drehung pro Längeneinheit (als Längeneinheit wählt man 1 dm und nicht 1 cm, um nicht zu kleine Zahlen zu erhalten) das Drehungsvermögen und bezeichnet es mit α. Das Drehungsvermögen für einen Lichtstrahl von der Wellenlänge λ, oder eine Spektrallinie L wird durch α_λ oder α_L bezeichnet.

Ist Δ die für eine Länge von l dm beobachtete Drehung, so ist:

$$\alpha = \frac{\Delta}{l}.$$

Das Drehungsvermögen ist für verschiedene Modifikationen derselben Substanz gleich und entgegengesetzt.

Biot hat zuerst darauf hingewiesen, daß die auf die Längeneinheit bezogenen Drehungsvermögen der verschiedenen Substanzen nicht untereinander vergleichbar sind. Bringt man z. B. verschiedene Flüssigkeiten in dieselbe Röhre, so wirken infolge der verschiedenen Dichte ganz verschiedene Massen auf den Strahl ein. Man berechnet daher die Wirkung, welche die Körper ausüben würden, wenn sie mit der Dichte 1 vorhanden wären, d. h. wenn sie so weit verdünnt wären, daß 1 cm³ 1 gr-Masse enthalten würde. Man dividiert dazu α durch die Dichte d und nennt:

$$\frac{\alpha}{d} = [\alpha]$$

das spezifische Drehungsvermögen. Das spezifische Drehungsvermögen ist diejenige Drehung der Polarisationsebene, welche von 1 gr-Masse in 1 cm³ verteilter Substanz in einer Schicht von 1 dm hervorgebracht wird.

Das molekulare Drehungsvermögen ist die Drehung, welche das Molekulargewicht, verteilt auf 1 cm³ in einer

Säule von der Längeneinheit 1 dm hervorruft. Man erhält dasselbe durch Multiplikation von $[\alpha]$ mit dem Molekulargewichte M. Um zu große Zahlen zu vermeiden, dividiert man noch durch 100 und definiert das molekulare Drehungsvermögen $[M]$ durch:

$$[M] = M[\alpha]/100.$$

Gesetzmäßigkeiten zwischen den Drehungen verschiedener Substanzen müssen sich auf die molekularen Drehungsvermögen beziehen.

Auch für Lösungen von aktiven Körpern berechnet man ein spezifisches Drehungsvermögen. Ist die Konzentration der Lösung bestimmt durch die Anzahl Gramme c aktiver Substanz in 100 cm³, so enthält 1 cm³ $c/100$ gr Masse; rufen diese ein Drehungsvermögen α hervor, so würde, wenn in 1 cm³ 1 gr-Masse enthalten wäre, die Drehung sein:

$$[\alpha] = \alpha \,.\, 100/c;$$

dies ist das spezifische Drehungsvermögen der gelösten Substanz.

Der Gehalt der Lösung sei nicht in dieser Weise, sondern in Gewichtsprozenten angegeben, und zwar seien z. B. P gr aktiver Substanz in E gr Lösungsmittel enthalten, die Lösung habe die Dichte d, dann nehmen $(P + E)$ gr Lösung $(P + E)/d$ cm³ ein, und 1 cm³ enthält: $d \,.\, P/(P + E)$ gr aktiver Substanz. Bewirkt diese Lösung eine Drehung um α Grad, so erzeugt eine Flüssigkeit, die in 1 cm³ 1 gr aktiver Substanz enthielte, eine Drehung:

$$[\alpha] = \alpha \frac{P + E}{Pd}.$$

Ist p der Prozentgehalt an aktiver Substanz, $q = 100 - p$ die Menge Lösungsmittel in 100 Gewichtsteilen Lösung, so ist $p = 100 \,.\, P/(P + E)$, also:

$$[\alpha] = \alpha \frac{100}{pd} = \alpha \frac{100}{(100 - q)d}.$$

Kennt man $[\alpha]$ für irgend eine Substanz und bestimmt α und d für eine Lösung derselben, so kann man p berechnen. Man hat eine Methode zur quantitativen Analyse; es ist:

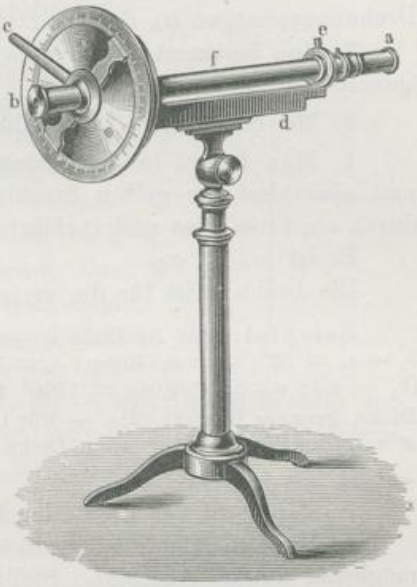
$$p = \alpha \frac{100}{[\alpha]\, d}.$$

Bei diesen Entwickelungen geht man von der Voraussetzung aus, daß bei der Lösung einer Substanz die drehenden Teilchen nur auseinander gerückt werden, daß aber das Drehungsvermögen eines jeden einzelnen derselben nicht verändert wird. Diese Annahme ist nur angenähert richtig. Zu praktischen Zwecken benutzt man Tabellen, welche die zusammengehörigen Werte von p und $[\alpha]$ geben, oder man stellt Interpolationsformeln auf.

1. Der Mitscherlichsche Apparat.

Apparat. Der Apparat von E. Mitscherlich (1794 bis 1863) (Fig. 236) besteht aus einem polarisierenden Nicol *a*, welches das von einer Lichtquelle kommende Licht polarisiert. Dasselbe geht durch eine Linse *l*, vgl. die untere Figur, welche seine Strahlen parallel macht, dann durch den zu untersuchenden Körper und endlich durch das analysierende Nicol *b*, das entweder mit einem Kreise fest verbunden ist, mit dem es sich gegen einen feststehenden Nonius dreht, oder das, wie in Fig. 236, mit einem Nonius versehen ist, der sich über einem Kreise dreht. Zwischen den beiden Nicols läßt sich ein kleines Tischchen (Fig. 237) aufstellen, auf welchem durch die Federn *m* und *n* und entsprechende auf der Rückseite Platten *q* festgehalten werden können.

Fig. 236.



I. Versuche mit Quarzplatten.

a) Mit homogenem Natriumlicht.

Übung. 1. Man stellt vor *a* eine Natriumflamme, welche der *D*-Linie des Sonnenspektrums entsprechendes Licht liefert.

2. Man dreht den Analysator. Bei einer Drehung um 360 Grad tritt zweimal Dunkelheit ein. Dann sind die Nicols gekreuzt. (In diesen Fällen stehen die Längsdiagonalen ihrer Querschnitte senkrecht zueinander.)

Fig 237.

3. Man schaltet zwischen die gekreuzten Nicols, also wenn das Gesichtsfeld dunkel ist, eine Glasplatte ein; das Gesichtsfeld bleibt dunkel.

4. Man stellt zwischen die gekreuzten Nicols eine senkrecht zur Achse geschnittene Quarzplatte *q* so, daß sie senkrecht zu der Verbindungslinie der beiden Nicols steht. Das Gesichtsfeld wird hell.

5. Man dreht das Nicol nach rechts oder links und beobachtet, wo zuerst Dunkelheit eintritt. Danach bestimmt sich bei hinlänglich dünnen Platten, ob der Körper rechts- oder linksdrehend ist.

6. Man liest die Stellung ab bei Dunkelheit ohne Platte[1]) a,
dasselbe geschieht mit Platte . . . . . b.
Größe der Drehung Δ_1 . . . . . $\Delta_1 = b - a$.
Man mißt die Dicke der Platte mit dem Mikrometer l dm.
Man führt dasselbe für eine n mal so dicke
Platte aus, die Drehung ist . . . $\Delta_n = n(b - a)$.

Die Drehung wächst proportional der Dicke der Schicht. Das Drehungsvermögen α_D der Quarzplatte ist also $\alpha_D = (b - a)/l$.

7. Man bestimmt α'_D für eine der ersten entgegengesetzt drehende Quarzplatte; es ist $\alpha'_D = \alpha_D$.

b) Mit homogenem Lithiumlicht.

1. Man bringt in die Flamme des Bunsenbrenners Chlorlithium und absorbiert die gelben Strahlen des stets vorhandenen Natriums durch ein rotes Glas und verfährt wie oben, dadurch finden wir α_{Li}.

Es ist: $\alpha_{Li} < \alpha_D$.

Die Drehung ist für die verschiedenen Farben verschieden.

Beispiel: Für Na-Licht $l_1 = 0{,}015$ dm; $a_1 = 5^0$, $b_1 = 38^0$; $\Delta_1 = b_1 - a_1 = 33^0$; $l_2 = 0{,}030$ dm; $a_2 = 5^0$, $b_2 = 71^0$; $\Delta_2 = b_2 - a_2 = 66^0 = 2(b_1 - a_1)$; $\alpha_D = 33/0{,}015 = 2200^0$ für 1 dm Dicke ($\alpha_D = 22^0$ für 1 mm Dicke, genauer Wert 21,723). — Für Li-Licht $l = 0{,}015$ dm; $a = 5^0$, $b = 29^0$, $\Delta = 24^0$, $\alpha_{Li} = 16^0$ für 1 mm Dicke.

c) Mit weißem Lichte.

1. Man stellt vor a eine leuchtende Gasflamme.

2. Man stellt das analysierende Nicol so, daß das Gesichtsfeld möglichst dunkel erscheint. Stellung a.

3. Man schaltet einen rechtsdrehenden Quarz ein und dreht das analysierende Nicol nach rechts. Das Gesichtsfeld wird nicht vollkommen dunkel, sondern es erscheint der Reihe nach grünblau, blaurot (purpur), orange, rot. Bei dem Auftreten der blauroten Farbe (der sog. „Übergangsfarbe", empfindlichen Farbe „teinte de passage") ist das Gesichtsfeld am dunkelsten und der Wechsel der Farbentöne beim Drehen des Nicols nach rechts und links sehr bedeutend; dreht man nach der Nulllage, so wird die Farbe blau, dreht man nach der anderen Seite, so wird sie rot. Die Drehung für die Übergangsfarbe wird mit α_g (α_{gelb}) oder α_j (α_{jaune}) bezeichnet.

4. Man liest die Stellung des Analysators für die Stellung, bei der das Gesichtsfeld blaurot erscheint, ab: b_1.

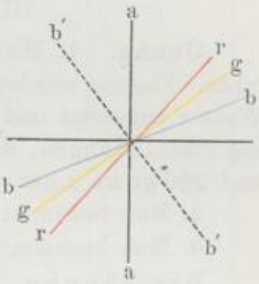
Es ist $\alpha_g = b_1 - a$ größer als $\alpha_D = b - a$ für die D-Linie.

Bemerkung. Der Farbenwechsel erklärt sich aus der Dispersion der Polarisationsebene. Für die verschiedenen Farben ist die Lage

[1]) Alle diese Einstellungen werden mehrfach wiederholt und zwar so, daß man gleich oft von der einen und der anderen Seite von Hell zu Dunkel übergeht; das Mittel aller Ablesungen wird genommen und den Rechnungen zugrunde gelegt.

derselben nach dem Durchgange der Strahlen durch die drehende Substanz verschieden. Ist sie z. B. ursprünglich aa, so ist sie nach dem Durchgange durch eine rechtsdrehende Substanz für die roten Strahlen rr, für die gelben gg, für die blauen bb (vgl. Fig. 238), also wird bei einer bestimmten Lage des Analysators $b'b'$ von allen im Weiß enthaltenen Farben nur eine, z. B. das Blau bb, vollkommen ausgelöscht; die anderen mehr oder weniger ausgelöschten Farben liefern eine Mischfarbe, welche zu der ausgelöschten komplementär ist. Am dunkelsten ist das Gesichtsfeld, wenn der hellste Teil des Spektrums, das Gelb, ausgelöscht ist. Das Gesichtsfeld erscheint in dem oben erwähnten, eigentümlichen blauroten Tone der „Übergangsfarbe". Bei kleinen Drehungen aus dieser Lage treten die lebhaftesten Farbenwechsel auf; denn dreht man das Nicol nach der Seite, wo das Blau ausgelöscht wird, also von der Nulllage fort, so muß das Gesichtsfeld rot, dreht man es zu der Nullage hin, so muß es blau erscheinen.

Fig. 238.

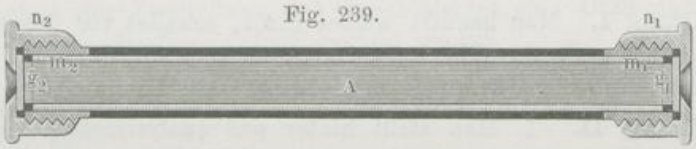


Da $(b - a) = \alpha_D$ dem Orange, $(b_1 - a) = \alpha_g$ dem Gelb entspricht, so muß, da das Gelb stärker gedreht wird als das Orange, $\alpha_g > \alpha_D$ sein. Bei dem Zucker z. B. ist $\alpha_g : a_D = 1{,}13$.

II. Versuche mit ungemischten Flüssigkeiten.

Zu allen Versuchen mit flüssigen, drehenden Substanzen dienen Rohre (Fig. 231). Auf die an beiden Enden eben und genau senkrecht zu ihrer Achse abgeschliffene Glasröhre A sind Messingfassungen m_1, m_2

Fig. 239.



mit Gewinden aufgekittet; über dieselben schraubt man Überfangschrauben n_1 und n_2, welche die Glasplatten g_1 und g_2 gegen die abgeschliffenen Enden schwach andrücken.

Übung. 1. Man reinigt das Rohr, legt die Platte g_1 auf und schraubt n_1 über m_1, dann stellt man das Rohr vertikal, füllt dasselbe mit Flüssigkeit, bis eine Kuppe vorhanden ist, und legt die zweite Glasplatte g_2 oben auf, so daß keine Luftblase bleibt; dann schraubt man n_2 über m_2 und wischt sorgfältig Glasplatten und Röhre ab.

2. Man legt die Röhre in den Apparat ein und wartet, bis sich die Temperatur in derselben ausgeglichen hat, weil sonst das Bild verwaschen erscheint.

3. Man liest ab für homogenes gelbes Licht:

Lage des analysierenden Nicols ohne Röhre . . . . . a [1]).

" " " " mit " . . . . . b.

Länge der Röhre . . . . . l dm.

Dann ist das Drehungsvermögen . . . . . $\alpha_D = (b - a)/l$.

4. Man bestimmt mit dem Pyknometer die Dichte . . . d.

Beispiel: Terpentinöl. Das molekulare Drehungsvermögen der hier verwendeten Terpentinölsorte ist also, da $C_{10}H_{16} = 136$, $37{,}0 \times 136/100 = 50$.

III. Versuche mit Lösungen.

Übung. 1. Herstellung der Zuckerlösungen. In einer 50 cm³-Flasche werden 5 gr bzw. 10 gr Zucker usw. abgewogen, darauf Wasser zugesetzt und nach dem Lösen bis zur Marke aufgefüllt, dann hat man Lösungen, die 10 und 20 gr in 100 cm³ enthalten, oder 100 und 200 gr im Liter.

2. Man bestimmt die Drehungen für die beiden Lösungen.

3. Man bestimmt die Dichten für dieselben.

Berechnung. Mit der Zuckerlösung von 10 gr Gehalt in 100 cm³ ermittelt man $[\alpha]_D$ und mit diesem Werte von $[\alpha]_D$ berechnet man für die Lösung mit 20 gr den Prozentgehalt p.

Beispiel: Eine Zuckerlösung, die $c = 10$ gr Zucker in 100 cm³ enthielt, gab bei einer Rohrlänge von 2 dm die Drehung 13,3°, also ist $\alpha = {}^1/_2\, 13{,}3$ und $[\alpha]_D = 13{,}3 \times 100/(2 \times 10) = 66{,}5$. Eine Lösung $d = 1{,}07$ ergab bei $l = 2$ dm, $\alpha_2 = {}^1/_2\, 26{,}5°$. Der Gehalt dieser Lösung war also $p = 26{,}5 \times 100/(2 \times 66{,}5 \times 1{,}07) = 18{,}6$ und $c = 20$ Proz. Das molekulare Drehungsvermögen des Zuckers $C_{12}H_{22}O_{11}$ (M = 342) ist: $66{,}5 \times 342/100 = 227$.

IV. Bestimmung der Drehung für Strahlen verschiedener Wellenlänge.

Übung I. Man benutzt weißes Licht, schaltet vor dasselbe die Landoltschen Strahlenfilter oder entsprechende Glasplatten, S. 320, und bestimmt für die daselbst angegebenen λ die Drehungen.

Übung II. 1. Man stellt hinter das analysierende Nicol den Spalt eines Spektralapparates, den man nach S. 299 geeicht hat.

2. Man dreht das analysierende Nicol, bis das ganze Spektrum dunkel erscheint: Nullage a.

3. Man stellt den Quarz usw. zwischen analysierendes und polarisierendes Nicol und dreht ersteres. Durch das Spektrum wandert ein dunkler Streifen, der den ausgelöschten Strahlen entspricht. Man liest für die durch die Skala bestimmten einzelnen Teile des Spektrums, auf denen der Streif sich befindet, die Lagen des Nicols ab: $b_1 \ldots b_n$.

---

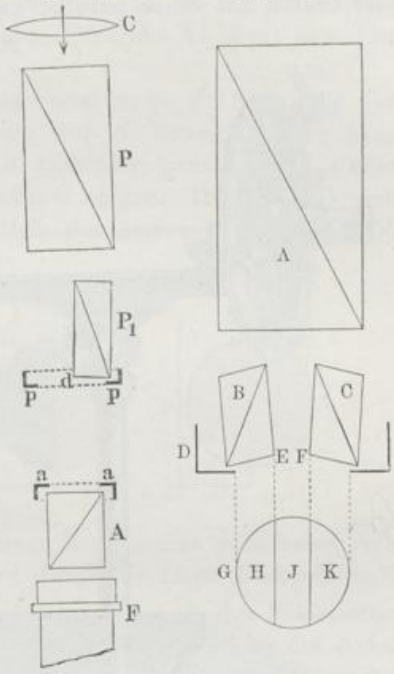
[1]) Zweckmäßig ist es, auch die entsprechende Lage des Nicols mit Röhre, aber ohne Füllung, zu bestimmen, da die Glasplatten infolge von Spannungen manchmal drehen. Die hierbei beobachtete Lage des Nicols tritt dann an Stelle von a.

Die Differenzen $b_1 - a, \ldots b_n - a$ geben dann die Drehungen für die verschiedenen Farben.

2. Lippichscher Halbschattenapparat.

Apparat. Die (Fig. 240) von der Lichtquelle kommenden Strahlen gehen durch eine bikonvexe Linse C, durchsetzen erst ein Nicolsches Prisma P, dann ein zweites P_1, das die Hälfte des Gesichtsfeldes von P bedeckt, ein Diaphragma pp, eine Blende aa, den Analysator A und ein Galileisches Fernrohr F. Die Linse C wird so gestellt, daß sie ein reelles Bild der Lichtquelle in der Ebene von aa entwirft, das Galileische Fernrohr wird auf die Kante d des Polarisators P_1 eingestellt.

Fig. 240. Fig. 241.



Man neigt die Polarisationsebene von P_1 ein wenig gegen diejenige von P durch Drehen von P_1, dann gehen durch die beiden Hälften des Gesichtsfeldes von pp zwei Strahlenbündel, deren Polarisationsebenen unter einem kleinen Winkel gegeneinander geneigt sind.

Statt eines Prismas P_1 hat man auch deren zwei B und C angewandt (Fig. 241) und erhält dadurch statt der Zweiteilung des Gesichtsfeldes eine Dreiteilung, wodurch die doppelte Genauigkeit erreicht wird.

Übung. 1. Man dreht den Analysator, bis beide Hälften des Gesichtsfeldes gleich dunkel erscheinen [1]), und liest seine Lage α_1 am Teilkreise ab.

2. Man dreht A um einen größeren Winkel hin und her und überzeugt sich, daß die dabei auftretenden Erscheinungen die gleichen sind, wie beim Laurentschen Apparate (s. w. u.).

3. Man legt eine Zuckerlösung zwischen pp und aa ein und dreht den Analysator, bis wieder gleiche Dunkelheit vorhanden ist: Lage α_2.

Die Drehung ist: $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$.

---

[1]) Dies ist indes nicht dann genau der Fall, wenn die Polarisationsebene des analysierenden Nicols auf der Halbierungslinie des Winkels der Polarisationsebenen von P und P_1 senkrecht steht, da die Polarisationsebene der durch P gegangenen Strahlen beim Durchgange durch P_1 nicht nur eine Änderung in der Lage erfährt, sondern die Strahlen selbst auch geschwächt werden.

3. Das Laurentsche Polaristrobometer (Fig. 242 u. 243).

Apparat. Als Lichtquelle dient bei diesem Apparate ein Bunsenbrenner *VA* mit Chlornatrium. Die Strahlen gehen durch die Blende *a* (Fig. 243), werden durch die Linse *e* parallel gemacht, durch ein Nicol *d* polarisiert und gehen dann durch ein Diaphragma *f*, dessen eine Hälfte mit einer parallel zur Achse geschliffenen Quarzplatte be-

Fig. 242.

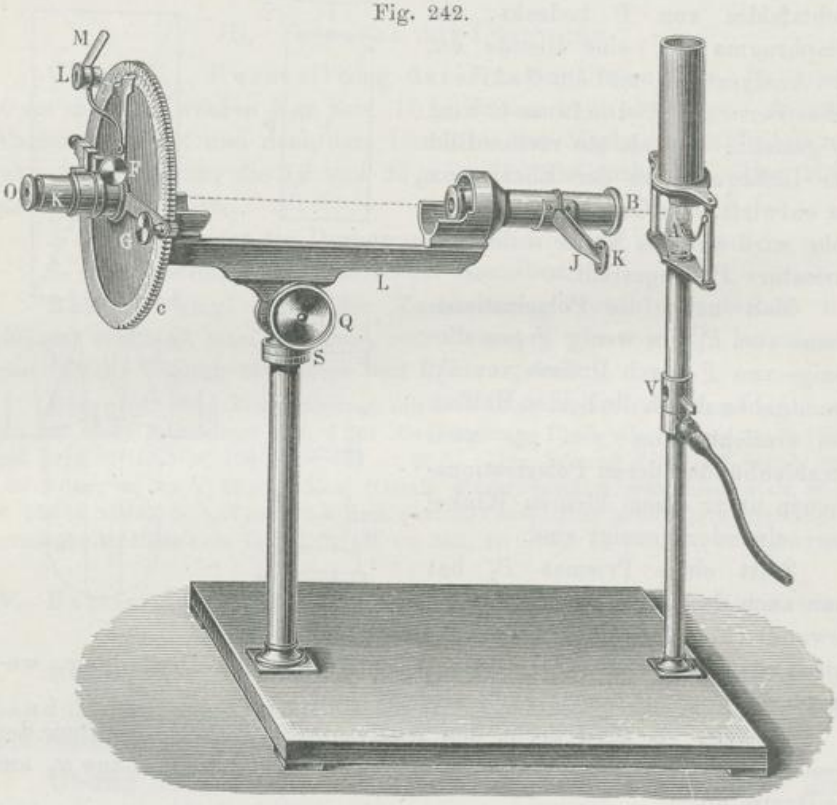
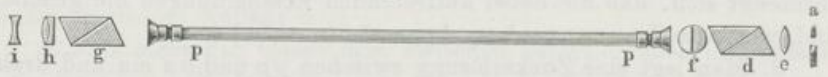


Fig. 243.



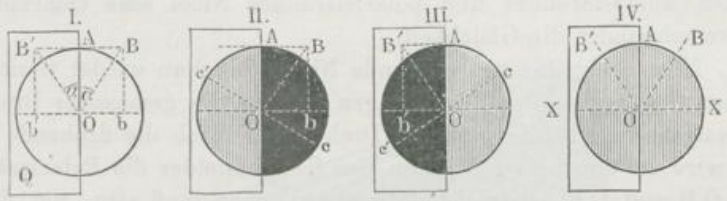
deckt ist. Das Diaphragma *a* ist meist noch mit einer Platte aus Kaliumbichromat bedeckt, um die blauen Strahlen der Bunsenflamme abzuhalten. Ein Bild des Diaphragmas *f* gibt Fig. 244 I. Die linke Hälfte ist durch die Quarzplatte *Q* bedeckt, die rechte dagegen frei.

Die Richtung der Kristallachse ist parallel derjenigen Kante *MN* der Quarzplatte, welche die Öffnung des Diaphragmas halbiert. Die Dicke der Platte ist so gewählt, daß die parallel und senkrecht zur

Achse der Quarzplatte polarisierten (vgl. S. 337), durch sie hindurchgehenden Strahlen des Natriumlichtes einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge $^1/_2\,\lambda$ erhalten. Ist dann (Fig. 244) die Polarisationsebene OB des nicht durch die Quarzplatte gegangenen Lichtes um einen Winkel α gegen OA geneigt, so ist diejenige des durch die Quarzplatte gegangenen OB' um denselben Winkel α gegen OA geneigt, aber nach der anderen Seite hin von OA. Zwischen die Quarzplatte und das analysierende Nicol g werden die zu untersuchenden Substanzen geschaltet. Ein Galileisches Fernrohr hi dient zum Einstellen auf die Quarzplatte.

Das polarisierende Nicol d ist mit einem Arme J (Fig. 242) verbunden, der sich längs einer Teilung auf K bewegt. Man kann dadurch die Polarisationsebene von d entweder parallel AO stellen oder gegen AO um einen kleinen Winkel α neigen. Das analysierende Nicol g ist mit dem Fernrohre hi mittels des Armes G drehbar. Bei

Fig. 244.



der Drehung bewegt sich ein mit einem Kreisnonius versehener Arm auf einer Kreisteilung, der Nonius wird durch die Lupe L abgelesen [1]).

Übung. 1. Man stellt die Polarisationsebene P des Polarisators durch Drehen an dem Arme J parallel AO, d. h. parallel zu der Achse des Quarzes; dann erscheinen bei jeder Stellung des analysierenden Nicols die beiden Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell. Die Intensität schwankt beim Drehen um 180° zwischen einem Maximum und Null.

2. Man dreht den Polarisator aus der ersten Lage, so daß seine Polarisationsebene OB einen Winkel α mit OA bildet. Die durch die beiden Hälften des Diaphragmas gegangenen Strahlen sind polarisiert, ihre Polarisationsebenen OB und OB' bilden einen Winkel $2\,\alpha$.

Man dreht den Analysator g, dessen Polarisationsebene $c'c$ entspreche, dann treten die Erscheinungen in II, III, IV ein. In der Lage II wird das durch die rechte Seite gegangene Licht, in der Lage III das durch die linke Seite des Diaphragmas gegangene Licht ausgelöscht. In der Lage IV, die zwischen beiden Stellungen II und

[1]) Wo die Bezifferung der Skalenteile des Teilkreises von einem bestimmten Nullpunkte an, wie hier, nach beiden Seiten wächst, trägt der bewegliche Kreisbogen zwei Nonien, die von einem Nullpunkte aus nach beiden Seiten hin mit wachsenden Ziffern versehen sind. Es ist derjenige Nonius zu benutzen, dessen Bezifferung mit der betreffenden Skala gleichläuft.

III liegt, in welcher die Polarisationsebene des Analysatornicols die Lage XX hat, gehen von dem nach OB und OB' polarisierten Lichte gleiche Bruchteile durch den Analysator, die beiden Hälften erscheinen gleich dunkel.

Diese Stellung dient als Nullstellung. Bei einer kleinen Drehung nach rechts und links aus dieser Lage werden abwechselnd die linke und die rechte Seite dunkel, man kann die Lage daher sehr genau bestimmen [1]). — Je größer die zu Gebote stehende Helligkeit, je klarer die untersuchte Lösung ist, um so kleiner kann man α machen und um so größer ist die Empfindlichkeit.

Die Einstellung auf gleiche Helligkeit ist genauer als diejenige auf Dunkelheit beim Mitscherlichschen Apparate, weil in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes die Helligkeiten bei der Drehung des analysierenden Nicols sich in entgegengesetztem Sinne ändern; die Helligkeit der einen nimmt zu, wenn die der anderen abnimmt.

3. Man stellt auf gleiche Helligkeit der beiden Hälften und schaltet zwischen analysierendes und polarisierendes Nicol eine Quarzplatte; dann verschwindet die Gleichheit.

4. Man dreht das analysierende Nicol, bis man wieder Gleichheit zwischen den beiden Dunkelstellungen erhält; die gemessene Drehung des Analysators gibt die gesuchte Drehung. Durch die drehende Substanz wird in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes die Polarisationsebene OB und OB' um gleichviel gedreht, man muß also, um die zu beiden symmetrische Stellung der Polarisationsebene des Analysators wieder zu erhalten, diesen um ebensoviel nachdrehen.

5. Man schaltet mit Zuckerlösung gefüllte Röhren ein und verfährt wie bei der Quarzplatte.

Bemerkung. Der Laurentsche Apparat ist nur für die eine Spektralfarbe anwendbar, bei der der Gangunterschied in der Quarzplatte für die senkrecht und parallel zu der Achse polarisierten Strahlen $^1/_2\,\lambda$ beträgt. Der Lippichsche Apparat ist für alle Farben anwendbar.

4. Das Wildsche Polaristrobometer.

Prinzip. Die S. 351 beschriebenen Erscheinungen in Kristallen treten nur auf bzw. verschwinden nur bei einer bestimmten relativen Lage von polarisierendem und analysierendem Nicol und Kristallplatten. Dadurch kann man die Lage der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes bestimmen.

Zwischen die gekreuzten Nicols wird im Polarisationsapparat eine Savartsche Doppelplatte gebracht: sie besteht aus zwei übereinander

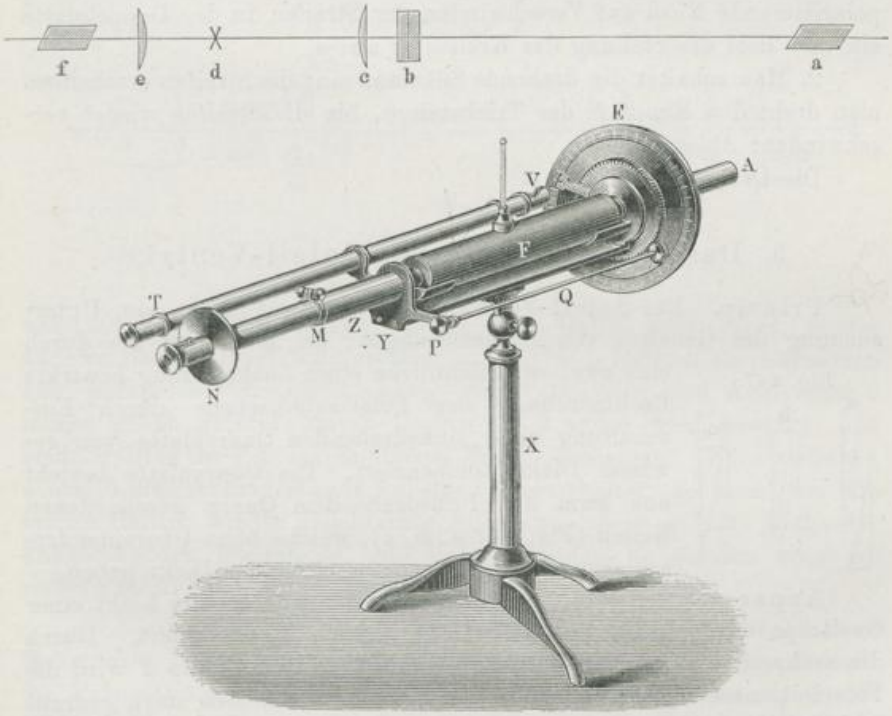
---

[1]) In einer Stellung, die um 90° von dieser Mittelstellung IV entfernt ist, sind abermals beide Hälften gleich hell, man muß aber sehr viel weiter drehen, um für eine der beiden Hälften bis zur Dunkelheit zu gelangen, die Einstellung ist also viel weniger empfindlich.

gekitteten Kalkspatplatten, deren Hauptachsen unter 45° gegen die Grenzflächen geneigt sind, und deren Hauptschnitte (S. 337) einen Winkel von 90° miteinander bilden. Dreht man die Platte um die auf ihrer Fläche senkrecht stehende Linie, so verschwinden die in dem Gesichtsfelde auftretenden schwarzen Streifen, Fig. 245 (isochromatische Kurven, S. 351), bei einer bestimmten Lage *a* der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes gegenüber dem Hauptschnitte. Dreht man schnell den Polarisator durch die Lage *a* hindurch, so wechseln die Streifen plötzlich ihre Lage, indem an die Stelle der früheren Helligkeitsmaxima Helligkeitsminima treten (vgl. S. 351). Schaltet man zwischen Polarisator und

Fig. 245.

Fig. 246.



Doppelplatte etwa eine linksdrehende Quarzplatte ein, so erscheinen die Streifen wieder, und man muß das polarisierende Nicol nach rechts drehen, um wieder das Verschwinden der Streifen herbeizuführen; Lage *b*.

Die Drehung des Quarzes beträgt dann $b - a$ Grade nach links.

Man hat durch die Rechtsdrehung des Nicols die Linksdrehung der Polarisationsebene durch die Quarzplatte kompensiert.

Apparat. Als Lichtquelle dient bei diesem Apparat die durch Chlornatrium gefärbte Flamme eines Bunsenbrenners. Der Apparat

(Fig. 246 a. v. S.) besteht aus dem mit einem Teilkreise verbundenen polarisierenden Nicol a, das durch die Triebstange Q mit dem Knopfe P an einem Nonius vorbeigedreht wird, aus dem Lager für die Röhre F, der Savartschen Platte b, dem analysierenden Nicol f und einem Fernrohre ce, mit dem man die Savartsche Doppelplatte betrachtet. Die in der Platte entstehenden Streifen verschwinden bei feststehendem Analysator, wenn die Lage der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes durch Drehen an P eine bestimmte geworden ist. Dreht man den Knopf P nach links, so dreht sich der Kreis E nach rechts; einer linksdrehenden Substanz entspricht daher auch eine Linksdrehung an P. Den Kreis E liest man durch das Fernrohr T ab, er wird durch eine Lampe, die neben V steht, beleuchtet, ihre Strahlen werden durch einen unter 45^0 gegen TV geneigten Spiegel auf die Teilung geworfen.

Übung. 1. Man stellt durch Drehen an dem Knopfe P das polarisierende Nicol auf Verschwinden der Streifen in der Doppelplatte ein und liest die Stellung des Kreises E ab: a.

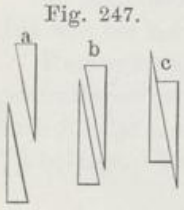
2. Man schaltet die drehende Substanz ein; die Streifen erscheinen, man dreht den Knopf P der Triebstange, bis die Streifen wieder verschwinden: Ablesung b.

Die Drehung ist: $b - a$.

5. Das Saccharimeter von Soleil-Ventzke.

Prinzip. Der Soleil-Ventzkesche Apparat dient zur Untersuchung des Gehaltes von Zuckerlösungen; bei ihm wird die durch eine gewisse Schichtdicke einer Zuckerlösung bewirkte Rechtsdrehung der Polarisationsebene durch Einschaltung einer linksdrehenden Quarzplatte von gewisser Dicke kompensiert. Die Quarzplatte besteht aus zwei aus linksdrehendem Quarz geschnittenen Keilen (Fig. 247 a, b, c), welche beim Übereinanderschieben eine Platte von wechselnder Dicke geben.

Fig. 247.



Apparat (Fig. 248). Das von a einfallende weiße Licht einer Gaslampe wird durch das Nicolsche Prisma 1 polarisiert. Durch die senkrecht zur optischen Achse geschnittene Quarzplatte 2 wird die Polarisationsebene der verschiedenen Farben verschieden stark gedreht (vgl. die Versuche S. 363). 3 ist eine polarisierende Vorrichtung mit vertikal gestelltem Hauptschnitt [1]) (achromatisiertes Kalkspatprisma), welche auf der einen Seite konvex geschliffen ist, um die durch eine Blende bei d gehenden Strahlen parallel zu machen. Die Strahlen gelangen auf die Doppelquarzplatte 4, die aus einer linksdrehenden

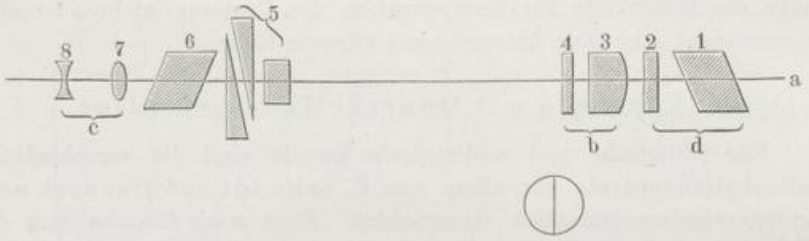
[1]) Bei manchen Apparaten sind die beiden Teile 1 und 2, durch deren gegenseitige Stellung die Farbe, in der das Gesichtsfeld erscheint, bedingt ist, am anderen Ende des Apparates angebracht, 3 ist der eigentliche Polarisator.

und einer rechtsdrehenden, in einer vertikalen Fuge zusammenstoßenden Hälfte besteht (vgl. die darunter skizzierte Vorderansicht). Diese Platte ist 3,75, bei manchen Apparaten 7,50 mm dick. 5 sind die Quarzkeile, die durch eine Schraube *B* mittels zweier Zahnstangen in entgegengesetzter Richtung bewegt werden können, und die ihnen vorgesetzte, rechtsdrehende Quarzplatte. Die Stellung der Quarzkeile wird an einer mit Nonius versehenen Skala abgelesen.

Zwischen 4 und 5 wird die Zuckerlösung eingeschaltet. Bei 6 ist ein zweites als Analysator dienendes Nicolsches Prisma eingeschaltet, welches so steht, daß man durch das Galileische Fernrohr 7 und 8, bei richtiger Einstellung des Apparates, beide Hälften von 4 gleich, und zwar in der empfindlichen Farbe (s. S. 363) gefärbt sieht.

Dadurch, daß die Dicken der Doppelquarzplatte 4 so gewählt sind, daß die mittleren Spektralfarben um 90° (bei 3,75 mm Dicke), bzw.

Fig. 248.



um 180° (bei 7,50 mm Dicke) in der einen Hälfte nach rechts, in der anderen nach links gedreht erscheinen, sind beide Hälften bei gekreuzten bzw. parallelen Polarisationsebenen von Polarisator und Analysator 6 immer gleich gefärbt; durch Drehen an 2 und 3 wird bewirkt, daß beide Hälften in der empfindlichen Farbe erscheinen. Wird zwischen 4 und 5 eine rechtsdrehende Substanz eingeschaltet, so muß, um die beiden Hälften wieder gleichfarbig zu machen, eine größere Dicke der linksdrehenden Quarzkeile, bei linksdrehenden Substanzen eine geringere Quarzdicke eingeschaltet werden.

1. Eichen der Skala. Eine Rohrzuckerlösung, welche 16,35 gr Rohrzucker in 100 cm³ Lösung enthält, dreht in 2 dm dicker Schicht die Polarisationsebene aller Farben wie eine Quarzplatte von 1 mm Dicke. Dies benutzt man bei der Eichung der an dem Soleil-Ventzkeschen Apparat angebrachten Skala, sofern dieselbe nicht schon direkt den Zuckergehalt angibt.

Übung. 1. Man stellt eine Rohrzuckerlösung von 16,35 gr in 100 cm³ Lösung (S. 364) her und füllt damit eine 2 dm lange Röhre. Gestattet der Apparat nur das Einlegen von 1 dm langen Röhren, so nimmt man die Konzentration der Lösung doppelt so groß.

2. Durch Drehen der Schraube *B* färbt man die beiden Hälften des Gesichtsfeldes zunächst angenähert gleich.

3. Durch Drehen an dem Teile d, Fig. 248, stellt man die Übergangsfarbe (S. 363) in beiden Gesichtsfeldern her.

4. Man macht eine Reihe von Einstellungen auf gleiche Färbung der beiden Hälften, liest die Stellung des Nonius an der Skala ab: a_1, a_2 . . . und nimmt das Mittel a.

5. Man legt die Röhren ein und bestimmt wieder einige Male die Noniusstellung A_1, A_2 . . . bei Farbengleichheit und nimmt das Mittel A. Dann ist die Drehung einer 1 mm dicken Quarzplatte oder einer 16,35 proz. Rohrzuckerlösung $D = A - a = 100$ Teilstriche der Skala.

2. Bestimmung des Prozentgehaltes von Zuckerlösungen. Gibt eine Zuckerlösung vom Prozentgehalte p Farbengleichheit der beiden Gesichtsfelder bei der Noniusstellung x, so ist

$$p = x \,.\, 16{,}35/100.$$

Die Übung gestaltet sich wie unter 1.

Bemerkung. Ist der Prozentgehalt p so groß, daß die größte Dicke der Quarzkeile zur Kompensation der Drehung nicht ausreicht, so verwendet man eine entsprechend kürzere Röhre.

6. Apparate mit Quarzkeilkompensation.

Für technische und medizinische Zwecke sind die verschiedenen Halbschattenapparate vor allem von F. Schmidt und Haensch auch für Quarzkeilkompensation eingerichtet. Statt nach Einschaltung der Zuckerlösung durch Drehen der polarisierenden Vorrichtung Gleichheit der Gesichtsfelder hervorzurufen, geschieht dies wie bei dem Apparate von Soleil-Ventzke durch Benutzung der Vorrichtung 5, Fig. 248, d. h. durch Ändern der Dicke einer eingeschalteten linksdrehenden Quarzschicht.

Allgemeines.

Die Drehung der Polarisationsebene erklärt sich daraus, daß in den drehenden Substanzen jeder einfallende geradlinig polarisierte Strahl, der in der Richtung der optischen Achsen fortschreitet, in zwei entgegengesetzt zirkular polarisierte (S. 345) zerfällt, die verschiedene Geschwindigkeiten haben. Beim Austritt aus dem Kristall setzen sich dieselben wieder zu einem geradlinig polarisierten, aber mit anderer Polarisationsebene zusammen.

Man teilt die drehenden Körper in zwei Klassen:

1. Körper, die in kristallisierter Form (aus dem regulären und den optisch-einachsigen Systemen) die Polarisationsebene drehen und diese Eigenschaft verlieren, sobald sie durch Schmelzen oder Lösen in den amorphen Zustand übergeführt werden. Bei ihnen rührt die Drehung von der Art des Aufbaues der Kristalle aus den Molekülen her.

Die optisch-einachsigen Kristalle zeigen nur für Strahlen, die sie in der Richtung der Hauptachse und in Richtungen, die ganz wenig gegen

diese geneigt sind, durchsetzen, eine Drehung. Von diesen Körpern lassen sich meist links- oder rechtsdrehende Kristalle darstellen, an denen in vielen Fällen eine Hemiedrie bzw. Tetartoedrie auftritt, die bei den rechtsdrehenden Körpern eine rechte, bei den linksdrehenden eine linke ist. So bei Quarz, Fig. 249 und 250, Natriumperjodat, Bleihyposulfat, Guanidincarbonat, Maticocampher usw.

2. Körper, die auch als Flüssigkeiten oder in Lösungen oder als amorphe nach dem Schmelzen erstarrte Körper oder im dampfförmigen Zustande eine Drehung zeigen. Diese Substanzen sind sämtlich Kohlenwasserstoffverbindungen. Sie zeigen im flüssigen und gasförmigen Zustande ein nahezu gleiches spezifisches Drehungsvermögen. Die Drehung ist durch eine besondere Anordnung der Atome im Molekül und nicht durch eine besondere Anordnung der Moleküle zu Molekül-

Fig. 249.

Fig. 250.

Fig. 251.

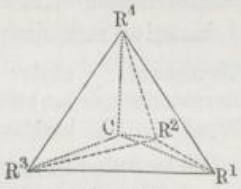
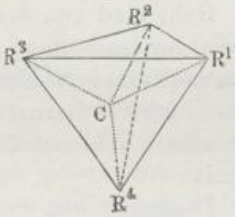


Fig. 252.



aggregaten bedingt. Zahlreiche drehende Substanzen entstammen dem pflanzlichen oder tierischen Organismus oder sind durch chemische Prozesse aus solchen Substanzen gewonnen. In neuerer Zeit hat man auf rein synthetischem Wege drehende Substanzen dargestellt.

Viele inaktive Körper bestehen aus einer Mischung bzw. einer Verbindung zweier aktiver, die mit dem betrachteten Körper isomer sind. So entsteht die inaktive Traubensäure aus Rechts- und Linksweinsäure.

Zur Erklärung der Drehung nimmt man an, daß der Lichtäther um die Körpermoleküle in bestimmter Weise geordnet ist; dies erfordert einen bestimmten molekularen Bau der Substanz.

Steht bei einem Körper von dem Typus CR^4 das Kohlenstoffatom in der Mitte eines Tetraeders und die vier mit demselben verbundenen verschiedenen Radikale $R^1R^2R^3R^4$ an den vier Ecken desselben, so kann eine solche Kombination $CR^1R^2R^3R^4$ (Fig. 251 und 252) in zwei enantiomorphen Formen auftreten, die sich wie Gegenstand und Spiegelbild zueinander verhalten. Verbindet man eines der Elemente $R^1R^2R^3R^4$,

etwa R^4, mit dem C-Atom und blickt in der Richtung der Verbindungslinie nach der entgegengesetzten Tetraederfläche, so sind bei der einen Form die anderen Elemente im speziellen Falle $R^1R^2R^3$ im Sinne des Uhrzeigers angeordnet, bei der anderen Form im entgegengesetzten Sinne. Die beiden Gebilde können nicht zur Deckung gebracht werden.

Asymmetrische Kohlenstoffatome nennt man solche, bei denen die vier Valenzen durch verschiedene einwertige Elemente oder Gruppen gesättigt sind, sie werden mit *C bezeichnet. Drehende organische Körper enthalten stets ein asymmetrisches Kohlenstoffatom, indes drehen auch viele Körper mit asymmetrischen Kohlenstoffatomen nicht. Die Asymmetrie der Kohlenstoffatome ist aber jedenfalls die Hauptbedingung, wenn auch nicht die einzige zum Entstehen der Aktivität.

Wir geben einige Beispiele für aktive Verbindungen mit einem asymmetrischen Kohlenstoffatom, für inaktive mit einem *C-Atom und inaktive mit einem nicht asymmetrischen C-Atome:

1. Weinsäure aktiv: $(COOH) - {}^*CH(OH) - [{}^*CH(OH) - (COOH)]$,
   Bernsteinsäure inaktiv: $(COOH) - CH_2 - (CH_2 - COOH)$,
   Erythrit inaktiv: $(CH_2OH) - {}^*CH(OH) - [{}^*CH(OH) - CH_2OH]$.

Viele Substanzen kommen in rechts- und linksdrehenden Modifikationen, sowie in inaktiven vor, so die Weinsäure und die Äpfelsäure.

Geht man von drehenden Substanzen aus und stellt Derivate derselben dar, so können zwei Fälle eintreten: 1. Das Derivat enthält kein asymmetrisches Kohlenstoffatom, es ist inaktiv. Aktive Weinsäure liefert inaktive Bernsteinsäure. 2. Das Derivat enthält noch ein asymmetrisches Kohlenstoffatom, dann ist es meist aktiv, oft aber auch inaktiv.

Lösungen von Salzen von drehenden Basen und nichtdrehenden Säuren und drehenden Säuren und nichtdrehenden Basen besitzen ein Drehungsvermögen. Die molekularen Drehungsvermögen der Salze derselben drehenden Basis bzw. Säure sind in konzentrierten Lösungen sehr verschieden, ja oft entgegengesetzt. In sehr verdünnten Lösungen nähern sich die molekularen Drehungsvermögen aber mehr und mehr demselben Werte. Aus der Dissoziationstheorie erklären sich diese Erscheinungen in der Weise, daß in konzentrierten Lösungen die Salze als solche vorhanden sind und das Drehungsvermögen des aktiven Bestandteiles durch den mit ihm verbundenen nicht aktiven beeinflußt wird, daß dagegen in verdünnten Lösungen die aktiven und inaktiven Bestandteile als Ionen vollständig getrennt sind. In den verdünnten Lösungen der verschiedensten Salze desselben aktiven Bestandteiles würden dann stets dieselben aktiven Ionen die Drehung bedingen.

X. Spektrophotometrie.

Gebraucht wird: Das Spektrophotometer; Heliostat; Gaslampe; Absorptionstrog; Kupfervitriol; farbiges Glas auf Stativ; Dickenmesser.

Prinzip. Die unter „Photometrie" angegebenen Methoden zur Vergleichung der Helligkeit zweier Lichtquellen setzen voraus, daß beide Lichtquellen dieselben Farben haben, bzw. beide weiß sind. Ist dies nicht der Fall, oder will man die Stärke der Absorption einer Substanz für die verschiedenen Farben untersuchen, so muß man das zu untersuchende Licht und das Licht der Vergleichslampe je in ein Spektrum zerlegen. Man halbiert dazu den Spalt eines Spektralapparates und beleuchtet jede Hälfte mit dem Lichte einer der zu vergleichenden Lichtquellen; man stellt z. B. vor die eine Hälfte ein Vergleichsprisma (S. 303), oder man läßt bei Absorptionsversuchen auf die beiden Spalthälften Licht fallen, das durch verschieden dicke Schichten der absorbierenden Substanz gegangen ist.

Um die Helligkeit in den auf diese Weise im Beobachtungsfernrohre übereinander entstehenden Spektren zu vergleichen, ändert man die Gesamthelligkeit des einen der beiden Spektren in meßbarer Weise, bis die Helligkeiten der untersuchten Farbe gleich sind. Bei dem Glanschen Photometer geschieht die Schwächung durch polarisierende Vorrichtungen; bei dem Vierordtschen, von Krüß modifizierten Photometer ändert man dazu die relative Weite der beiden Spalthälften [1]).

1. Glansches Photometer.

Apparat (Fig. 253 und 254). Das Spektrophotometer besteht aus dem Kollimatorfernrohr *C* mit dem Spalte, dem Beobachtungsfernrohr *F*, dem Skalenrohr *S* und dem Glasprisma *P*.

Der Spalt des Kollimators ist durch einen quer über demselben befestigten Streifen in eine obere und eine untere Hälfte geteilt. Die von diesen kommenden Strahlen werden durch die Kollimatorlinse parallel gemacht und fallen auf ein Wollastonsches Doppelprisma [2]) (*W*), das von jeder Spalthälfte ein ordentliches und ein außerordentliches Strahlenbündel liefert, die verschieden stark abgelenkt und senkrecht zuein-

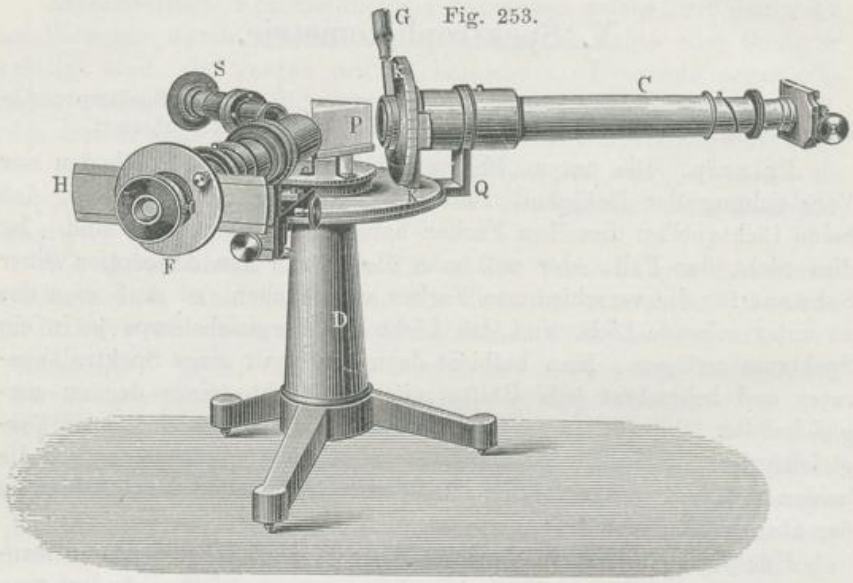
---

[1]) Andere Formen sind z. B. von G. Hüfner und A. König angegeben.

[2]) Dasselbe besteht aus zwei mit den Hypotenusenflächen zusammengekitteten rechtwinkeligen Kalkspatprismen, in denen die Achsen senkrecht bzw. parallel der brechenden Kante sind.

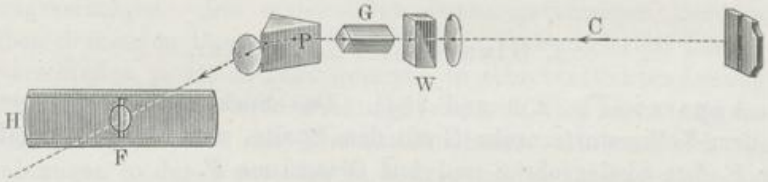
ander polarisiert sind. Die entstehenden vier Strahlenbündel fallen durch ein bei G befindliches drehbares Nicol, dessen Stellung an einem Teilkreise K abgelesen wird, auf das Prisma P, werden hier dispergiert und in dem Beobachtungsfernrohr F zu vier Spektren vereinigt. Liegen die Achsen der Rohre C und F in einer horizontalen Ebene (was durch

Fig. 253.



Drehen an den mit den Trägern derselben verbundenen Stellschrauben bewirkt wird), so fällt von der einen Spalthälfte das außerordentliche, von der anderen das ordentliche Bild in den mittleren Teil des Gesichtsfeldes. Das darüber und darunter liegende dritte und vierte Spektrum

Fig. 254.



wird durch die Platte H abgeblendet, in der ein Ausschnitt angebracht ist, dessen Höhe nahe gleich derjenigen der beiden mittleren Spektren zusammen ist.

Das obere dieser beiden Spektren ist unten durch eine vom Rot zum Violett schwach absteigende, das untere oben durch eine vom Rot zum Violett schwach ansteigende Linie begrenzt. Berühren sich also das untere und obere Spektrum für irgend eine mittlere Farbe, was man durch Ausziehen des Kollimators erreichen kann, so stehen die Spektra für die weniger brechbaren Strahlen etwas auseinander, für die brechbareren greifen sie übereinander. Man kann in jedem Teile

des Spektrums eine Berührung herbeiführen, ohne die Schärfe der Einstellung zu beeinträchtigen, indem man gleichzeitig Kollimatorfernrohr und Beobachtungsfernrohr verkürzt oder verlängert. In der in der Brennebene des Beobachtungsfernrohres F befindlichen Platte K lassen sich von beiden Seiten her zwei Schieber vorschieben, dadurch kann man irgend einen schmalen Teil des Spektrums ausblenden; der Raum zwischen den Schiebern heißt der Okularspalt. Das Skalenrohr S dient zur Bestimmung der verschiedenen Stellen im Spektrum.

Dreht man das Nicolsche Prisma bei G so, daß sein Hauptschnitt zu der Polarisationsebene des von der oberen Spalthälfte kommenden, durch das Wollastonsche Prisma gegangenen Lichtbündels senkrecht steht, so erscheint das untere Spektrum dunkel, das obere hell. Dreht man von dieser Stellung aus das Nicol um α Grad, so ist die Helligkeit der unteren Hälfte $i\,a\,sin^2\alpha$, die der oberen $i'\,a'\,cos^2\alpha$, wo i und i' die Lichtmengen sind, welche auf die obere bzw. untere Spalthälfte fallen; a und a' sind konstante Größen, welche durch den Lichtverlust im Apparate bestimmt sind. Ist im speziellen α der Winkel, bei dem beide Gesichtsfelder in einem Spektralbezirke gleich hell sind, so ist für die betreffende Farbe

$$i\,a\,sin^2\alpha = i'\,a'\,cos^2\alpha$$

$$\frac{i}{i'} = \frac{a'}{a}\,ctg^2\alpha, \qquad i = i'\,c\,.\,ctg^2\alpha.$$

1. Eichen des Apparates.

Übung. 1. Man zeichnet für die Skala S des Apparates Fig. 253 nach den S. 305 gegebenen Vorschriften die Wellenlängenkurve.

2. Man richtet den Apparat gegen eine Milchglasplatte, hinter welche man eine Lampe stellt, so daß beide Spalthälften gleichmäßig erleuchtet werden, also $i = i'$ und $i/i' = 1$ ist.

3. Man dreht das Nicol so, daß das untere Gesichtsfeld dunkel erscheint, und liest die Lage desselben ab; sie sei α_0.

4. Man dreht, bis beide Gesichtsfelder gleich erscheinen: Lage α_1. Dann ist

$$1 = c\,.\,ctg^2(\alpha_1 - \alpha_0), \quad c = tg^2(\alpha_1 - \alpha_0).$$

2. Vergleichung der Helligkeit der verschiedenen Farben zweier Lichtquellen.

Übung. 1. Man läßt das durch einen Heliostaten in horizontaler Richtung geworfene Sonnenlicht auf ein vor dem Vergleichsprisma des Apparates in passender Entfernung aufgestelltes weißes Papier fallen.

2. Vor den Spalt stellt man eine möglichst helle Gaslampe.

3. Man blendet, indem man das Beobachtungsfernrohr dreht, mit dem Okularspalt an den den Skalenteilen S_1, S_2..., d. h. den Wellenlängen λ_1, λ_2... entsprechenden Teilen des Spektrums schmale, gleich breite Streifen aus, und liest die Lagen α_1, α_2 ... des Nicols ab, bei denen Gleichheit der beiden Bilder eintritt.

Dann gibt $c\,ctg^2\,(\alpha_1 - \alpha_0)$, $c\,ctg^2\,(\alpha_2 - \alpha_0)$ usw. die relative Helligkeit des Lampenlichtes gegenüber derjenigen des diffus reflektierten Sonnenlichtes für die Wellenlängen λ_1, λ_2 ...

Man findet, daß das Gaslicht relativ arm an violetten und blauen Strahlen ist, und daß in ihm die roten Strahlen überwiegen.

3. Bestimmung der Extinktion und Absorption[1]) eines farbigen Glases für verschiedene Teile des Spektrums.

Übung. 1. Man stellt eine Gaslampe in einiger Entfernung vom Spalte auf und vor diese in Brennweitenentfernung eine Linse. Man bestimmt wie bei 1. die Konstante c für die einzelnen Farben.

2. Ein Stück blauen Glases wird mittels eines Stativs vor die obere Spalthälfte gehalten, so daß die untere Kante gerade vor der Mitte des den Spalt bedeckenden Streifens liegt, dann erscheinen im unteren Spektrum, welches der oberen Spalthälfte entspricht, im Gelb und Grün dunkle Absorptionsstreifen.

3. Man liest die den Streifen entsprechenden Skalenteile S ab und blendet einzeln ihre mittelsten, dunkelsten Stellen, ihre Randpartien, sowie auch diejenigen Stellen aus, in denen keine Absorption zu sehen ist.

4. Man bestimmt für die einzelnen Streifen die Winkel α, für welche Gleichheit eintritt. Dann ist das Verhältnis der Helligkeit des durchgegangenen Lichtes i_d zu derjenigen des auffallenden i_a, d. h. die Extinktion E:

$$E = i_d/i_a = c\,ctg^2\,(\alpha - \alpha_0).$$

Die Absorption des Glases für die betreffende Strahlengattung ist:

$$(i_a - i_d)/i_a = A.$$

Der Helligkeitsverlust $i_a - i_d$ rührt nicht allein von der Absorption im Glase her, sondern auch von der Reflexion an der vorderen und der hinteren Wand desselben; bei jeder Reflexion an der Grenze von Luft und Glas beträgt bei Glas von dem Brechungsindex 1,5 der Verlust 0,04 i_a, beide Verluste zusammen betragen also 0,08 i_a. Diese sind von dem beobachteten Helligkeitsverlust abzuziehen.

4. Bestimmung der Extinktions- und Absorptionskoeffizienten einer gefärbten Flüssigkeit.

Hierzu dient ein Glastrog mit parallelen Wänden, Fig. 255, in dessen untere Hälfte eine kleine planparallele Platte (oder ein Schulzscher Körper S) gelegt wird, so daß zwei übereinander liegende, verschieden dicke Tröge entstehen.

Übung. 1. Man stellt den Apparat wie bei 3. auf und bestimmt die Konstante c. 2. Man füllt den Trog mit Kupfersulfatlösung und stellt ihn so vor den Spalt, daß die obere Kante des Schulzschen

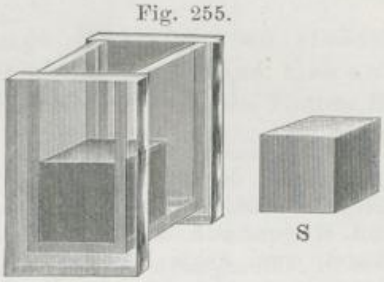
[1]) Über die Definitionen vgl. S. 240.

Körpers vor der Mitte des Spaltes steht. Vor diesem stellt man eine Lampe auf und eine Linse, welche die von ihr ausgehenden Strahlen parallel macht. 3. Man bestimmt wie in 1. für verschiedene Stellen des Spektrums das Verhältnis i/i' der Intensitäten i und i' der durch die obere und die untere Hälfte des Troges gegangenen Strahlen. 4. Man mißt die Dicke des Schulzschen Körpers d mm und die lichte Dicke des ganzen Troges, also ohne Deckplatten: D mm.

Berechnung. Ist I die Intensität des auffallenden Lichtes, $\varepsilon = e^{-a}$ die auf die Schichtdicke = 1 cm bezogene Extinktion (S. 241), so sind die Intensitäten i und i' der durch die obere und untere Schicht von der Dicke d_1 und d_2, d. h. $d_1 = D$ und $d_2 = D - d$ gegangenen Strahlen:

$$i = Ie^{-aD},\ i' = Ie^{-a(D-d)}$$
$$i/i' = e^{-da} \text{ und}$$
$$a = \frac{1}{d}\,\frac{\log i'/i}{\log e}.$$

Fig. 255.



Bemerkung. Dadurch, daß man zwei verschieden dicke Schichten derselben Lösung miteinander vergleicht, macht man sich fast frei von dem Einfluß der Lichtverluste, welche bei der Reflexion an den Glaswänden der Tröge und den Grenzflächen zwischen Glas und Lösung eintreten. Daß in der Schicht, in der sich der Schulzsche Körper befindet, zwei Reflexionen an Glas und Flüssigkeit mehr als in der anderen stattfinden, hat nur einen kleinen Einfluß.

2. Vierordtsches Photometer.

Das Vierordtsche Photometer ist ein Spektralapparat, dessen Spalt in zwei Hälften geteilt ist, welche mikrometrisch durch je eine Schraube verengt oder verbreitert werden können. Dabei verschieben sich die Backen einer jeden Spalthälfte symmetrisch zur Mitte des Spaltes, so daß die Lage der letzteren ungeändert bleibt.

Bei den Messungen erweitert man die Spalthälfte, vor der die schwächere Lichtquelle steht, bis beide Spektren gleich hell erscheinen. Sind dann b_1 und b_2 die Breiten der Spalthälften, i' und i'' die Intensitäten der auf sie auftreffenden Lichtstrahlen, so ist

$$i'/i'' = b_2/b_1.$$

Bestimmungen von Absorptionskoeffizienten gestalten sich wie oben geschildert.