

# **Universitäts- und Landesbibliothek Tirol**

## **Leitfaden der praktischen Physik**

**Kohlrausch, Friedrich**

**Leipzig [u.a.], 1896**

Licht

# Licht.

## 37d. Lichtquellen. Spektrum.

Weisse starke Lichtquellen sind aufer der Sonne der Kalk- oder besser Zirkon-Brenner (Linnemann) im Knallgasgebläse oder die Anode der elektrischen Bogenlampe. Auch Auer'sches Glühlicht ist gut zu verwenden.

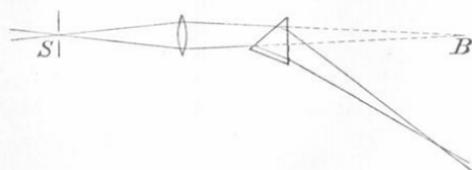
### Einfarbiges Licht.

Es ist im folgenden vielfach gleichgiltig, ob die Reinigung des Lichtes durch Absorption bez. spektrale Zerlegung vor dem Eintritt oder nach dem Austritt (vor dem Auge) geschieht. Letzteres ist oft bequemer.

Farbig absorbirende Mittel („Strahlenfilter“). Kräftig rotes Kupferoxydulglas liefert ein leidlich homogenes Licht. Auch einzelne grüne Gläser oder Gelatineplatten sind brauchbar, besonders wenn man verschiedenfarbige Platten geeignet hintereinander stellt. Über farbige Flüssigkeiten vgl. Landolt, Chem. Ber. 1894, 2872.

Man prüft und definiert die resultirende Farbe mit dem Spektralapparat.

Spektrale Zerlegung. Licht passirt einen Spalt  $S$  und dann eine Linse, welche ein objectives Bild  $B$  des Spaltes entwirft. Hinter die



Linse kommt ein Prisma; falls die Lichtquelle vom Spalte weiter absteht (Sonne), etwa an den Ort des Bildes, welches die Linse von der Lichtquelle entwirft. Ungefähr im Abstände des Bildes  $B$

vom Prisma entsteht dann seitlich, bei einem geradsichtigen Prisma mitten, das Spektrum, aus welchem die gewünschte Farbe durch eine Blende herausgeschnitten werden kann. Gewöhnlich gibt man dem Prisma diejenige Stellung, in welcher das Spektrum am wenigsten abgelenkt ist, doch können auch andere Stellungen, welche eine Farbe mehr zusammendrängen oder ausbreiten, Vorteile bieten.

Ein reines Spektrum verlangt einen engen Spalt mit scharfen Schneiden und eine gute achromatische Linse, oft auch ein Abblenden falschen Lichtes. Die Reinheit wird an dem deutlichen Auftreten der Fraunhofer'schen Linien oder auch des Bildes von einem Querfaden im Spalt erkannt, welches im Spektrum als Querlinie auftritt.

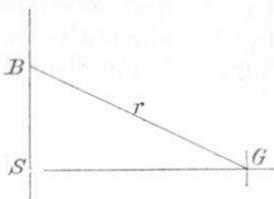
Das Spektrum des elektrischen Lichtbogens ist reicher an ultravioletten Strahlen als das Sonnenlicht. Wegen der Absorption im Glase wird für ultraviolette Strahlen Quarz oder Flussspat genommen; der letztere absor-

birt auch die ultraroten Strahlen wenig. Von  $\lambda = 200 \mu\mu$  an abwärts absorbiert Quarz, von  $\lambda = 185 \mu\mu$  an sogar die Luft selbst, so daß schließlich mit Beugungsgittern im Vacuum gearbeitet werden muß (Schumann).

**Gitterspektrum.** An die Stelle des Prismas kann das Beugungsgitter treten, welches nach beiden Seiten Spektra liefert, in der Regel nach der einen Seite lichtstärker als nach der anderen. Das sichtbare Spektrum 1. Ordnung (Fig. S. 198) ist getrennt von den übrigen, die höheren Spektra greifen in einander über.

**Reflexionsgitter.** Dieselben pflegen in Metallflächen eingegraben zu sein. Ebene Reflexionsgitter wirken ebenso wie die durchlässigen, sobald man das Spiegelbild der Lichtquelle in der Gitterebene als Lichtquelle ansieht (Quincke, Pogg. Ann. 146, 43. 1872).

**Rowland'sches Gitter.** Die Fläche ist schwach sphärisch, daher entsteht ein deutliches Spektrum ohne Linse, was wegen der Absorption von Bedeutung ist.  $S$  sei der Spalt,  $SG$  und  $SB$  sind zu einander senkrechte Schienen,  $BG$  ein Arm von der Länge des Krümmungshalbmessers der Gitterfläche. Der Teil des Spektrums bei  $B$  erscheint deutlich, wenn das Gitter sich in  $G$  befindet.

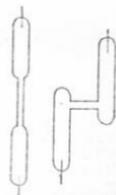


**Glühende Metalldämpfe. Metallsalze,** ausser Na besonders noch Li und Tl (Tab. 19 a; Fig. S. 179), werden in den Bunsenbrenner eingeführt als Perlen an der Platinöse oder von Platindrathkörbchen gehalten (Landolt'scher Brenner), in das Luft- oder Sauerstoff-Gebläse auch als gegossene Stäbchen (du Bois Z. S. f. Instr. 1892, 265). Das Chlorid oder Bromid, wegen Verknisterns vorher erhitzt, ist heller, das Carbonat aber ausdauernder, leichter anzuschmelzen und für Lithium durch Ausschütteln des Pulvers mit Wasser leicht zu reinigen. Auch Stäbchen aus Natronglas können dienen. Nebenlicht, z. B. aus der Gasflamme selbst, sucht man durch Absorptionsmittel, z. B. farbige Gläser, für Na-Licht auch durch Lösungen von Kaliumbichromat und Uranosulfat zu beseitigen.

Auch in dem elektrischen Lichtbogen kann man die Metalle verdampfen lassen. Der Bogen kann hier so lang gemacht werden, daß die Kohlen sich abblenden lassen; die Banden des Kohlendampfes, des Cyans und des Eisens aber bleiben als Verunreinigungen des Lichtes.

Die Metalle K, Sr, Ca, Rb, Cs, Zn, Cd etc. liefern eine Summe von diskreten Farben, die durch das Prisma zerlegt werden können. Die Wellenlänge der am meisten angewandten Linien s. in Tab. 19 a, ihre Farbe in Fig. S. 179.

**Geißler'sche Röhren.** Die gewöhnliche eingeschnürte Form und, um mehr Licht zu bekommen, eine solche mit Längsdurchsicht s. Fig. Wasserstoff-Füllung gibt die Wellenlängen  $C, F$ , eine aus der Gruppe  $G$  und  $h$  (Fig. S. 179). Quecksilber, Zink, Cadmium werden in der Röhre erwärmt. Das



intensivste Quecksilberlicht gibt die Arons'sche Röhre, in welcher man einen konstanten Strom zwischen zwei Quecksilberelektroden in einer  $\Pi$ förmigen Röhre übergehen läßt.  $\lambda$  siehe Tab. 19a.

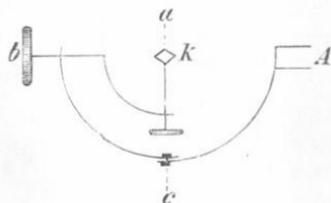
Arons Wied. Ann. 47, 767. 1892.

### 38. Messung eines Flächenwinkels mit dem Wollaston'schen Reflexionsgoniometer.

Das Instrument wird mit seiner Drehungsaxe parallel zu einer entfernten horizontalen Marke  $O$  (Fenstersprosse, Dachfirst) aufgestellt. Die zu messende Krystallkante sei bereits der Drehungsaxe parallel gemacht (s. unten). Man hält das Auge dicht vor den Krystall, dreht an der Axe, bis das in einer Krystallfläche gesehene Bild der genannten Marke  $O$  mit einer direkt gesehenen tiefer gelegenen ebenfalls horizontalen Marke  $U$  (Rand des Fußbodens; Spiegelbild der oberen Marke in einem hinter dem Goniometer befestigten Spiegel) zusammenfällt, und liest den Stand der Kreisteilung am Index (Nonius) ab. Dann dreht man den Kreis mit dem Krystall, bis das Spiegelbild von  $O$  in der anderen Krystallfläche mit  $U$  zusammenfällt, und liest wiederum ab. Der Winkel, um welchen man gedreht hat, ergänzt den gesuchten Winkel der zwei Flächen zu  $180^\circ$ .

Zur „Repetition“ der Messung ist gewöhnlich innerhalb der Drehungsaxe des Kreises concentrisch eine zweite Axe angebracht. Vgl. 88.

Einstellung der Kante parallel der Axe. Zwei aufeinander senkrechte Drehungen genügen, um der zu messenden Kante durch Probiren jede Richtung zu geben; systematisch aber kann man die zu messende Kante durch eine dritte Axe orientiren. (Naumann.)



$A$  ist die Axe des Kreises,  $a, b, c$  sind die Orientierungsachsen,  $k$  der mit etwas Wachs befestigte Krystall.

1. Man stelle durch Drehung um  $c$  die Vorrichtung so, daß  $b$  die Fortsetzung von  $A$  bildet, d. h. beim Drehen von  $A$  ruhig läuft. Nun wird durch Drehen um  $a$  die Krystallfläche I zu  $A$  parallel gestellt. Vgl. darüber unten.

2. Man verdrehe  $c$  um etwa  $60$  bis  $90^\circ$ , so wird sich im

allgemeinen die Stellung von Fläche I geändert haben. Durch Drehung um  $b$  stellt man I wieder parallel zu  $A$ . Jetzt steht I parallel zu  $A$  und zu  $b$ , also senkrecht zu  $c$ . Drehen um  $c$  ändert also die Lage von Fläche I nicht mehr.

3. Durch Drehung um  $c$  stellt man die Fläche II parallel zu  $A$ .

Bei jeder folgenden Einstellung einer Axe dürfen die vorher orientirten nicht mehr gedreht werden!

Den Parallelismus einer Fläche mit der Axe  $A$  erkennt man mittels zweier in der Ebene des Teilkreises übereinanderliegender entfernter Marken (vertikale Fenstersprosse und ein darunter gezogener Strich auf dem Fußboden; Schornstein, Blitzableiter etc. und sein Bild in dem festen Spiegel des Goniometers). Die Fläche ist der Axe parallel, sobald bei passender Drehung um  $A$  das Spiegelbild des oberen Punktes in der Fläche mit dem unteren Punkte zusammenfällt.

Zu genauerer Messung, falls die Krystallflächen eine solche gestatten, kann eine Orientir-Vorrichtung nach Art der obigen am Spektrometer (39 I) angebracht werden

Z. B. Konstruktion von Fuefs in Liebisch, phys. Krystallographie S. 379, Leipz. 1891. — S. auch Czapski, Z. S. f. Instr. 1893, 1 u. 242.

### 39. Bestimmung eines Lichtbrechungsverhältnisses mit dem Spektrometer (Goniometer).

Das Brechungs-Verhältnis (-quotient, -koeffizient, -exponent, -index) des Lichtes aus einem Mittel I in ein Mittel II ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten  $u_1 : u_2$ , oder der Wellenlängen  $\lambda_1 : \lambda_2$ , oder  $= \sin \alpha_1 : \sin \alpha_2$ , wenn  $\alpha_1, \alpha_2$  die Winkel eines aus I in II dringenden Strahles mit dem Lot auf der brechenden Fläche bedeuten. — Zwischen 3 Mitteln besteht die Beziehung  $n_{I\ III} = n_{I\ II} \cdot n_{II\ III}$ . — „Auf den leeren Raum reducirt“ wird das gewöhnliche, auf Luft als erstes Mittel bezogene B.-V. durch Multiplikation mit 1,00029, dem B.-V. aus dem leeren Raum in die Luft.

Wenn  $s$  die Dichtigkeit eines Körpers, so heist  $r = 1/s \cdot (n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  (früher auch wohl  $(n-1)/s$  oder  $(n^2-1)/s$ ) sein specif. Brechungs- oder Refraktionsvermögen.  $r$  ist von Temperatur, Druck und Aggregatzustand nahe unabhängig. Also nimmt das Brechungsverhältnis durch Temperaturausdehnung ab. Wenn  $A$  das chemische Molekulargewicht des Körpers, so heist  $r \cdot A$  das molekulare Brechungsvermögen.

### Allgemeine Regeln.

1. Fernrohr und Spaltrohr (Kollimator). Um das Fernrohr auf parallele Strahlen einzustellen, macht man zunächst das Fadenkreuz des Fernrohres durch Verstellen des ersten Okularglases oder des Fadenkreuzes selbst deutlich sichtbar. Dann richtet man das Rohr auf einen sehr entfernten Gegenstand, und bewirkt mit dem Auszuge, daß das Bild dieses Gegenstandes keine Parallaxe gegen das Fadenkreuz zeigt, d. h. daß beide bei einer Seitenbewegung des Auges sich nicht gegen einander verschieben. Ist das Fadenkreuz beleuchtbar, so kann das unendlich ferne Objekt auch durch das Spiegelbild des Fadenkreuzes in einem Planglase vertreten werden. Vgl. auch Nr. 8 dieses Abschnittes.

Der Spalt soll im allgemeinen durch die Spaltlinse gesehen ein unendlich fernes Objekt vertreten. Um dies zu erreichen, richtet man das auf unendlich eingestellte Fernrohr auf den beleuchteten Spalt und zieht das Spaltrohr so weit heraus, daß das Bild des Spaltes keine Parallaxe gegen das Fadenkreuz zeigt.

2. Beleuchtetes Fadenkreuz. Die Beleuchtung geschieht durch eine geneigte zwischen (Gauß'schem) Okular und Fadenkreuz befindliche Planglasplatte. Licht von einer seitlich aufgestellten Flamme fällt auf die Platte und wird von da durch das Fadenkreuz nach dem Objektiv geworfen. Ist das Fernrohr auf unendlich eingestellt, so treten Strahlen, welche von einem Punkt des Fadenkreuzes kommen, als Parallelstrahlen aus dem Objektiv und geben, etwa von einer Prismenfläche in das Fernrohr reflektirt, ein deutliches Bild des Fadenkreuzes. Fällt das Bild mit dem Fadenkreuz zusammen, so steht die Sehrichtung senkrecht auf der Fläche.



3. Kreisablesung. Die Anbringung zweier gegenüberliegender Ablesepunkte an einer Kreisteilung soll nicht nur die Ablesefehler verringern, sondern vor allem die Excentricität der Kreisteilung gegen die Drehungsaxe eliminieren. Man beobachte also jedesmal beide Nonien, zu jeder Ableseung den Nonius notierend. Dann nimmt man entweder das Mittel aus

den Winkeln, die jeder Nonius angibt; oder bequemer, man rechnet die Gradablesung immer nach Nonius I und nimmt nur in den Bruchteilen (Minuten) die Mittel.

4. Ob die Sehlinie des Fernrohrs senkrecht zu seiner Drehungsaxe ist, prüft man mit dem beleuchtbaren Fadenkreuz im Okulare. Auf das Tischchen des Instruments stellt man ein beiderseitig spiegelndes, etwa versilbertes (7, 6) Planparallelglas, welches selbst auf einem kleinen Fuß mit Stell-schraube steht oder auch direkt mit Klebwachs befestigt wird. Dieses Glas orientirt man so, daß im Fernrohr das Fadenkreuz mit seinem Spiegelbild zusammenfällt. Dreht man nun das Fernrohr um  $180^\circ$ , so müssen, wenn die Sehlinie zur Drehungsaxe senkrecht ist, abermals die Bilder zusammenfallen. Wenn nicht, so korrigirt man die Hälfte der Abweichung durch Neigen des Spiegelglases, die andere Hälfte durch Neigen des Fernrohrs und wiederholt die Probe u. s. f.

Eine nicht ganz parallele Glasplatte schneide und stelle man so, daß die beiden Bilder des Fadenkreuzes neben einander liegen. Dann läßt sich das Glas zu den Prüfungen verwenden.

5. Daß die Drehungsaxe des Tischchens oder des Kreises senkrecht zur Sehlinie des Fernrohrs ist, wird erkannt, indem man nach der Einstellung des Fadenkreuzbildes das Spiegelglas um diese Axe um  $180^\circ$  dreht; dann müssen die Bilder wieder zusammenfallen.

6. Hat das Spiegelglas selbst einen kleinen Fuß mit Stell-schrauben, so kann man mit demselben in leicht ersichtlicher Weise prüfen, ob die Ebene des Tischchens mit der Sehlinie des Fernrohrs parallel ist.

7. Um eine spiegelnde Fläche (Prismenfläche u. dergl.) mit der Drehungsaxe des Instrumentes parallel zu machen, kann das beleuchtete Fadenkreuz des berichtigten Fernrohrs gerade wie oben benutzt werden. Ist das Fernrohr berichtet, so genügt aber auch das Spaltrohr. Man richtet das Fernrohr gerade auf den Spalt und markirt (durch einen Querfaden) die Spalthöhe, welche in das Fadenkreuz fällt. Betrachtet man dann den Spalt in der Fläche gespiegelt, so muß, wenn diese mit der Axe des Instrumentes parallel ist, dieselbe Spalthöhe im Fadenkreuz erscheinen.

Sind zwei Flächen desselben Körpers (Prisma) einzustellen, so stellt man letzteren so, daß eine der Flächen auf der Verbindungslinie zweier Fußschrauben des Tischchens senkrecht steht. Diese Fläche wird zuerst berichtigt; alsdann die andere, wobei aber die genannten beiden Schrauben nicht mehr benutzt werden.

8. Prüfung einer Platte auf Planparallelismus. Die Kennzeichen sind: 1) es muß bei passender Stellung des Fernrohrauszuges das Spiegelbild des Fadenkreuzes deutlich und einfach erscheinen; 2) wenn das Fadenkreuz gegen sein Spiegelbild auf der einen Seite keine Parallaxe zeigt, so muß dies ohne Verstellung des Fernrohrauszuges auch auf der anderen Seite der Fall sein. Dann ist zugleich das Fernrohr auf unendlich eingestellt.

#### Brechungsverhältnis eines Prismas.

Das Prisma wird aus einem festen Körper durch Schleifen, aus einer Flüssigkeit durch Eingießen derselben in ein Hohlprisma aus planparallelen Glasplatten hergestellt. Zu messen ist 1) der Prismen- oder brechende Winkel, 2) die Ablenkung des Lichtstrahles.

##### I. Messung des brechenden Winkels $\varphi$ .

a) Wenn das Fernrohr feststeht und das Prisma mit dem Kreise drehbar ist. Das Prisma wird so auf das Tischchen gestellt, daß nach passender Drehung des Kreises die eine brechende Fläche nahe den früheren Ort der anderen einnimmt. Man macht zuerst durch die Fußschrauben des Tischchens nach Nr. 7 beide Flächen parallel der Drehungsaxe. Als dann wird durch Drehung des Kreises das Spiegelbild des Spaltes oder auch des beleuchteten Fadenkreuzes in der einen Prismenfläche auf das Fadenkreuz eingestellt und der Kreis an den Nonien abgelesen. Ebenso verfährt man mit der anderen Fläche. Die Differenz beider Ablesungen, selbstverständlich mit Rücksicht auf eine etwaige Überschreitung des Nullpunktes der Teilung, ergibt von  $180^\circ$  abgezogen den brechenden Winkel  $\varphi$ .

b) Wenn das Prisma feststeht, das Fernrohr mit dem Nonius oder mit dem Kreise drehbar ist. Man stellt das Prisma so auf, daß ungefähr die rückwärts verlängerte Halbierungslinie des brechenden Winkels den Spalt trifft. Sodann

wird das Fernrohr auf das Spiegelbild des Spaltes in jeder Fläche eingestellt. Der Unterschied der Ablesungen am Kreise in beiden Lagen ist der doppelte brechende Winkel. Der Spalt muß hier nach Nr. 1 sorgfältig auf unendlich eingestellt sein.

Mit dem beleuchteten Fadenkreuz mißt man den brechenden Winkel, indem man dasselbe mit seinem Spiegelbild in jeder der beiden Flächen zur Deckung bringt. Der gemessene Drehungswinkel ergänzt  $\varphi$  zu  $180^\circ$ .

## II. Messung des Ablenkungswinkels.

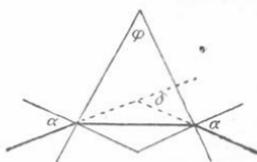
Die direkte Einstellung des Fernrohrs auf den Spalt ergibt die Richtung des nicht abgelenkten Lichtstrahles. Um den Ablenkungswinkel des durch das Prisma gegangenen Strahles und daraus den Brechungsindex zu finden, hat man vier Methoden.

a) Minimumstellung (Fraunhofer). Man stellt Prisma und Fernrohr so, daß der abgelenkte Strahl im Fernrohr erscheint, dreht dann langsam das Prisma und folgt der Verschiebung des Bildes mit dem Fernrohr. In derjenigen Lage, in welcher der Lichtstrahl die möglichst kleine Ablenkung hat (wo das Bild sich nach derselben Seite bewegt, man mag das Prisma links oder rechts drehen), fixirt man das Prisma, stellt nun das Fadenkreuz auf den Spalt ein und liest den Kreis ab. Diese Einstellung wird von der direkten Einstellung auf den Spalt abgezogen und ergibt den Ablenkungswinkel  $\delta$ . Statt auf den Spalt direkt einzustellen, kann man noch besser den Lichtstrahl einmal nach links, das andere Mal nach rechts durch das Prisma minimal ablenken lassen und von den beiden Einstellungen des Fernrohrs die halbe Differenz nehmen.

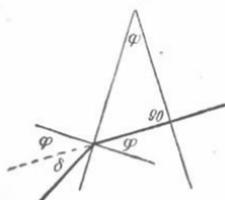
Das Brechungsverhältnis  $n$  ist, wenn  $\varphi$  den Prismenwinkel bedeutet,

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta + \varphi)}{\sin \frac{1}{2}\varphi}.$$

Beweis. Bei der Minimalablenkung geht der Strahl im Innern des Prismas symmetrisch durch, bildet also mit den beiden Normalen gleiche Winkel, offenbar  $= \frac{1}{2}\varphi$ . Der Einfallswinkel und ebenso der Austrittswinkel aus dem Prisma seien  $= \alpha$ , so ist nach dem Brechungsgesetz  $\sin \alpha = n \sin \frac{1}{2}\varphi$ . Der Ablenkungswinkel ist  $\delta = 2\alpha - \varphi$ , also  $\sin \frac{1}{2}(\delta + \varphi) = \sin \alpha = n \sin \frac{1}{2}\varphi$ , woraus obige Formel folgt.



b) Senkrechter Austritt (Meyerstein). Das Verfahren verlangt ein beleuchtbares Fadenkreuz. Man gibt dem Prisma die Stellung, bei welcher die dem Fernrohre zugewandte Fläche zur Sehlinie senkrecht ist, d. h. bei welcher das Fadenkreuz mit seinem Spiegelbild zusammenfällt. Ist  $\delta$  der Ablenkungswinkel,  $\varphi$  der brechende Winkel, so hat man (Fig.)



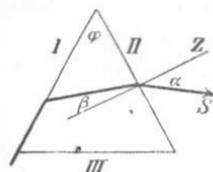
$$n = \frac{\sin(\delta + \varphi)}{\sin \varphi}.$$

c) In sich zurückkehrender Strahl (Abbe). Das Verfahren bedarf keines Spaltes, aber eines beleuchtbaren Fadenkreuzes. Das Fernrohr wird zur einen Prismenfläche erstens nach Nr. 2 senkrecht gestellt und abgelesen. Dann stellt man vor derselben Fläche so ein, daß die Strahlen vom Fadenkreuz, welche ins Prisma gedrungen, an der zweiten Fläche reflektirt und durch die erste wieder ausgetreten sind, wieder ins Fadenkreuz fallen (man stellt auf das Spiegelbild des Fadenkreuzes in der hinteren Prismenfläche ein). Beide Fernrohrstellungen mögen den Winkel  $\varepsilon$  mit einander bilden. Dann ist

$$n = \frac{\sin \varepsilon}{\sin \varphi}.$$

Folgt aus der Figur zu b), indem  $\varepsilon = \varphi + \delta$  ist. Vgl. Abbe, Apparate zur Bestimmung des Brechungsvermögens. Jena 1874.

d) Streifender Eintritt. (F. K.) Es wird weder Spalt noch beleuchtetes Fadenkreuz gefordert, sondern nur ein drehbarer Kreis und ein feststehendes Fernrohr. Die eine Prismenfläche (I) werde von einem breiteren Lichtbündel streifend getroffen, etwa von einer Natronflamme beleuchtet, welche man in die Fortsetzung der Fläche gestellt hat. Durch die andere Prismenfläche sieht man das Licht dann scharf abgeschnitten. Man stellt auf diese Grenze zwischen dunkel und hell ein. Der Winkel dieser Sehrichtung  $S$  mit der Normalen  $Z$  der Fläche II betrage  $\alpha$ .



Ist  $\varphi$  klein, so verläuft der Grenzstrahl  $S$  nach der anderen Seite von  $Z$ ; dann soll  $\alpha$  negativ gerechnet werden.

Mit beleuchtetem Fadenkreuz kann man  $\alpha$  direkt messen, indem man nach Nr. 2 noch auf die Normale  $Z$  einstellt.

Ohne beleuchtbares Fadenkreuz verfährt man so, daß man nach der Beobachtung durch die Fläche II nun durch I beobachtet und II streifend beleuchtet. Man dreht hierbei das Prisma mit dem Teilkreis vor dem Fernrohr oder das Fernrohr mit dem Kreis um das Prisma, bis wieder auf die Grenze zwischen hell und dunkel eingestellt ist. Dieser Drehungswinkel, um die Fläche III herum gezählt, heiße  $w$ , dann ist  $\alpha = 90^\circ - \frac{1}{2}(w - \varphi)$ .

Man berechnet  $n$  aus der Formel

$$n^2 - 1 = \left( \frac{\cos \varphi + \sin \alpha}{\sin \varphi} \right)^2.$$

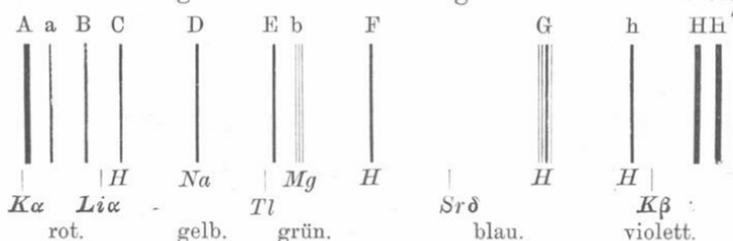
Denn man hat (Fig.)  $n = \sin \alpha / \sin \beta$  und von dem streifenden Eintritt an I noch  $n = 1 / \sin(\varphi - \beta)$ . Die Elimination von  $\beta$  aus beiden Gleichungen giebt obigen Ausdruck. Vgl. F. K., Wied. Ann. 16, 606. 1882.

Über eine Bestimmungsweise von kleinen Unterschieden der Brechung mit streifender Incidenz s. Hallwachs, Wied. Ann. 50, 577. 1893. — Das Refraktometer von Pulfrich s. 40 IV.

Die Genauigkeit des Resultates wächst bei allen Methoden im allgemeinen mit dem Prismenwinkel.

$a$  und  $d$  sind für Glasprismen bis zu  $70-80^\circ$  brauchbar; gebräuchlich ist ein Winkel von etwa  $60^\circ$ .  $b$  und  $c$  können höchstens für Prismenwinkel gegen  $40^\circ$ , für stärker brechendes Glas nur bis etwa  $35^\circ$  angewandt werden.

**Wellenlänge.** Das Brechungsverhältnis muß sich natürlich auf Licht von einer bestimmten Wellenlänge (Farbe) beziehen. Im Sonnenlicht, welches man mit dem Heliostat horizontal auf den Spalt wirft, benutzt man die Fraunhofer'schen Linien. Die Figur enthält die wichtigsten derselben im sicht-



baren Teil des Spektrums nach ihrer ungefähren Lage im prismatischen Spektrum. Für das Gedächtnis merke man sich, daß  $ADFGH$  ungefähr gleichen Abstand von einander haben. Die Wellenlängen s. in Tab. 19a.

Um  $A$  und  $a$  zu sehen, stelle man den Spalt nicht zu eng und halte ein rotes Glas vor.  $D$  zeigt sich bei engem Spalte und starker Vergrößerung als eine sehr feine Doppellinie.

Andere Lichtquellen s. in **37 d** und ihre Wellenlängen in Tab. 19a.

Zur Sichtbarmachung des ultravioletten Lichtes dient ein „fluorescirendes Okular“, welches am Ort des Fadenkreuzes eine fluorescirende Platte aus Gelatine oder Uranglas trägt. Von Glas wird ultraviolettes Licht teilweise erheblich absorbiert, so daß man auf Prismen etc. aus Quarz oder Flußspat angewiesen ist.

Der Unterschied der Brechungsverhältnisse für zwei bestimmte Farben (z. B. für  $B$  und  $H$  Fraunhofer) wird Dispersionsvermögen für diese Farben genannt.

Vgl. Tab. 19, 19a und 20.

Als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  (42) stellt man das Brechungsverhältnis  $n$  wohl dar durch die Reihe  $n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 \dots$ ; oder nach Lommel und Wüllner  $n^2 - 1 = \frac{A + B\lambda^2}{1 - C/\lambda^2}$ .

Über die abgesonderte Bestimmung der Dispersion durch Mikrometer s. Pulfrich, Z. S. f. Instr. 1893, 267. Spektrometer neuerer Form s. z. B. bei Lummer in Müller-Pouillet, Physik 9. Aufl. S. 222, 231. 1894.

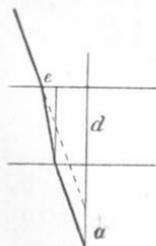
### 39a. Lichtbrechungsverhältnis einer Planplatte unter dem Mikroskop.

Die Platte habe die Dicke  $d$  und das gesuchte Brechungsverhältnis  $n$ .

Durch die Platte gesehen erscheint ein Objekt um  $a = d(n-1)/n$  näher. Denn wenn man in den beiden, in Wirklichkeit sehr spitzen, rechtwinkligen Dreiecken, welche  $e$  als kleine Kathete haben (Fig.), die Hypotenusen den größeren Katheten  $d$  bez.  $d-a$  merklich gleich annimmt, so stellt  $e/(d-a)$  bez.  $e/d$  den Sinus des Einfallswinkels bez. Brechungswinkels des Strahles vor. Also hat man  $n = d/(d-a)$ , oder  $a = d(n-1)/n$ .

1. Ein Mikroskop sei auf ein Objekt scharf eingestellt. Bringt man zwischen das letztere und das Objektiv die Planplatte, so wird man den Abstand um eine Strecke  $a$  vergrößern müssen, um wieder deutlich zu sehen. Das Brechungsverhältnis der Platte ist dann  $n = d/(d-a)$ .

2. Auf der Vorder- und der Hinterseite der Platte be-



finde sich je ein gut sichtbarer Punkt. Um von dem einen auf den anderen einzustellen, sei eine Verschiebung um die Strecke  $h$  notwendig. Dann ist, wie man aus obigem leicht ableitet,  $n = d/h$ .

3. Auf der Vorderfläche der Planplatte wird ein gut sichtbarer Punkt mit weißer Farbe angebracht. Man stellt das Mikroskop auf denselben ein. Um sodann das von der Rückseite der Platte zurückgeworfene Spiegelbild des Punktes zu sehen, wird man den Abstand zwischen Mikroskop und Platte um eine Strecke  $h$  verkleinern müssen. Das Brechungsverhältnis der Platte ist  $n = 2d/h$ .

Bei dem 3. Verfahren beleuchtet man mit auffallendem Licht und verdunkelt den Hintergrund oder noch besser, man versilbert das Glas auf der Rückseite (7, 6).

Um die Größe der notwendigen Verschiebungstrecken des Mikroskopes genau zu bestimmen, kann die Schraubenverstellung des Mikroskopes dienen, wenn die Höhe des Schraubenganges (18 I, 2 u. 3) bekannt ist und wenn der Schraubenkopf eine Kreisteilung besitzt.

Die genaue Einstellung wird am besten mit einem Fadenkreuz im Okulare beurteilt, welches keine Parallaxe gegen das Bild zeigt. Am geeignetsten ist ein Objektiv von kurzer Brennweite und nicht zu großem Durchmesser. Dann kann bei dickeren guten Platten die dritte Decimale noch brauchbar werden.

Über die Bestimmung des Brechungsverhältnisses einer Flüssigkeit aus dem Axenwinkel eines Krystalles s. 47 am Schlufs.

#### 40. Lichtbrechungsverhältnis aus dem Winkel der totalen Reflexion (Wollaston).

Wenn ein Lichtstrahl sich in einem Mittel vom Brechungsverhältnis  $N$  bewegt und auf die Grenzfläche gegen ein zweites Mittel vom kleineren Brechungsverhältnis  $n$  trifft, so tritt totale Reflexion des Lichtstrahles ein, sobald der Einfallswinkel an der Berührungsfläche größer als  $\arcsin(n/N)$  wird. Die Beobachtung des Grenzwinkels  $\Phi$  der totalen Reflexion liefert also die Beziehung

$$\frac{n}{N} = \sin \Phi,$$

woraus, wenn das Brechungsverhältnis von einem der Mittel bekannt ist, dasjenige des anderen berechnet werden kann.

Diese Bestimmungsweise erfordert im allgemeinen einfachere Hilfsmittel, als die von 39, und besitzt den Vorzug, auf unvollkommen durchsichtige Körper anwendbar zu sein.

Eine genaue Bestimmung muß auch hier sich auf Licht von einer bestimmten Farbe beziehen (S. 179).

### I. Mit dem Prisma.

1. Brechungsverhältnis des Prismas. Man beleuchtet die eine Fläche I eines Prismas, während das Spektrometer-Fernrohr auf die Fläche II gerichtet ist, von innen d. h. durch die dritte Fläche hindurch, mit diffusem homogenem Licht (37d). Die Grenze der totalen Reflexion an I erscheint als eine scharfe Grenzlinie zwischen hell und weniger hell. Auf diese Linie wird eingestellt. Die Richtung des Fernrohrs ist dann offenbar dieselbe wie die Richtung *S* der Figur S. 178 d) und genau so wie dort, auch nach derselben Formel, erhält man das Brechungsverhältnis des Prismas.

2. Brechungsverhältnis eines anderen Körpers. Man klebt diesen Körper mit einer stark brechenden Flüssigkeitsschicht (Cassia-Öl, Arsenbromtür) auf die Prismenfläche I und verfährt nun wie oben. Falsches Licht wird durch Schwärzen der störenden Flächen abgeblendet. Sowohl das Prisma wie die Flüssigkeit müssen stärker brechen als der Körper.

Ist  $n$  das gesuchte Brechungsverhältnis des angeklebten Körpers,  $N$  dasjenige des Prismas,  $\varphi$  der Prismenwinkel,  $\alpha$  der Winkel der Sehrichtung nach der Grenze der totalen Reflexion mit der Normalen auf der anvisirten Prismenfläche (Fig. zu 39d), so bekommt man

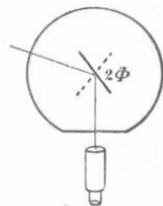
$$n = \sin \varphi \sqrt{N^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \varphi \sin \alpha.$$

Denn es ist  $N = n / \sin(\varphi - \beta) = \sin \alpha / \sin \beta$ , woraus der Ausdruck folgt. Vgl. F. K., Wied. Ann. 16, 607. 1882.

### II. Mit dem Totalreflektometer. (F. K.)

Man befestigt den Körper so an dem Instrument, daß seine spiegelnde Fläche die Drehungsaxe enthält; siehe unten. Rückseite und Umgebung des Körpers seien mit Tusche geschwärzt. Alsdann stülpt man das mit einer stärker brechenden Flüssigkeit (Schwefelkohlenstoff 1,63,  $\alpha$ -Monobromnaphthalin 1,66,

Methylenjodid 1,74) gefüllte Fläschchen von unten über den Körper, umgibt das Fläschchen mit gut durchscheinendem, nötigenfalls mit Petroleum bepinseltem Seidenpapier und beleuchtet auf einer Seite mit der Sodaflamme; oder man stellt die Flamme weiter entfernt und wirft mit einer Linse einen Strahlenkegel auf das Objekt. Bei passender, durch Probiren zu findender Stellung der spiegelnden Fläche und der Lampe wird dann das auf große Entfernung akkommodirte Auge oder Fernrohr das Gesichtsfeld der Fläche in eine helle und in eine weniger helle Hälfte geteilt sehen, auf deren Grenzlinie man einstellt. Dann dreht man Fläche und Lampe nach der anderen Seite und stellt wieder ein. Der halbe Winkel zwischen beiden Stellungen ist der Grenzwinkel  $\Phi$  der totalen Reflexion zwischen der Flüssigkeit und dem Körper, also  $n = N \sin \Phi$ , wenn  $N$  das Brechungsverhältnis der Flüssigkeit bedeutet.



Einstellung. Man dreht das Instrument in seinem Stativ um  $90^\circ$ , so daß man frei visiren kann, und stellt das Fernrohr auf unendlich ein (39, 1). Zur Prüfung, ob das Fernrohr der Kreisebene parallel steht, bringt man einen entfernten, gut markirten Punkt in das Fernrohr. Derselbe muß dann in der Teilkreisebene liegen.

Nun legt man das Instrument zurück und befestigt den Körper mit einem Kork oder dgl. an dem Träger, wobei die spiegelnde Fläche in die Drehungsaxe gebracht und dieser parallel gemacht wird. Hierzu dient eine Schneide und ein der Axe paralleler fester Spiegel, in welchem das eigene Auge oder ein Flämmchen in gleicher Höhe erscheinen muß, wie in der Fläche.

Je kleiner oder unvollkommener (bei natürlichen Krystallflächen) die spiegelnde Fläche, desto genauer muß die Fläche sowie die Sehlinie des Fernrohrs durch die Drehungsaxe gehen.

Das Brechungsverhältnis des reinen Schwefelkohlenstoffs beträgt für Natriumlicht bei  $20^\circ$  1,6276 und nimmt auf  $+1^\circ$  um 0,00080 ab. Die Temperatur muß also sorgfältig beobachtet werden. Ein Schirm, welcher zugleich den Hintergrund dunkel erhält, mit starker Glasplatte vor der Flamme vermindert deren erwärmenden Einfluß.

**Krystalle.** Doppelbrechende Objekte geben im allgemeinen zwei Brechungsverhältnisse, also zwei Grenzen. Ein einaxiger Krystall wird am bequemsten in einer zur Hauptaxe senkrechten Fläche (siehe 46a) untersucht. Der horizontal polarisirte (d. h. im Nicol'schen Prisma bei vertikaler Stellung der größeren Diagonale verschwindende) Strahl ist der ordentliche, der andere der außerordentliche.

Ist die Krystallfläche der optischen Axe parallel, so bekommt man beide Hauptbrechungsverhältnisse, wenn die optische Axe der Drehungsaxe parallel liegt. Horizontal polarisirt ist der außerordentliche Strahl.

Eine beliebig gelegene Krystallfläche liefert stets den ordentlichen Strahl; sie enthält aber auch eine zur optischen Axe senkrechte Richtung (Halbirungslinie des seitlichen Winkels in der Spaltfläche eines Rhomboeders; Grundlinie des Dreiecks in der Quarzpyramidenfläche). Diese Richtung horizontal gestellt liefert die beiden Hauptbrechungsverhältnisse.

Ein optisch zweiaxiger Krystall mit einem Schliff parallel einem Hauptschnitt (46a) gibt zwei Hauptbrechungsverhältnisse, wenn eine optische Elasticitätsaxe horizontal gestellt ist. Drehung um  $90^0$  liefert das dritte Hauptverhältnis und eins der obigen noch einmal.

**Flüssigkeiten.** 1. Brechungsverhältnis  $N$  der Flüssigkeit im Fläschchen. Man nimmt eine kleine Planplatte von bekanntem Brechungsverhältnis  $n$  (z. B. Bergkrystall mit den Brechungsverhältnissen 1,5442 und 1,5533 für Na) oder eine Luftschicht hinter einer Planplatte. Man hat dann

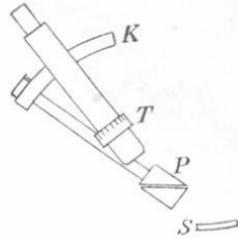
$$N = \frac{n}{\sin \Phi} \text{ oder bei Luft } N = \frac{1}{\sin \Phi}.$$

2. Ein Flüssigkeitstropfen hinter einer Planplatte kann ebenso untersucht werden wie ein fester Körper.

Vgl. F. K., Wied. Ann. 4, 1. 1878. Über die Anwendbarkeit des Totalreflektometers auf weißes Licht mit Hilfe eines Spektroskops vgl. Pulfrich, ib. 30, 487. 1887. Z. S. f. Instr. 1887, 55. Über eine Abänderung des Verfahrens durch Anwendung einer gläsernen Halbkugel anstatt der Flüssigkeit (Krystallrefraktometer nach Abbe) s. Czapski, Z. S. f. Instr. 1890, 246 u. 269.

### III. Mit dem Refraktometer (Abbe).

Das Abbe'sche Refraktometer hat ein drehbares Doppelprisma  $P$  aus schwerem Glase, zwischen dessen Trennungsflächen man zunächst einen Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit bringt. Man legt hierzu das Instrument um, schiebt das eine Prisma ab (Vorsicht! das weiche Glas ist leicht verletzbar), und nach Aufbringen der Flüssigkeit wieder auf. Lichtstrahlen, welche der Spiegel  $S$  auf das Prisma wirft, werden, wenn sie über ein gewisses Maß schräg auf die Flüssigkeitsschicht fallen, total reflektirt, so daß man bei richtiger Neigung der Prismen in dem auf Parallelstrahlen eingestellten Fernrohr das Gesichtsfeld scharf abgegrenzt sieht, wenn man z. B. Natriumlicht anwendet. Die Grenze wird auf das Fadenkreuz eingestellt, welches man vorher durch den Okularauszug deutlich sichtbar gemacht hat. Die Teilung auf dem Kreisbogen  $K$  gibt an dem Index der Alhidade direkt das Brechungsverhältnis der Flüssigkeit für Natriumlicht an.



Unter Anwendung gewöhnlichen weißen Lichtes erhält man folgendermaßen zugleich die Dispersion der Flüssigkeit. Das Gesichtsfeld ist hier im allgemeinen gefärbt. Man stellt den Kompensator, d. h. die Trommelteilung  $T$ , mit welcher zwei geradsichtige Prismen sich entgegengesetzt drehen, so, daß die Färbung einer scharfen Grenze Platz macht. Nun bringt man die Grenze auf das Fadenkreuz und liest Alhidade und Trommelteilung ab. Dann sucht man eine zweite Stellung der Trommel mit scharfer Grenze, stellt wieder ein und liest ab.

Das Mittel der beiden Alhidadenstellungen gibt das Brechungsverhältnis für Natriumlicht; die Dispersion wird nach einer jedem Instrument beigegebenen Tabelle berechnet.

Ein fester Körper wird mit einem Tropfen einer stark brechenden Flüssigkeit (Cassiaöl, Arsenbromür) unter das obere der beiden Prismen geklebt. Durchsichtige Körper werden mittels des Beleuchtungsspiegels durch Tageslicht oder Lampenlicht durchfallend beleuchtet. Andere erleuchtet man auffallend

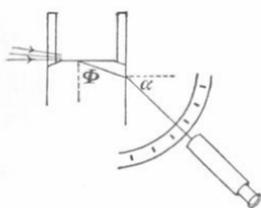
von der Seite. Einiges Probiren wird die Grenze deutlich sichtbar liefern.

Als Probe für die Richtigkeit, event. für die Korrektur der Theilungen dienen bekannte Flüssigkeiten (Tab. 20), insbesondere das Wasser oder eine bekannte Glas- oder Bergkrystallplatte (cf. II). Die Alhidade muß mit den Prismen sehr fest verbunden sein. Eine Unsicherheit liegt für manche Flüssigkeiten in der Temperatur.

Vgl. Abbe, Apparate z. Best. des Brechungsvermögens, Jena 1874 und Sitz.-Ber. d. Jen. Ges. f. Med. u. Nat. 1879, Febr. 21.

#### IV. Mit dem Refraktometer nach Pulfrich.

Das Instrument benutzt nicht eigentlich totale Reflexion, sondern streifenden Eintritt, was aber auf dasselbe hinauskommt. Die Flüssigkeit wird auf die Oberfläche eines Glaswürfels gebracht, über welchen zu diesem Zweck ein Glaszylinder gekittet ist. In  $\frac{3}{4}$  bis 1<sup>m</sup> Entfernung, ein wenig höher als die obere Glasfläche, stellt man eine Natriumflamme auf und vereinigt ihre Strahlen mit einer Sammellinse auf dem unteren Rand des Cylinders. Auf die Grenze



zwischen hell und dunkel richtet man von unten das vertikal drehbare, auf unendlich eingestellte Fernrohr, dessen Teilkreis den Grenzwinkel  $\alpha$  des Austritts mit der Normalen auf der Austritts-Glasfläche gibt. Hat das Glas das Brechungsverhältnis  $N$ , so hat die Flüssigkeit

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

Es muß  $n < N$  sein. Zwei Prismen  $N=1,615$  bez.  $1,78$  sind gebräuchlich. Eine Tabelle für  $n$  wird beigegeben. Die richtige Orientirung der Theilung kann mit Wasser ( $n_{17^\circ 5} = 1,3332$ ) geprüft werden.

Es ist  $N/n = 1/\sin \Phi$  und  $N = \sin \alpha / \sin (90 - \Phi) = \sin \alpha / \cos \Phi = \sin \alpha / \sqrt{1 - n^2/N^2}$ , also  $N^2 - n^2 = \sin^2 \alpha$  und  $n = \sqrt{N^2 - \sin^2 \alpha}$ .

Mit einer Heizvorrichtung kann in höherer Temperatur beobachtet werden. Eine Tabelle korrigirt die gleichzeitige Änderung der Brechung im Glase.

Mittels einer Trennungsfläche aus schwarzem Glase können

mehrere Flüssigkeiten gleichzeitig, also bei derselben Temperatur beobachtet werden.

Feste ebene Körper lassen sich durch Vermittelung eines stärker brechenden Flüssigkeitstropfens auf die Glasfläche bringen und ebenso untersuchen. Gepulverte feste Körper können untersucht werden, indem man sie auf der Glasfläche mit einem Flüssigkeitsgemisch (Alkohol, Äther, Aceton, Benzol, Toluol, Bromnaphthalin) übergießt, welches man durch Ausprobiren abändert, bis die dem festen Körper entsprechende Lichtgrenze scharf erscheint (Le Blanc).

Pulfrich, Z. S. f. Instr. Die einfache Form (Wolz in Bonn) 1888, 47; die vollkommene (Zeifs, Jena) 1895, 389. Auch Pulfrich, Das Totalreflektometer etc. Leipz. 1890. Le Blanc, Z. S. f. phys. Ch. 10, 433. 1892. Vgl. auch Traube, Physikalisch chemische Methoden S. 164.

#### V. Mit dem Spektrometer.

1. Das Verfahren II läßt sich mit dem Spektrometer (39) ausführen, wenn man einen Flüssigkeitstrog mit Planwand fest aufstellen kann, in welchem die Objektplatte mit dem Teilkreise drehbar ist.

2. Auf eine sehr dünne gröfsere planparallele Platte in einem Flüssigkeitstrog mit zwei parallelen ebenen Wänden läßt man paralleles Licht vom Spalt (39, 1) senkrecht zur einen Wand einfallen und visirt mit dem Fernrohr durch den Körper nach dem Spalt. Diejenigen beiden schrägen Stellungen des Körpers, in denen das Spaltbild plötzlich (bei Anwendung homogenen Lichtes) verschwindet, liegen um  $2\Phi$  auseinander. Bringt man zwischen den Trog und das Fernrohr noch ein Prisma, am bequemsten ein geradsichtiges, und beleuchtet den Spalt mit Sonnenlicht, so erscheint ein Fraunhofer'sches Spektrum (S. 179). Durch Drehung der Objektplatte kann man die Grenze der totalen Reflexion auf irgend eine Linie einstellen. Das Brechungsverhältnis der Flüssigkeit gegen Luft kann ebenso mittels einer dünnen Luftschicht in einem Glaskästchen mit planparallelen Wänden bestimmt werden. Für die Rechnung gelten die Formeln aus II.

Terquem und Trannin, Pogg. Ann. 157, 302. 1876. E. Wiedemann, ib. 158, 375.

#### 40a. Bestimmung kleiner Änderungen des Brechungsverhältnisses mit dem Interferentialrefraktor (Jamin).

Zwei gleiche, dicke (z. B. 3 cm), planparallele, am besten rückseitig versilberte Glasplatten stehen sich parallel gegenüber, mit der Verbindungslinie ihrer Mitten einen Winkel von  $45-50^\circ$  bildend. Ein auf I fallender Lichtstrahl liefert durch Reflexion an der Vorder- und Hinterfläche zwei Strahlen. Durch Reflexion an II liefert jeder Strahl wieder zwei Strahlen, von denen die beiden gezeichneten mit einander austreten und, sobald die Platten etwas verdreht werden, ein System von Interferenzstreifen erzeugen.



In den Weg der beiden Strahlen zwischen den Platten mögen zwei optisch gleiche Körper geschoben sein. Nimmt man nun an dem Wege des einen Strahles Änderungen vor, etwa bezüglich Temperatur, Druck, Konzentration etc., während man die Streifen im Auge behält, so wandern dieselben. Aus ihrer Verschiebung, der Länge der eingeschalteten Körper und der Wellenlänge des Lichtes läßt sich die der Zustandsänderung entsprechende Änderung des Brechungsindex bestimmen (II).

##### I. Aufstellung des Apparates.

Die beiden Platten sind auf einer horizontalen Ebene sehr fest aufgestellt, entweder gemeinsam auf schwerem Stativ montiert, oder, um größeren Raum zu bieten, getrennt auf besonderen Stativen.

Wird eine Natriumflamme, am besten in schwarzem Cylinder mit Fenster, etwa 50 cm vor der ersten Platte aufgestellt, so erblickt man, etwa auf unendlich akkommodierend, durch die zweite Platte die Streifen gleich oder nach kleinen Drehungen der Platte um eine Vertikal- und eine Horizontalaxe. Man dreht, bis die Streifen scharf, parallel und gerade erscheinen; auf ihre Richtung kommt es häufig nicht an. Meist wird man jedoch die vertikale oder horizontale (cf. S. 189 u. 190) Richtung vorziehen.

Zum Beobachten dient am besten ein festes Fernrohr mit einer spaltförmigen Blende vor dem Objektiv, die Spaltichtung senkrecht zu den Streifen. Sollen Bruchteile der Streifenbreiten gemessen werden (es kann dazu auch ein Kompensator dienen, siehe am Schluss), so ist ein Okularmikrometer zweckmäßig. Zu viele Streifen im Gesichtsfeld veranlassen leicht Irrtümer beim Zählen; eventuell blende man einige ab.

Nach Einführung der Versuchsröhren etc. zwischen die Platten und eventuell Abblenden der beiden äußeren Bilder werden Streifenrichtung, Streifenabstand und Fernrohr endgiltig eingestellt.

Ist Beobachtung mit weißem Licht nötig (III), so bewirkt man zunächst mit Natriumlicht horizontale (cf. S. 190) Streifen von größerem Abstand. Mit weißem Licht (durch Schließen des Zuges am Brenner) wird man dann durch sehr langsames Drehen der zweiten Platte um ihre Vertikalaxe farbige Streifen ins Gesichtsfeld bringen. Der in ihrer Mitte liegende farblose Streifen wird mitten ins Gesichtsfeld gebracht und das Fernrohr dann auf größte Deutlichkeit eingestellt.

Unter Umständen wird eine Anordnung mit parallelem weißem Licht (Sonne) vorzuziehen sein (Quincke, Pogg. Ann. 132, 50. 1867). Die unvermeidlichen Erwärmungen des Apparates und die Temperaturschwankungen des Beobachtungsraums bewirken aber leicht ein störendes Wandern der Streifen.

Ein Trog mit Alaunlösung vor der Lichtquelle und Abkürzung der Beleuchtungszeit ist auch bei schwachen Lichtquellen anzuraten.

## II. Messung bei stetiger Zustandsänderung.

Läßt sich die Änderung eines Körpers so kontinuierlich und überall gleichmäßig vornehmen, daß man dabei den Gang der Streifen verfolgen kann, wie z. B. bei Druckänderung in einer Flüssigkeit, der Verdünnung eines Gases u. dgl.: so zählt man einfach, um wieviele Streifenbreiten und Bruchteile derselben sich das mit homogenem Licht (Na) erzeugte Streifen-system im Fernrohre verschiebt. Ist dann

$L$  die Länge der durchstrahlten Schicht,

$\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes (Tab. 19a),

$s$  die Anzahl der gewanderten Streifenbreiten,  
 $n_1$  und  $n_0$  der Brechungsexponent nach und vor der Änderung,  
 so ist

$$n_1 - n_0 = s\lambda/L.$$

Denn wenn  $\lambda_0 = \lambda/n_0$  und  $\lambda_1 = \lambda/n_1$  die Wellenlängen in dem ursprünglichen und dem abgeänderten Mittel, so ist offenbar

$$s = L/\lambda_1 - L/\lambda_0 = (n_1 - n_0)L/\lambda.$$

### III. Messung bei un stetiger Zustandsänderung.

Die Verschiebung der Streifen kann nicht immer zählend verfolgt werden (z. B. beim Auflösen eines Salzes bez. Ersetzen einer Lösung durch eine andere). Dann schlägt man folgenden Weg ein.

Man nimmt weißes Licht. Die (horizontalen) farbigen Streifen liefern durch ihr verschiedenes Aussehen das Mittel, den im Natriumlicht nicht unterscheidbaren Streifen eine Nummerierung von einer dem farblosen Streifen (I) benachbarten schwarzen Franse an zu geben. Die durch die Zustandsänderung eingetretene Verschiebung dieses Nullpunktes wird gefunden, indem man bei einfarbigem Licht die zweite Platte um ihre Vertikalaxe, die Streifenverschiebung abzählend, so weit dreht, bis wieder im weißen Licht der Nullpunktstreifen entsteht. Dies gibt bis auf eine Korrektur die Anzahl der infolge der Änderung des Körpers gewanderten einfarbigen Streifen, aus welcher die Änderung des Brechungsexponenten wie unter II bestimmt wird.

Nur horizontale Streifen können im weißen Licht erscheinen. Der Gangunterschied  $\varphi$  zweier interferirender Strahlen im Refraktor ist nämlich (Verdet-Exner l. c. am Schlufs)  $\varphi = 2nd(\cos b - \cos b')$ , wo  $d$  und  $n$  Dicke und Brechungsexponent der Platten,  $b$  und  $b'$  die Brechungswinkel der Strahlen in der ersten und zweiten Platte sind. Damit  $\varphi = 0$ , muß  $b = b'$  sein, was nur bei vertikaler gegenseitiger Neigung der Platten eintritt.

Die erwähnte Korrektur besteht in der Abänderung der im Vorigen beobachteten Streifenzahl um eine ganze Zahl; sie entspringt aus der Dispersion.

Die Messung findet, wie wir sahen, mittels Kompensation zweier sich entgegenwirkender Gangunterschiede statt, welche nicht für alle Farben gleichzeitig möglich ist, da die beiden entgegenwirkenden „Apparate“ (Refraktor und eingeschalteter Körper) die Phasenunterschiede für verschiedene Farben nicht in demselben Verhältnis einführen. Einen farblosen Streifen bekommt man für denjenigen aus dem Gegeneinanderwirken

der beiden Apparate resultirenden Gangunterschied, der für alle Farben dieselbe Gröfse behält.

Führt z. B. der eine Apparat die Gangunterschiede für Rot und Blau im Verhältnis 7:9,8 ein, der andere im Verhältnis 7:10, so wird bei Einführung von 7,5 bez. 10,5 Wellenlängen mit dem ersten und — 7 bez. — 10 mit dem zweiten Apparat der resultirende Gangunterschied für Rot und Blau = + 0,5 sein. Für die übrigen Farben tritt dann im allgemeinen nahe derselbe Gangunterschied 0,5 auf, so dafs wir einen diesem entsprechenden schwarzen Streif bekommen.

Jener der Achromasie entsprechende Gangunterschied ändert sich mit dem Wachsen des kompensirten Gangunterschiedes. Die farblose Linie wandert also gleichsam auf dem mit Na-Licht erhaltenen kompensirten Streifensystem und durchläuft dabei verschiedene Helligkeiten von Schwarz zu Weifs, die der Helligkeit ihres Ortes im monochromatischen System entsprechen. Fällt sie auf einen dunklen Streifen, so ist das farbige Streifensystem um eine schwarze Linie symmetrisch gruppiert, und wenn sie auf die Mitte eines hellen Streifens fällt, um eine weifse Linie. Der Nullpunkt unserer Streifennumerirung wandert also langsam auf dem System fort.

Vgl. Sirks, Pogg. Ann. 140, 621; 141, 393. 1870. Die Beobachtung dieser Wanderung liefert auch die Dispersionsänderung (s. Hallwachs, Wied. Ann. 47, 396. 1892).

Um die Korrektion zu ermitteln, wird bei einem Hilfsversuch der zu untersuchende Körper in genügend kleinen Intervallen abgeändert, bis die achromatische Linie schwarz erscheint. Dann ändert man weiter ab, bis die farblose Linie das nächste Mal wieder schwarz erscheint. Daraus ergibt sich die Gröfse der Zustandsänderung, bez. der entsprechenden Streifenverschiebung, für welche sich die farblose Linie um eine Streifenbreite in zu beobachtender Richtung verschiebt. Man kann dann, sobald bei einem Versuch die ganze Streifenverschiebung ermittelt ist, immer sagen, welche Nummer einer der dunklen Nachbarstreifen der achromatischen Linie ursprünglich hatte, d. h. wie weit er vom einmal gewählten Nullpunkt absteht.

Bei einer Lösung ist die einer bestimmten Konzentrationsänderung entsprechende Wanderung der farblosen Linie von der vorausgehenden Konzentration ziemlich unabhängig.

Je nachdem sich der Nullpunkt im Sinne der Streifenwanderung verschiebt oder entgegengesetzt, ist die Nummeränderung des zur Einstellung gewählten dunklen Nachbarstreifs

der achromatischen Linie von der gesamten Streifenverschiebung abzuziehen oder zu ihr zu addieren.

Da die Bruchteile der Streifen direkt mit dem Okularmikrometer gemessen werden, so dienen die Beobachtungen mit den Streifen im weißen Licht nur zur Ermittlung der ganzen Anzahl Verschiebungen; die Korrektion beträgt also eine ganze Anzahl Wellenlängen.

Vgl. Siertsema, De Jamin'sche Interferentialrefractor, Proefschrift, Groningen 1890; Hallwachs l. c.

Jamin'scher Kompensator. Dieser läßt sich zur Kompensirung der Gangunterschiede statt der Drehung der zweiten Platte oft vorteilhaft benutzen (s. Quincke l. c. S. 204). Für weißes Licht ist bei der empirischen Graduirung zu beachten, was oben über die Wanderung der farblosen Linie gesagt wurde.

Vgl. noch über die allg. Theorie des Apparates: Verdet-Exner, Wellentheorie d. Lichtes I, 94. 1881; Ketteler, Farbenzerstreuung d. Gase S. 29. 1865; Zehnder, Wied. Ann. 34, 91. 1888; über die Anordnung eines Interferenzrefraktors auch für Dispersion: Borgesius, Wied. Ann. 54, 221. 1895.

#### 40b. Untersuchung optischer Inhomogenität nach der Schlierenmethode (Toepler).

Vor eine breite Flamme oder in das konvergirende Strahlenbündel des durch eine Linse gegangenen Sonnenlichtes wird eine geradlinig (z. B. dreieckig) begrenzte Öffnung gebracht. Von der letzteren wird durch eine gute Linse in der Entfernung von einigen Metern ein reelles Bild entworfen, an dessen Ort man das Auge oder besser das Objektiv eines Fernrohrs bringt. Die Empfindlichkeit wächst mit dem Abstände des Bildes von der Linse.

Der Körper, in welchem optische Ungleichheiten beobachtet werden sollen, befinde sich dicht hinter oder vor der Linse. Auge oder Fernrohr seien auf ihn akkommodirt.

Nun wird mit einer Schneide, welche einer der Begrenzungskanten der erstgenannten Öffnung parallel ist, allmählich das Gesichtsfeld vor dem Fernrohr verdeckt. In der geeigneten Stellung treten alsdann Ungleichheiten der Raumerfüllung, welche wenn auch nur eine Spur einer Änderung der Lichtbrechung bedingen, als erhellte oder verdunkelte Teile („Schlieren“) des Gesichtsfeldes hervor. Um nichts zu übersehen, benutzt man nach einander die verschiedenen Kanten jener Öffnung.

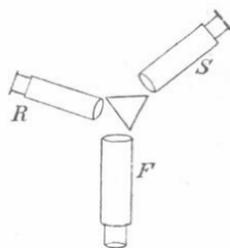
Für manche Zwecke sieht man auch ohne Abbildung bei geeigneter Augenstellung die Schlieren.

Toepler, Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode, Bonn 1864; Pogg. Ann. 131, 35 u. 180. 1867.

#### 41. Spektralanalyse (Bunsen und Kirchhoff).

Der Spektralapparat (Spektroskop) definiert eine Farbe durch eine Skale, auf welcher die durch Brechung zerlegten Teile der Farbe erscheinen. Gradsichtige Spektroskope haben vor einem Spalt ein oder mehrere gradsichtige Prismensysteme und eine Linse oder ein Linsensystem, um den Spalt deutlich erscheinen zu lassen. Die Skale sitzt im Okular. Die brechende Kante der Prismen muß senkrecht zur Skale und parallel dem Spalte verlaufen.

Der gewöhnliche Spektralapparat besitzt, wie das Spektrometer, Fernrohr  $F$  und Spaltrohr  $S$ , außerdem ein Rohr  $R$  mit einer Mikrometerskale. Das Bild der Skale wird in der dem Fernrohre zugewandten Prismenfläche gespiegelt.



##### I. Einstellung des Spektralapparates.

Es ist auch die angegebene Reihenfolge der Operationen einzuhalten.

1. Der Spalt soll einem fernen Objekt entsprechen und deutlich erscheinen. Wenn die richtige Stellung des Spaltrohrs gegeben ist, so hat man nur das Fernrohr auf ein deutliches Bild des Spaltes einzustellen; sonst stelle man erst das Fernrohr auf ein fernes Objekt ein, richte es dann auf den Spalt und verschiebe diesen so, daß er deutlich erscheint.

2. Das Prisma soll die Minimumstellung erhalten. Man beleuchtet den Spalt mit der Natronflamme, stellt das Prisma in nahezu richtiger Stellung vor die Spaltlinse, orientiert sich mit bloßem Auge ungefähr über die Richtung des austretenden Strahles und sucht das Bild des Spaltes mit dem Fernrohre. Nun dreht man das Prisma (indem man wenn nötig mit dem Fernrohre folgt), bis das Spaltbild im Fernrohr umkehrt, und stellt in dieser Lage das Prisma fest.

3. Das reflektirte Bild der Skale soll deutlich erscheinen. Die Skale wird durch eine nicht zu nahe (20 cm) aufgestellte schmale, kleine Flamme erleuchtet. Nachdem durch Drehen des Skalenrohres das Bild im Fernrohr gefunden ist, zieht man das Skalenrohr heraus, bis die Skale deutlich erscheint. Spalt und Skalenteile im Fernrohr dürfen sich bei dem Bewegen des Auges vor dem Okulare nicht gegen einander verschieben.

4. Ein bestimmter Skalenteil, bei den den Zeichnungen von Bunsen und Kirchhoff angepaßten Skalen der Teil 50, soll mit der Natriumlinie zusammenfallen. Man dreht das Skalenrohr, bis diese Stellung erreicht ist, und stellt es fest.

## II. Auswertung der Skale.

Um zu wissen, welchen Punkten der Skale die den einzelnen chemischen Elementen angehörigen Linien entsprechen, genügt es, die Flammen der Stoffe einzeln zu beobachten und die Skalenteile der Linien (nebst Angabe ihrer ungefähren Helligkeit, Breite, Farbe und ihrer Schärfe) zu notiren. Bequemer ist die Anwendung der nach Bunsen-Kirchhoff's Skale veröffentlichten Abbildungen oder der auf dieselbe Skale bezogenen Tab. 19 und 19a, auf welche man die Skale des Apparates folgendermaßen reducirt.

Man beobachtet auf der Skale einige bekannte Linien an den Enden und in der Mitte des Spektrums (Sonne *a, D, F, G, H*; oder  $K\alpha$ ,  $Li\alpha$ ,  $Na$ ,  $Sr\delta$ ,  $K\beta$ ; Fig. S. 179), trägt auf karrirtes Papier die beobachteten Skalenteile als Abscissen, die entsprechenden der B.-K.'schen Skale als Ordinaten auf und verbindet die entstandenen Punkte durch eine Kurve. Selten wird diese erheblich von einer Geraden abweichen. Aus der Zeichnung findet sich dann zu einem beliebigen beobachteten Skalenteil der entsprechende der B.-K.'schen Skale als Ordinate. Wenn die Skale des Apparates der B.-K.'schen nahe kommt, was oft der Fall ist, so stellt man  $Na$  auf den Strich 50 ein und macht ebenfalls einen Satz von vergleichenden Beobachtungen. Die Kurve zeichnet man dann für die Korrektion der Skale, indem man die Unterschiede gegen die B.-K.'sche Skale als Ordinate graphisch aufträgt.

Mit Hilfe von Tab. 19a kann man auf demselben Wege der Beobachtung und graphischen Darstellung auch eine Kurve oder Tabelle entwerfen, welche die zu den Skalenteilen bei bestimmter Einstellung der Na-Linie gehörenden Wellenlängen ergibt.

Präparate. Angenehmer als das leicht verknisternde oder rasch verdampfende Kochsalz ist geblühte Soda. Reines Lithiumpräparat erhält man leicht aus  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , welches man wegen seiner geringen Löslichkeit mit Wasser ausschütteln kann. Für Kalium ist  $\text{KNO}_3$  sehr rein im Handel. Strontium- und Bariumchlorid werden durch das Ausglühen selbst rein. NaCl und KCl werden, um das Zerknistern zu vermeiden, vor dem Spektralgebrauch erhitzt. — Das Anschmelzen von Perlen ist meist leichter, wenn man das Erhitzen des Platindrahtes von hinten vorschreiten läßt. Die Öse des Platindrahtes soll geschlossen sein.

### III. Analyse.

Die Lichtlinien der in der Bunsen'schen Gasflamme am Platindraht verdampfenden Körper werden auf der Skale beobachtet und die Körper aus dem Zusammenfallen dieser Linien mit den Linien bekannter Stoffe erkannt. Dabei ist folgendes zu beachten. Man notire nicht nur die Lage, sondern auch die ungefähre Stärke, Breite und Schärfe der beobachteten Linien. Z. B. fallen  $\text{Sr}\beta$  und  $\text{Li}\alpha$  der Lage nach zusammen;  $\text{Sr}\beta$  aber ist verwaschen,  $\text{Li}\alpha$  ganz scharf. Graphisch kann man die Streifen übersichtlich darstellen, indem man überall die Lichtstärke an irgend einem Punkt der Skale als Ordinate über diesem Punkte auffaßt und so die Kurven für die Spektren zeichnet (Bunsen).

Bezüglich der Unterscheidung der alkalischen Erden beachte man vorzugsweise die (lichtschwachen) charakteristischen blauen Linien von Strontium und Calcium.

Immer wird die Perle in den Saum der Flamme gebracht, der glühende feste Teil so tief, daß er kein störendes kontinuierliches Spektrum gibt. Es ist anzuraten, daß man einmal mit engem Spalte beobachte, um dicht neben einander liegende Linien zu unterscheiden, und dann mit weiterem Spalte zur Auffindung lichtschwacher Linien; desgleichen einmal mit kleiner

Gasflamme für die leicht verflüchtigten Stoffe (K, Li), das andere Mal mit großer Flamme für schwer flüchtige (Sr, Ba, Ca). Die Spektren der letzteren treten oft erst nach längerer Zeit deutlich hervor. Das Schwächerwerden eines Spektrums bei längerer Dauer des Versuchs hat häufig seinen Grund darin, daß die Chlorverbindungen durch das Glühen in die schwerer flüchtigen Oxyde verwandelt werden. Dann läßt sich momentan die Lichtstärke steigern durch Anfeuchten der Perle am Platindraht mit reiner Salzsäure. Verbindungen wie etwa die Sulfate der alkalischen Erden, die an sich kaum flüchtig, durch Salzsäure nicht verwandelt werden, glüht man vor dem Befeuchten mit Salzsäure in dem unteren, reduzierenden Teil der Flamme.

Reinigung des Platindrahtes. Am wirksamsten ist wiederholtes Eintauchen in Salzsäure und reines Wasser und andauerndes Ausglühen in der Spitze der Flamme, auch vor dem Lötrohr oder in der Gebläselampe.

Falsches Licht blendet man ab: durch einen schwarzen Schirm hinter der Gasflamme, durch eine Kapsel über dem Prisma, welche den Weg nach den drei Rohren frei läßt, endlich durch eine auf das Fernrohr gehängte Blende aus dunklem Papier, welche zugleich das Schließen des anderen Auges überflüssig macht. Die Skala selbst wird nicht stärker beleuchtet, als zum Erkennen von Teilung und Ziffern notwendig ist! Im Interesse sehr lichtschwacher Linien mag man das Licht der Skala vorübergehend ganz abblenden.

Die Bunsen'sche Gasflamme selbst gibt, vorzüglich im unteren Teile, eine Anzahl schwacher, besonders grüner und blauer Linien. Um Irrtümer zu vermeiden, mag man sie vorher beobachten und die stärksten notiren. Den unteren Teil der Flamme benutze man überhaupt nicht zur Beobachtung. Die Natriumlinie sieht man in den meisten Präparaten; ja die Luft enthält häufig so viel Natrium, daß die Reaktion schon in der freien Flamme hervortritt.

Ultraviolettes Spektrum. Dieses untersucht man mit dem fluorescirenden Okular (S. 180) oder durch Projektion auf einen fluorescirenden Schirm oder durch Photographie. Soll kein Licht absorbiert werden, so sind Quarz- oder Flußspat- anstatt Glas-Präparate anzuwenden. S. auch Reflexionsgitter.

Absorptionsspektren. Von Bedeutung kann auch die Spektralanalyse weissen Lichtes sein, welches durch farbige Körper, insbesondere Lösungen, hindurchgegangen ist. Scharfe Linien treten hier selten auf. Über die Messung der Lichtstärke im Spektrum siehe 47a, III.

Vergleichung zweier Spektren. Mit einem Reflexionsprisma, welches den halben Spalt bedeckt, kann man zwei Spektren über einander entwerfen. Auch kann man dieselben abwechselnd erzeugen und die gegenseitige Lage der Linien mit einem Fadennikrometer im Okular bestimmen. Sonnenspektrum bez. Eisenspektrum sind als Normalspektren geeignet.

Genau untersucht von Kayser u. Runge, Abh. d. Berl. Akad. 1890 Rowland, Astronomy and Astrophysics 12, 231. 1893.

Mehrere Prismen (Kirchhoff, Angström). Man dreht dieselben, mit dem ersten anfangend, jedes in die Stellung der Minimalablenkung (S. 193) und achtet darauf, dass kein Licht vorbei geht.

Rowland'sches Reflexionsgitter. Über die Anordnung s. 37d. Das Fernrohr umfasst hier und im vorigen gleichzeitig nur einen Teil des Spektrums. Über die Auswertung der Wellenlängen der Linien s. 42.

Photographie des Spektrums. Über empfindliche Platten für die verschiedenen Farben vgl. Vogel, d. Photogr. farbiger Gegenstände, Berlin 1888. Aufnahmen im äussersten Ultraviolett verlangen luftfreie Spektralapparate und Platten ohne Gelatine; Schumann, Wien. Ber. 102, 415 u. 625. 1893; Beibl. 1894, 187. Über Photographiren mit dem Rowland'schen Gitter s. Kayser, Spektralanalyse in Winkelmann's Handbuch.

Im Ultrarot kann man photographiren, indem man eine Platte mit Balmain'scher Leuchtfarbe anstrahlen lässt, die vorher zu schwachem Leuchten angeregt worden ist. Die ultraroten Strahlen schwächen das Leuchten ab. Dann legt man die Platte auf eine gewöhnliche Bromsilberplatte, auf welcher das Spektrum sich reproducirt. Lommel, Wied. Ann. 40, 681. 1890.

## 42. Wellenlänge eines Lichtstrahles.

### I. Aus dem Ablenkungswinkel durch ein Beugungsgitter (Fraunhofer).

Auf den Tisch des Spektrometers (39) kommt eine Glasplatte mit feiner Gitterteilung (Nobert'sches Gitter), die Teilstriche dem Spalte parallel, die Platte senkrecht zum Spaltrohr,

die geteilte Fläche dem Fernrohr zugewandt. Fernrohr und Spaltrohr werden zuvor auf unendlich eingestellt (39, 1). Homogenes Licht vorausgesetzt, wird bei passender Stellung des Fernrohrs dann außer dem mittleren hellen Bild des Spaltes ein erstes, zweites u. s. w. abgelenktes schwächeres Bild auf jeder Seite beobachtet. Ist  $l$  die Gitterkonstante, d. h. die Länge des Skalenteiles auf der Glasplatte, bedeuten  $\delta_1 \delta_2 \delta_3 \dots$  die Ablenkungswinkel der Bilder gegen das mittelste Bild, so ist die Wellenlänge der Lichtsorte

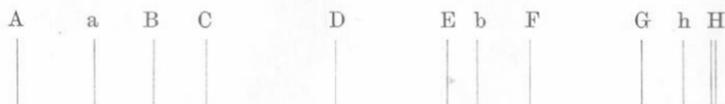
$$1) \quad \lambda = l \sin \delta_1 = \frac{1}{2} l \sin \delta_2 = \frac{1}{3} l \sin \delta_3 \text{ u. s. w.}$$

Denn in jeder von diesen Richtungen unterscheiden sich die Wege von den einzelnen Gitteröffnungen zum Fernrohr um ganze Vielfache einer Wellenlänge von einander. Die Lichterschütterungen, welche das (auf Parallelstrahlen eingestellte) Fernrohr treffen, sind also in gleichem Schwingungszustande und summieren sich zu einem Bilde. Jede andere Richtung enthält gebeugtes Licht in unregelmäßigen Abständen von den Öffnungen und deswegen in den verschiedensten Schwingungszuständen, die sich bei der Vereinigung durch das Fernrohr gegenseitig vernichten.

Die genau senkrechte Stellung der Gitterplatte ist dadurch charakterisiert, daß zusammengehörige Seitenbilder bei dieser Stellung den kleinsten Abstand haben.

Als Längeneinheit für Lichtwellen pflegt man  $\mu\mu = 10^{-6}$  mm oder auch  $10^{-7}$  mm („Angström-Einheit“) zu wählen.

Beugungsspektrum. Nicht homogenes Licht wird durch das Gitter in Spektra zerlegt, in denen nach obigen Formeln das Licht von größerer Wellenlänge (rot) am stärksten abgelenkt erscheint. Bei Sonnenlicht, in welchem zur Definition und Einstellung der Farbe die Fraunhofer'schen Linien geeignet



sind, ist das erste Spektrum und der größte Teil des zweiten rein; von da an greifen die Spektra übereinander. Im Beugungs- oder „Normalspektrum“ (Fig.) ist das Licht anders verteilt als im Dispersionsspektrum (S. 179), in welchem der brechbarere Teil weiter ausgedehnt erscheint.

## II. Aus der Koincidenz zweier Wellenlängen in den Gitterspektren verschiedener Ordnung.

Sind in den Spektren  $m$ ter bez.  $n$ ter Ordnung die Wellenlängen  $\lambda_m$  bez.  $\lambda_n$  gleich abgelenkt, so ist nach den Gleichungen 1)  $m \cdot \lambda_m = n \cdot \lambda_n$  also

$$\lambda_m : \lambda_n = n : m.$$

Die Ordnungszahlen  $m$  und  $n$  sind ganze Zahlen, lassen sich also, falls sie nicht bekannt sind, aus einer genäherten Kenntnis von  $\lambda_m$  und  $\lambda_n$  ableiten. Zu dem Zweck mißt man nach Abblenden des übrigen Spektrums die Ablenkungen der beiden Lichter durch ein Prisma von bekannter Dispersion.

So kann man durch verschiedene Kombinationen die Wellenlängen, auch im Ultraviolett und Ultrarot (S. 196, 197), auf wenige genau gemessene (Tab. 19a) zurückführen. Kleine Unterschiede in den Ablenkungen werden mikrometrisch subjektiv oder in photographischen Aufnahmen gemessen.

Langley, Wied. Ann. 22, 598. 1884.

## III. Durch Talbot'sche Streifen im Spektrum.

Die Pupille wird vor einem Spektralapparat von der Seite des Violett her zur Hälfte mit einem dünnen Blättchen von der Dicke  $d$  (0,2 mm etwa) bedeckt. Dadurch entstehen Streifen, deren größte Dunkelheit an den Orten liegt, wo der Gangunterschied der durch die Luft und das Blättchen gegangenen Wellen ein ungerades Vielfaches von  $\frac{1}{2}$  beträgt.

Dicke und Brechungsverhältnis der Platte für eine Farbe (z. B. Fraunhofer'sche Linie) von der Wellenlänge  $\lambda$  seien  $d$  und  $n$ . Dann ist die Wellenlänge in der Platte  $= \lambda/n$  und der obige Gangunterschied  $= (n-1)d/\lambda$ . Für eine kleinere Wellenlänge  $\lambda'$  gelte  $n'$ , also der Gangunterschied  $(n'-1)d/\lambda'$ . Die Anzahl  $p$  der Streifenbreiten zwischen den beiden Farben ist gleich der Differenz der beiderseitigen Gangunterschiede  $p = d[(n'-1)/\lambda' - (n-1)/\lambda]$ . Sind  $d, \lambda, n$  und  $n'$  (40) bekannt, so kommt hieraus

$$\lambda' = \frac{n'-1}{p/d + (n-1)/\lambda}.$$

Ebenso läßt sich, wenn  $\lambda, n, \lambda'$  und  $n'$  bekannt sind (Tab. 19a), die Dicke  $d$  ermitteln. Ist dies z. B. im sichtbaren

Spektrum geschehen, so lassen sich nachher Wellenlängen im Ultrarot oder Ultraviolett bestimmen.

Esselbach, Pogg. Ann. 98, 513. 1856, nach Helmholtz.

#### IV. Durch Umkehrung der Fizeau'schen Methode für Ausdehnungskoeffizienten.

Mittels zweier nahe paralleler Oberflächen zweier Glasplatten sei ein System von Interferenzstreifen bewirkt. Man verschiebt die eine Platte senkrecht zu sich selbst um eine gemessene Strecke  $a$ . Wenn dadurch die Streifen um  $k$  Streifenbreiten wandern, so ist

$$\lambda = 2a/k.$$

Michelson, Journ. de phys. (3) 3, p. 5. 1894.

#### V. Aus Newton'schen Ringen.

Eine Kugelfläche vom großen Krümmungshalbmesser  $r$  (43) liege auf einer Planplatte. Der  $p$ te, bei senkrechter Ansicht beobachtete Ring habe den Halbmesser  $a_1$ , der  $(p+k)$ te den Halbmesser  $a_2$ . Dann ist die Wellenlänge des betreffenden Lichtes

$$\lambda = (a_2^2 - a_1^2)/(kr).$$

Diese Formel kann man, wenn  $\lambda$  bekannt ist (589,3  $\mu\mu$  für Na), auch benutzen, um den Halbmesser  $r$  zu bestimmen.

### 43. Messung eines Krümmungshalbmessers.

#### I. Mit dem Sphärometer.

Das Sphärometer (18, 7) wird zuerst auf einer als eben bekannten (39, 8) Fläche und dann auf der zu messenden Fläche eingestellt. Die Stellungen der mittelsten Spitze bei beiden Versuchen unterscheiden sich von einander um eine Höhe  $h$ .

Es sei ferner  $l$  die Seite des gleichseitigen Dreiecks, welches die drei festen Spitzen als Eckpunkte hat. Man mißt  $l$  am einfachsten, indem man die Sphärometerspitzen auf Papier abdrückt. Unterscheiden die drei Seiten sich um ein wenig, so darf man den Mittelwert einsetzen. Der gesuchte Krümmungshalbmesser  $R$  ist

$$R = \frac{1}{6} l^2/h + \frac{1}{2} h.$$

Denn wenn  $H$  die Höhe in dem von den Seiten  $l$  gebildeten Dreiecke, so ist  $2Rh = \frac{1}{3} H^2 + h^2$ . Da ferner  $H^2 = \frac{3}{4} l^2$ , so folgt obiger Ausdruck.

Neuere Sphärometer haben anstatt der Meßschraube einen Maßstab, an welchem die Verschiebungen der Spitze abgelesen werden; außerdem anstatt der drei Basisspitzen einen Kreis mit scharfer Kante vom Radius  $r$ . Dann ist

$$R = \frac{1}{2}(r^2/h + h).$$

Bamberg, Z. S. f. Instr. 1887, 297; Abbe, ib. 1892, 307.

## II. Durch Spiegelung (R. Kohlrausch).

Anwendbar auf spiegelnde, nicht zu schwach gekrümmte, wenn auch kleine Flächen. Zwei kleine Lichter werden in nicht zu kleiner Entfernung  $A$  vor dem Mittelpunkt der aufrecht stehenden Fläche im gegenseitigen Abstände  $L$  aufgestellt und mitten zwischen denselben ein Fernrohr, welches auf die Fläche eingestellt wird. Dicht vor der Fläche parallel mit der Verbindungslinie der Lichter wird ein kleiner, am besten auf Glas geteilter Maßstab angebracht. Die Lichter geben zwei in der Fläche reflektirte Bilder, deren Abstand  $l$  auf dem kleinen Maßstabe mit dem Fernrohre beobachtet wird. Der Krümmungshalbmesser ist

bei einer konvexen,                      bei einer konkaven Fläche

$$r = \frac{2Al}{L-2l}$$

$$r = \frac{2Al}{L+2l}.$$

Je geringer die Krümmung ist, desto größer muß die Entfernung  $A$  im Verhältnis zu  $L$  genommen werden, damit diese Formeln gültig sind. Auch würden in kleiner Entfernung die Bilder nicht mit dem Maßstab gleichzeitig deutlich gesehen werden. Durch Verkleinerung der Öffnung des Fernrohrobjektives vermindert man diesen Übelstand.

Als Lichter sind Benzinflämmchen zweckmäßig. Mit geringem Fehler mag man auch die Ränder eines Fensters nehmen, vor welchem man das Fernrohr aufstellt.

Genauer und bequemer ist anstatt Maßstab und Fernrohr das Helmholtz'sche Ophthalmometer (18b).

Bei der Bestimmung von Linsen entstehen auch Bilder von der Hinterfläche. Bei Bikonkav- oder Bikonvexlinsen sieht man leicht an der aufrechten oder verkehrten Lage der Bilder, welche die richtigen sind. Durch Schwärzen der hinteren Fläche fallen die falschen Bilder fort.

Beweis für eine konvexe Fläche. Der Abstand  $a$  des hinter der Kugelfläche entstehenden subjektiven Bildes der Verbindungslinie  $L$  der Lichter von der Fläche ist gegeben durch  $1/a = 1/A + 2/r$ , woraus  $a = Ar/(2A + r)$ . Andererseits ist offenbar die Länge  $\lambda$  jenes Bildes gegeben durch  $\lambda:L = a:A$ , also  $\lambda = La/A$ .

Das Bild  $\lambda$  erscheint auf den Maßstab projicirt mit der Länge  $l = \lambda A/(A + a) = La/(A + a)$ , woraus durch Einsetzen obigen Wertes von  $a$  wird  $l = \frac{1}{2} rL/(A + r)$ , oder  $r = 2Al/(L - 2l)$ . Analog für Hohlflächen.

### III. Schwach gekrümmte Flächen.

Ein Fernrohr wird so eingestellt, daß ein Gegenstand (etwa eine Teilung), der sich im Abstände  $A$  vor dem Objektiv befindet, deutlich erscheint. Mit dem so eingestellten Fernrohr werde in dem zu untersuchenden Spiegel das Bild eines Objectes deutlich gesehen, wenn der Abstand des letzteren vom Spiegel  $= a$ , derjenige des Objectives vom Spiegel  $= e$  ist. Dann findet man den Krümmungshalbmesser

$$r = 2a \frac{A - e}{A - e - a}.$$

$e$  mag etwa  $= \frac{1}{2}A$  gewählt werden.

Positives  $r$  bedeutet Hohlspiegel, negatives  $r$  Konvexspiegel.

Zur Erkennung des Deutlichsehens dient die Abwesenheit der Parallaxe des Bildes gegen das Fadenkreuz des Fernrohrs.

Vgl. auch die Methode 42 V mit Newton'schen Ringen.

### IV. Aus der Brennweite.

Mit geringen Abänderungen läßt sich nach 44, 1 und 3—6 die Brennweite eines konkaven, nach 44, 9 diejenige eines Konvexspiegels ermitteln. Der Krümmungshalbmesser ist gleich der doppelten Brennweite.

### V. Prüfung von Planflächen.

Vgl. das Verfahren 39, 8. Ferner kann man z. B. ein auf sehr große Entfernung eingestelltes Fernrohr benutzen, mit welchem man das Spiegelbild eines ebenso weiten Objectes in der Fläche betrachtet, wenn diese nahe vor das Objektiv gehalten wird. Das Bild darf keine Parallaxe gegen das Fadenkreuz zeigen. Ein geübtes Auge kann diese Untersuchung auch unbewaffnet mit ziemlicher Schärfe ausführen.

Einen kleinen Planspiegel prüft man am einfachsten, indem man mit ihm ein Spiegelbild der Sonne auf eine ferne Wand wirft. Dasselbe muß rund sein und den scheinbaren Durchmesser der Sonne zeigen. Die Prüfung ist sehr empfindlich.

Besitzt man endlich bereits ein Planglas, so lege man dasselbe auf die zu prüfende Fläche und beleuchte mit Natriumlicht. Die entstehenden Interferenzstreifen müssen geradlinig und parallel verlaufen.

#### 44. Brennweite.

Brennpunkt einer Linse ist der Punkt, in welchem zur Axe der Linse parallel einfallende Strahlen nach dem Austritt sich schneiden. Der Abstand des Brennpunktes von der Linse, streng genommen von der zugehörigen Hauptebene der Linse (s. unten), ist die Brennweite. Bei Zerstreungslinsen gibt man der Brennweite das negative Vorzeichen. Nummer einer Brille nennt man ihre Brennweite, in der Regel in Pariser Zollen ausgedrückt.

Die Stärke einer Linse wird durch die reciproke Brennweite bestimmt; von einer Linse oder einer Linsenkombination, welche die Brennweite  $f$  Meter besitzt, sagt man, sie habe eine Stärke von  $1/f$  Dioptrien. Die Stärke eines Systems von hintereinander gesetzten Linsen ist gleich der Summe (Vorzeichen!) der einzelnen Stärken, wenn die Dicke des Systems klein ist gegen die Brennweiten.

Die beiden Krümmungshalbmesser  $r$  und  $r'$  einer Linse, ihre Brennweite  $f$  und das Brechungsverhältnis  $n$  der Glassorte stehen in der Beziehung:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \text{ oder } n = \frac{1}{f} \frac{rr'}{r+r'} + 1.$$

Ist eine Fläche konkav, so wird ihr Krümmungshalbmesser mit negativem Vorzeichen eingesetzt.

Die Brennweite ist für verschiedene Farben verschieden, muß daher streng genommen auf eine bestimmte Farbe (Sodaflamme, rotes Glas) bezogen werden. Ferner haben bei gewöhnlichen Linsen die äußeren Ringe kleinere Brennweiten als die inneren Teile, so daß, wenn man die ganzen Linsen untersucht, unscharfe Bilder entstehen.

Centrirung. Bei allen Versuchen werde die Linsenaxe (die Verbindungslinie der Krümmungsmittelpunkte) in die Richtung vom Objekt nach dem Bilde gebracht, weil andernfalls der Bildabstand zu klein gefunden wird. Die Axenrichtung findet man z. B. mit einer kleinen Flamme in geeignetem Abstände vor der Linse: liegen beide, in der Vorder- und Rückfläche gesehene Spiegelbilder in jeder durch Auge, Flamme und Linsenmittelpunkt gehenden Ebene, so steht die Flamme in der Axe.

1. Mit der Sonne. Die Brennweite einer Sammellinse kann gemessen werden, indem man mit derselben ein Sonnenbild auf einem Stückchen Glas erzeugt und letzteres so stellt, daß das Bild scharf begrenzt ist. Der Abstand des Glases von der Linse ist die Brennweite.

2. Mit dem Fernrohr. Ein Fernrohr wird auf Deutlichkeit eines sehr entfernten Gegenstandes eingestellt. Visirt man darauf mit dem Fernrohr durch die vor sein Objektiv gebrachte Linse nach einem ebenen Objekt (z. B. Papier mit Schrift), so wird dieses bei einem Abstände von der Linse gleich der Brennweite deutlich erscheinen.

3. Aus Gegenstands- und Bildweite. Im Abstände  $a$  von der Linse stellt man ein Licht oder besser einen Blechschirm mit einem Drahtkreuz in einer Öffnung vor einer Flamme, auf der anderen Seite der Linse einen weißen Schirm in einem solchen Abstände  $b$  auf, daß ein deutliches Bild des Lichtes oder des Kreuzes entsteht. Über Centrirung des Lichtes siehe oben. Wenn  $f$  die Brennweite, so ist  $b = f \cdot a / (a - f)$  oder

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \text{oder} \quad f = \frac{ab}{a+b}.$$

4. Durch Verschiebung (Bessel). Befindet sich ein Gegenstand in einem konstanten größeren Abstände  $l$  von einem Schirm, so gibt es zwei Stellungen einer Linse zwischen beiden, in denen dieselbe ein deutliches Bild entwirft. Die Verschiebung  $e$  zwischen diesen beiden Stellungen, welche sich genauer messen läßt, als Abstände von der Linse, betrage die Länge  $e$ . Dann ist die Brennweite der Linse

$$f = \frac{1}{4}(l - e^2/l).$$

Als Gegenstand kann ein Fadenkreuz dienen und anstatt des Schirmes ein eben solches mit Lupe, wobei das Zusammen-

fallen von Objekt und Bild aus der Abwesenheit der Parallaxe beurteilt wird.

Beweis. Die Abstände des Objektes und des Bildes von der Linse sind bei diesen Versuchen offenbar  $\frac{1}{2}(l+e)$  und  $\frac{1}{2}(l-e)$ . Hieraus folgt  $1/f = 2/(l+e) + 2/(l-e) = 4l/(l^2 - e^2)$ , q. e. d.

5. Aus der Gleichheit von Objekt und Bild. Wenn die GröÙe des Bildes gleich der des Gegenstandes ist, so ist ihr gegenseitiger Abstand gleich der vierfachen Brennweite.

**Über dickere Linsen oder Linsensysteme.** Bis hierher ist angenommen, daß die Dicke der Linse gegen die Brennweite vernachlässigt werden kann. Im anderen Falle hat man die Brennweite und die Abstände  $a$  und  $b$  von der zugehörigen Hauptebene der Linse oder des Systemes von Linsen zu rechnen. Eine Hauptebene würde durch Konstruktion erhalten werden, wenn man von einem mit der Axe parallel einfallenden Strahl die Stücke vor dem Eintritt und nach dem Austritt verlängert, bis sie sich schneiden, und durch den Schnittpunkt eine zur Axe der Linse senkrechte Ebene legt. Der Schnittpunkt der Hauptebene mit der Axe heißt Hauptpunkt. Eine Linse oder ein Linsensystem hat zwei Hauptpunkte, zu denen, wenn beiderseitig sich dasselbe Mittel befindet, die Brennpunkte symmetrisch liegen, so daß es nur eine Brennweite gibt. Bei Linsen aus gewöhnlichem Glase ( $n=1,5$ ), deren Krümmungshalbmesser groß gegen die Dicke  $d$  sind, liegen die beiden Hauptpunkte im Abstände  $\frac{1}{3}d$  von einander, und zwar, wenn beide Oberflächen gleich konkav oder gleich konvex sind, je um  $\frac{1}{3}d$  von den Oberflächen entfernt. Eine plankonvexe oder plankonkave Linse hat ihren einen Hauptpunkt in der gekrümmten Fläche, der andere liegt von da um  $\frac{1}{3}d$  nach innen.

Die folgenden Methoden geben die richtigen Brennweiten von Linsen oder von Systemen, von den zugehörigen Hauptpunkten gerechnet.

6. Aus der GröÙe stark vergrößelter oder verkleinerter Bilder. Man stelle um ein Weniges außerhalb des Brennpunktes einen hell beleuchteten Maßstab auf, am besten von Glas mit durchfallendem Licht. Gegenüber, auf der anderen Seite der Linse, wird ein weißer Schirm in einem solchen Abstände von der Linse aufgestellt, daß auf ihm das stark vergrößerte Bild der Teilung deutlich erscheint. Ist  $l$  die Länge eines Skalenteiles,  $L$  die Länge seines Bildes,  $A$  der Abstand des Schirmes von der Linse, so ist die Brennweite  $f$

$$f = A \frac{l}{L+l}.$$

Umgekehrt kann man einen scharf begrenzten Gegenstand in grösserer Entfernung von der Linse aufstellen und das von ihm auf der anderen Seite der Linse entworfene, nun stark verkleinerte Bild messen. Zu diesem Zwecke dient ein Mikrometer auf Glas mit vorgesetzter Lupe, welches so gestellt wird, daß Mikrometerteile und Bild des Gegenstandes durch die Lupe deutlich gesehen werden. In obiger Formel ist dann  $l$  die Länge des Bildes,  $L$  die des Gegenstandes,  $A$  des letzteren Abstand von der Linse.

Beweis. Die Abstände  $A$  und  $a$  des Bildes und des Gegenstandes von den zugehörigen Hauptebenen der Linse hängen durch die Formel  $1/A + 1/a = 1/f$  zusammen. Die Größen beider verhalten sich  $L:l = A:a$ . Durch Einsetzen von  $1/a = L/(Al)$  in die erste Gleichung entsteht obiger Ausdruck. Da  $A$  gegen die Dicke der Linse groß ist, so kann man anstatt des Abstandes von der Hauptebene merklich denjenigen von der Linse setzen.

#### 7. Verfahren von Meyerstein.

a) Für Linsen grösserer Brennweite, z. B. Fernrohrobjektive, fixire man auf einer hinreichend langen Holzschiene zwei in mm geteilte kleine durchsichtige Glasskalen in einer gegenseitigen Entfernung  $e$ , welche merklich grösser ist als die vierfache Brennweite. Die geteilten Seiten der Skalen seien einander zugewandt. Man verschiebe die Linse zwischen den Skalen, bis das (verkleinerte) Bild der ersten in die Ebene der zweiten fällt, was man an dem Verschwinden der Parallaxe erkennt, und bestimme mit einer Lupe das Größenerhältnis: Bild: Objekt =  $v$ ; zugleich messe man den Abstand  $l_1$  eines mit der Linse fest verbundenen Punktes — z. B. am Rande der Fassung — von dem Objekte. Nach Umkehrung der Linse wiederhole man die Operationen; aus der Übereinstimmung der beiden  $v$ , aus denen das Mittel genommen wird, kann man auf die Genauigkeit der Einstellungen schließen. Der Abstand des mit der Linse fest verbundenen Punktes vom Objekt sei nun  $l_2$ , so ist die Brennweite

$$f = \frac{l_1 + l_2 - e}{1/v - v}.$$

Beweis. Sind  $a$  und  $b$  die zusammengehörigen Abstände des Objekts und des Bildes von den Hauptpunkten (S. 205), so gilt  $f = ab/(a+b) = (a-b) \cdot ab/(a^2 - b^2)$ . Der Abstand des Objekts vom Mittelpunkt der beiden Hauptpunkte ist offenbar  $= \frac{1}{2}(l_1 + l_2)$ , also  $e - \frac{1}{2}(l_1 + l_2)$

der Abstand des Bildes von demselben Mittelpunkt. Die Differenz dieser beiden Abstände ist aus Symmetriegründen gleich der Differenz  $a - b$ , also  $a - b = l_1 + l_2 - e$ . Andererseits folgt aus  $v = b/a$

$$1/v - v = a/b - b/a = (a^2 - b^2)/ab.$$

b) Bei Fernrohr- und Mikroskop-Okularen, sowie bei Mikroskop-Objektiven ist das Bild zu klein, um wie oben gemessen zu werden; hierzu kommt, daß der Ort des Bildes oft im Innern des Systems liegt.

Man benutzt daher mit Vorteil ein horizontal gelagertes Mikroskop von langer Sehweite mit Okularmikrometer und als Objekt, in etwa  $\frac{1}{2}$  m Entfernung, rechteckige Klötze geeigneter Größe oder farbige Papierscheiben auf weißem Hintergrund.  $v$  folgt sofort aus der Breite des Objektes, der Größe des Bildes und dem Werte eines Skalenteiles.  $l_1$  und  $l_2$  lassen sich leicht direkt abmessen. Um auch  $e$  zu erhalten, bringe man nach Entfernung der Linse eine Nadelspitze in die deutliche Sehweite des Mikroskopes und messe ihre Entfernung vom Objekt.

Vgl. Meyerstein, Wied. Ann. 1, 315. 1877.

8. Verfahren von Abbe. Man bestimme für eine Lage des Objektes die Vergrößerung  $v$  (Bildgröße/Objektgröße), verschiebe das Objekt um eine gemessene Strecke  $\Delta$ , und finde nun die Vergrößerung  $v'$ . Dann ist die Brennweite

$$f = \frac{\Delta}{1/v' - 1/v}.$$

Aus  $v = b/a$  und  $1/f = 1/a + 1/b$  folgt  $a = f(1 + 1/v)$ . Ebenso  
 $a + \Delta = f(1 + 1/v')$ .

Also  $\Delta = f(1/v' - 1/v)$  q. e. d.

Die Hilfsmittel sind die gleichen wie unter 7. Die Methode besitzt den Vorteil, daß eine Bestimmung des Bildortes nicht nötig ist.

Über Abbe's Focometer vgl. Czapski, Z. S. f. Instr. 1892, 185.

9. Zerstreuungslinsen, welche kein objektives Bild geben, werden mit einer stärkeren Sammellinse von bekannter Brennweite  $F'$  verbunden und nun die gemeinschaftliche Brennweite  $F$  beider zusammen nach einer der vorhin angegebenen Methoden gemessen. Dann findet sich die negative Brennweite  $f$  der Konkavlinse allein aus der Formel

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{F'} \quad \text{oder} \quad f = \frac{F \cdot F'}{F' - F}.$$

10. Endlich läßt sich die Brennweite einer Zerstreuungslinse auch dadurch ermitteln, daß man die Größe des Zerstreuungsbildes mißt, welches die Linse von der Sonne auf einem Schirm in gegebenem Abstände entwirft. Bedeutet nämlich  $d$  den Durchmesser der Linsenöffnung,  $D$  den Durchmesser des Zerstreuungsbildes,  $A$  den Abstand des Schirmes von der Linse, so ist die Brennweite

$$f = \frac{Ad}{d - D + 0,0094 \cdot A};$$

0,0094 ist die doppelte Tangente des scheinbaren Halbmessers der Sonne. Bei schärferen, nicht zu kleinen Linsen kann man  $0,0094 \cdot A$  vernachlässigen und hat die einfache Regel: derjenige Abstand des Schirmes, bei welchem das Zerstreuungsbild den doppelten Durchmesser der Linse hat, ist die Brennweite.

11. Brennweite schwacher Linsen. (Vgl. 43 III.) Ein Fernrohr sei auf ein Objekt im Abstände  $A$  vom Objektiv deutlich eingestellt. Man bringt die Linse dicht vor das Objektiv und regulirt den gemeinsamen Abstand vom Objekte so, daß letzteres wieder deutlich erscheint. Dies möge für den Abstand  $A'$  der Fall sein. Dann ist die Brennweite der Linse

$$f = \frac{AA'}{A - A'}.$$

Negative Brennweite bezeichnet eine Zerstreuungslinse.

Das Deutlichsehen wird an der Abwesenheit der Parallaxe des Bildes gegen das Fadenkreuz erkannt.

12. Astigmatische Linsen haben zwei „Brennweiten“ für die beiden auf einander senkrechten Hauptkrümmungen. Man erkennt jedes „Bild“ eines leuchtenden Punktes daran, daß die Abbildung sich zu einer Geraden zusammenzieht, deren Richtung zugleich die eine Hauptkrümmungs-Richtung gibt. — Eine schief gehaltene gewöhnliche Linse wirkt wie eine astigmatische.

## 45. Vergrößerungszahl etc. eines optischen Instrumentes.

### I. Lupe.

Die Vergrößerungszahl einer Lupe wird aus der Brennweite, welche für dickere oder zusammengesetzte Gläser nach Nr. 6, vor. Art., zu bestimmen ist, berechnet. Bezeichnen wir

nämlich durch  $f$  die Brennweite,  $A$  die kleinste deutliche Sehweite des unbewaffneten Auges, so ist die Vergrößerungszahl  $m$  der Lupe

$$m = 1 + A/f.$$

Für das mittlere Auge mag die kleinste deutliche Sehweite gleich 25 cm gesetzt werden.

Beweis. Wird ein kleiner Gegenstand von der Länge  $l$  in einem Abstände  $a$  unter die Lupe gelegt, so daß sein (virtuelles) Bild im Abstände  $A$  erscheint, so ist  $1/a = 1/A + 1/f$ . Das Bild habe die Länge  $L$ , so ist die Vergrößerung  $L/l = A/a = 1 + A/f$ .

## II. Fernrohr.

Vergrößerungszahl heißt das Verhältnis des Winkels, unter welchem ein ferner Gegenstand im Fernrohre erscheint, zu dem Winkel, unter welchem derselbe mit bloßem Auge gesehen wird.

1. Allgemein anwendbar ist folgendes Verfahren. Das Fernrohr wird in einem gegen die eigene Länge großen Abstände vor einem Maßstabe (Papierskale, Ziegeldach, Tapetenmuster) aufgestellt, auf welchem zwei Punkte hinreichend markirt sind, um mit bloßem Auge gesehen zu werden. Das eine Auge sieht durch das Fernrohr hindurch nach dem Maßstabe, das andere neben dem Fernrohr vorbei nach demselben, so daß die mit beiden Augen gesehenen Bilder sich decken. Wenn so die direkt gesehene Länge zwischen den Marken  $n$  Teile des im Fernrohr gesehenen Maßstabes bedeckt, während die wirkliche Länge  $N$  Teile beträgt, so ist die Vergrößerungszahl  $m = N/n$ .

Die Beobachtung wird erleichtert dadurch, daß man das Fernrohr durch Ausziehen des Okulars so stellt, daß die beiden Bilder bei einer Drehung der Augenaxen sich thunlichst wenig gegen einander verschieben. Kurzsichtige Augen müssen natürlich mit der Brille bewaffnet sein.

2. Innerhalb kürzerer Abstände kann man so verfahren (v. Waltenhofen): Man stellt das Fernrohr auf große Entfernung ein, befestigt dann vor seinem Objektiv eine ganz schwache dünne Konvexlinse (Brillenglas von etwa 2 m Brennweite) und stellt das so vorgerichtete Fernrohr vor einem Maßstabe so auf, daß dessen Teile deutlich erscheinen. Man beobachtet wie unter Nr. 1 mit beiden Augen. Decken  $n$  im Fernrohr gesehene

Teile  $N$  mit bloßem Auge gesehene Teile, beträgt der Abstand des Maßstabes vom Objektiv  $a$ , vom Auge  $A$ , so ist die Fernrohrvergrößerung gleich

$$\frac{N a}{n A}.$$

3. Bei Fernrohren mit konvexem Okular läßt sich fast immer folgendes Verfahren anwenden. Nach Einstellung auf unendlich ersetzt man das Objektiv durch eine rechteckige Blende. Durch die noch übrigen Linsen wird dann ein objektives Bild der Blende entworfen, dessen Größe auf einem Glasmaßstäbchen vor dem Okular mit der Lupe gemessen wird. Die wirkliche Größe dividirt durch die Bildgröße gibt die Vergrößerung.

Die Objektivöffnung selbst kann statt der Blende benutzt werden, wenn ihre Randstrahlen nicht etwa durch Diaphragmen abgehalten werden, was häufig der Fall ist. Eine Blende von eckiger Gestalt läßt dies erkennen.

Beweis für das Kepler'sche Fernrohr. Bei der Einstellung auf unendlich ist der Abstand des Objektivs vom Okular gleich der Summe der Brennweiten  $F+f$ . Die Blende gibt demnach ein Bild im Abstände  $b=f(F+f)/F$  (44, 3) vor dem Okular. Also ist  $L/l=(F+f)/b=F/f$ .  $F/f$  aber gibt bekanntlich die Vergrößerung (vgl. Nr. 5).

4. Genauer ist das folgende Verfahren (Gaus's). Ein auf unendlich eingestelltes Fernrohr ergibt bei umgekehrtem Strahlengange eine Verkleinerung gleich der Vergrößerung bei gewöhnlichem Gange. Man mißt mit einem Theodolit die Winkelgröße eines sehr entfernten Objektes: erstens direkt, zweitens durch das verkehrt vor den Theodoliten gestellte Fernrohr hindurch. Der Quotient der beiden Winkel ergibt die astronomische Vergrößerung.

Für einen beschränkten Raum läßt sich die Methode folgendermaßen abändern. Dem Okular des auf unendlich eingestellten Fernrohres gegenüber bringe man in wenigstens 1 m Entfernung einen horizontalen Stab mit zwei (besser mehreren) zur Mitte symmetrischen Marken an. Deren gegenseitiger Abstand sei  $=a$ . In dem vor das Objektiv gesetzten Theodolit mögen diese Marken unter dem Winkel  $\omega$  erscheinen. Der zugehörige Eintrittswinkel  $\varphi$  ergibt sich daraus, daß die Strahlen von den Marken durch die Okularblende des Fernrohres (genauer

den Okularkreis) gehen müssen. Ist  $A$  der Abstand des Stabes von der letzteren, so hat man  $\operatorname{tg} \frac{1}{2} \varphi = \frac{1}{2} a/A$  und die Fernrohrvergrößerung  $= \varphi/\omega$ .

Statt eines Theodoliten kann auch ein Spektrometerfernrohr dienen; noch vorteilhafter ein mikrometrisch bewegliches Ablesefernrohr mit aufgeklebtem Spiegel, auf den man ein Hilfsfernrohr mit Skale richtet.

5. Aus den Brennweiten und Abständen der Gläser läßt die Vergrößerung sich berechnen. Z. B. ist dieselbe für das Kepler'sche und Galilei'sche Fernrohr gleich dem Verhältnis der Objektiv- zur Okularbrennweite. Solche Regeln praktisch zu verwerten, ist aber in den meisten Fällen mühsam; die Brennweite des Galilei'schen Okulars kann nicht direkt bestimmt werden, und die Okulare mit Konvexlinsen sind meist zusammengesetzt. Die oft sehr kleinen Abstände der Okularlinsen genau zu messen bietet Schwierigkeiten, und außerdem würde ohne die Bestimmung der Lage der Hauptpunkte nur ein rohes Resultat aus den Formeln hervorgehen.

6. Gröfse des Gesichtsfeldes. Ist  $l$  der wirkliche Abstand zweier an den Enden eines Durchmesser des Gesichtsfeldes gesehener Punkte von einander,  $a$  ihre Entfernung vom Fernrohr, so ist die Gröfse des Gesichtsfeldes in Bogengraden ausgedrückt  $= 57,3^{\circ} \cdot l/a$ .

Zur Messung dient wieder ein entfernter Maßstab. Wenn man nicht über eine große Entfernung verfügt, so kann man wie bei 2. dem auf unendlich eingestellten Fernrohr eine schwache Sammellinse vorsetzen und den Maßstab in die jetzige deutliche Sehweite rücken.  $a$  ist dann der Abstand des Maßstabes von der Linse.

### III. Mikroskop.

1. Vergrößerungszahl nennt man hier das Verhältnis des Winkels, unter welchem ein kleiner Gegenstand im Mikroskop gesehen wird, zu demjenigen, unter welchem er in der Sehweite 25 cm erscheint.

Die Bestimmung der Vergrößerung entspricht der unter II, 1 angegebenen. Unter das Mikroskop wird ein Gegenstand von bekannter Länge (Mikrometerteilung) gebracht. In 25 cm Abstand unter dem Okular befestigt man einen Maßstab.

Während das eine Auge durch das Mikroskop nach dem Gegenstande sieht, blickt das andere nach dem Maßstab, und nun muß wieder die Projektion des im Mikroskop gesehenen Bildes auf den Maßstab gemessen werden. Bedeckt das Bild  $N$  Teile, während der Gegenstand wirklich die Länge von  $n$  Teilen hat, so ist  $N/n$  die Vergrößerungszahl.

Besser noch kann man über dem Okular einen kleinen Spiegel, dessen Belegung in der Mitte weggenommen ist, unter  $45^\circ$  geneigt anbringen und den Maßstab 25 cm entfernt seitlich von demselben vertikal aufstellen, so daß mit demselben Auge durch das Spiegelglas hindurch das Bild des Gegenstandes im Mikroskop, und im Spiegel reflektirt das Bild des Maßstabes gesehen wird.

Anstatt mit dem Maßstabe zu vergleichen, kann man das Bild des Gegenstandes auch auf eine Fläche in 25 cm Abstand vom Auge abzeichnen (projiciren) und nachher ausmessen.

2. Über Längenmessungen mit dem Mikroskop vgl. 18, 4.

### 3. Öffnungswinkel und numerische Apertur eines Mikroskop-Objektives.

Der Öffnungswinkel ( $2u$ ) ist der Winkel zwischen den äußersten Strahlen, welche von einem deutlich gesehenen Axenpunkt aus durch das Mikroskop treten können. Die Begrenzung des Strahlenkegels erfolgt in der Regel an der Unterfläche des Objektivs.

Es bezeichne  $n$  den Brechungskoeffizienten desjenigen Mediums, aus welchem die Strahlen in das Objektiv übergehen, dann heißt

$$a = n \sin u$$

die numerische Apertur des Objektivs. Bei Trockensystemen ist  $n=1$ , also  $a < 1$ . Bei Immersionssystemen gilt  $n$  für die Flüssigkeit (Wasser, Cedernholzöl, Monobromnaphthalin) und hier kann  $a > 1$  werden.

Von der numerischen Apertur hängt die s. g. auflösende Kraft des Mikroskopes ab, d. h. die Größe der kleinsten durch dasselbe unterscheidbaren Objekte.

Die Striche eines Gitters vom Abstände  $\varepsilon$  werden bei centraler Beleuchtung noch unterschieden, wenn  $\varepsilon \geq \lambda/a$ , bei günstigster schiefer Beleuchtung, wenn  $\varepsilon \geq \frac{1}{2}\lambda/a$ , wo  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes in Luft ist (Abbe).

Nach Lister kann man die numerische Apertur eines Trockensystems bestimmen, indem man vor dem horizontal (im Dunkeln) aufgestellten Mikroskop eine Kerze verschiebt, bis

eine Hälfte des Gesichtsfeldes hell erscheint, und in derselben zur Axe senkrechten Ebene eine zweite Kerze so aufstellt, daß auch die andere Hälfte gerade erhellt wird. Ist der Abstand der Kerzen  $e$ , und die Ebene derselben um  $A$  vom deutlich gesehenen Punkte entfernt, so hat man  $\operatorname{tg} u = e/2A$ .

Aperturen über 1 mißt das stets anwendbare Apertometer von Abbe. Einem flachen Halbcylinder aus Glas (9 cm Durchmesser, 1,2 cm Höhe) ist in der Richtung des Durchmessers ein Reflexionsprisma von  $45^\circ$  angeschliffen, während der Mittelpunkt durch eine kleine Öffnung in einem aufgekitteten versilberten Deckgläschen markiert ist.

Die obere Fläche trägt 2 Teilungen, dem Öffnungswinkel und der Apertur entsprechend; als Indices dienen 2 rechtwinklig gebogene geschwärzte Messingplättchen.

Das Apertometer wird auf den Tisch des Mikroskopes gesetzt und dieses (ev. nach Einfügung der Immersions-Flüssigkeit) zunächst auf Deutlichsehen der kleinen Öffnung eingestellt. Blickt man nach Herausnehmen des Okulars in das Rohr, so sieht man bei schwächeren Objektiven das vom Objektiv entworfene Bildchen der beiden Indices, deren Spitzen man auf den Rand des Gesichtsfeldes einstellt, worauf man an der Teilung abliest.

Bei stärkeren Objektiven wird das Bildchen für Beobachtung mit dem unbewaffneten Auge zu klein. Man benutzt dann ein Hilfsmikroskop, das man bei den Instrumenten von Zeiss durch Einschrauben eines besonderen schwachen Objectives in das untere Ende des Tubusauszugs und Einsetzen eines Okulares herstellt. Bei andern Instrumenten wird man ein geeignetes Objektiv mit einem Kork im Tubus-Auszug anbringen können.

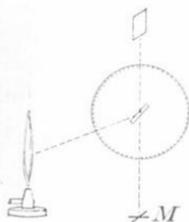
#### 45 a. Polarisationswinkel eines Körpers.

Das von einem Spiegel zurückgeworfene Licht ist bei demjenigen Einfallswinkel vollständig polarisiert, für welchen der einfallende und der zurückgeworfene Strahl auf einander senkrecht stehen. Hieraus folgt, wenn  $\omega$  diesen „Polarisationswinkel“ und  $n$  das Lichtbrechungsverhältnis des Spiegels bedeutet,

$$n = \operatorname{tg} \omega.$$

Ist  $n$  bekannt, so kann  $\omega$  hiernach berechnet werden. Umgekehrt ergibt sich  $n$ , wenn  $\omega$  bekannt ist.

Um  $\omega$  zu messen, beleuchtet man den Spiegel mit einer in der Einfallsebene hinreichend ausgedehnten Lichtquelle, etwa durchscheinendem Papier vor einer Natriumflamme oder, wenn die Einfallsebene vertikal steht, mit einer langen Gasflamme aus einem Spitzbrenner und beobachtet das reflektirte Licht durch einen Nicol, dessen Polarisationsrichtung (größere Diagonale) senkrecht zur Einfallsebene des Lichtes liegt. Bei richtiger Stellung erscheint im Gesichtsfeld ein verwaschener dunkler Streifen; die der Mitte des letzteren entsprechende Visirrichtung bildet mit der Spiegelnormalen den Polarisationswinkel, welchen man z. B. mit dem Goniometer (38. 39) folgendermaßen bestimmen kann. Man läßt den Nicol ruhig stehen und dreht den an der Goniometeraxe befestigten Spiegel von dem einen Minimum der Helligkeit zu dem auf der anderen Seite liegenden, wobei man mit der Lichtquelle folgt. Die Visirrichtung auf die Mitte des dunklen Streifens kann durch eine Marke  $M$  hinter dem Spiegel oder durch das Fernrohr gegeben sein, mit welchem man den Nicol verbindet. Man hat dann um  $2\omega$  gedreht. Die Anordnung mit einem Vertikal-Goniometer s. Fig. Bei der zweiten Einstellung kommt die Flamme rechts zu stehen. An Flüssigkeitsoberflächen bestimmt man  $2\omega$  durch Einstellung einer vertikal drehbaren Visirvorrichtung mit Nicol (Wollaston'sches Goniometer, Theodolit, umgelegtes Spektrometer) auf den dunklen Fleck, indem man die Flüssigkeit einmal links, das andere Mal rechts stellt.



#### 46. Optisches Drehungsvermögen. Saccharimetrie (Biot).

Wird das dunkle Gesichtsfeld eines Polarisationsapparates hell durch das Einschieben eines durchsichtigen Körpers, so ist der letztere entweder doppelbrechend oder „optisch aktiv“, d. h. er dreht die Schwingungsebene des polarisirten Lichtes. „Rechts drehend“ heißt eine Substanz, wenn die Schwingungsebene sich im umgekehrten Sinne des Korkziehers verschiebt, d. h. wenn dieselbe dem empfangenden Auge in der Richtung des Uhrzeigers gedreht erscheint.

Spezifische Drehung nennt man bei Krystallen den Drehungswinkel für die Längeneinheit des durchstrahlten Körpers. Bei drehenden Flüssigkeiten und Lösungen aktiver Körper in einem inaktiven Lösungsmittel bezieht man die Drehung auf die Masseneinheit des drehenden Körpers.

Enthält die Flüssigkeit in der Volumeneinheit ( $\text{cm}^3$ ) die Masse  $c$  (Gramm) des Körpers und gibt die Schicht von der Länge  $l$  den Drehungswinkel  $\alpha$ , so ist die spec. Drehung also  $d = \alpha / (l \cdot c)$ . Die spec. Drehung pflegt mit wachsender Konzentration der Lösung etwas veränderlich zu sein, was man in zugefügten Korrektionsgliedern darstellt. Molekulares Drehungsvermögen heißt die spec. Drehung multiplicirt mit dem Molekulargewicht des Körpers.

Die Drehung hängt stark von der Farbe ab. Stärker brechbares Licht wird auch stärker gedreht. Über farbige Lichtquellen s. 37d. Über Beobachtungen mit spektral zerlegtem Licht vgl. den Schluss.

Am häufigsten werden Zuckerlösungen in Bezug auf ihre Lichtdrehung beobachtet. Wir wollen uns an die Instrumente anschließen, welche zu diesem Zwecke dienen. Die Drehungen anderer Körper werden ebenso gemessen.

Die spec. Drehung des in Wasser gelösten Rohrzuckers ist für Natron-Gelb =  $66,59^\circ/\text{dm}$ , d. h. der Drehungswinkel  $\alpha$  durch eine Lösung, welche in 100 cbcm  $z$  g Zucker enthält, beträgt in einer Schicht von  $l$  dm Länge

$$\alpha = 0,6659 \cdot z l, \text{ woraus } z = 1,504 \alpha / l.$$

Für das weiße Licht im Mittel gilt

$$\alpha = 0,710 \cdot z l, \text{ woraus } z = 1,41 \alpha / l.$$

Streng genommen wächst die Drehung mit dem Zuckergehalte der Lösung ein wenig verzögert an. Genauer ist für Natronlicht (Schmitz und Tollens)

$$\alpha = (0,6667 \cdot z - 0,000096 \cdot z^2) l \text{ oder } z = 1,500 \cdot \frac{\alpha}{l} + 0,00032 \cdot \left(\frac{\alpha}{l}\right)^2.$$

Das spec. Drehvermögen des Quarzes in der Richtung der Axe ist für Natronlicht bei der Temperatur  $t$  gleich  $21,72(1 + 0,00015(t - 20))$   $^\circ/\text{mm}$  (Gumlich).

Setzt man die Drehung für Natrongelb gleich Eins, so stellen sich die Drehungen für die anderen Farben, bei Quarz und Zucker fast genau in gleichem Verhältnis, im Mittel etwa folgendermaßen dar:

Mittleres	Rot	Gelb	Grün	Blau	Violett
Drehung =	$\frac{3}{4}$	1	$\frac{4}{3}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{9}{4}$

Hiernach kann man mit Hilfe der im Eingang gegebenen Zahlen für Natrongelb die Erscheinungen der Färbung übersehen.

Das Drehungsvermögen  $d$  kann als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  (Tab. 19a) durch den Ausdruck  $d = a/\lambda^2 + b/\lambda^4$  dargestellt werden.

Genauere Angaben für Quarz s. Tab. 20; für andere Körper vgl. Landolt, Optisches Drehungsvermögen, 1879; Landolt u. Börnstein Tabellen, 2. Aufl. S. 450 ff.

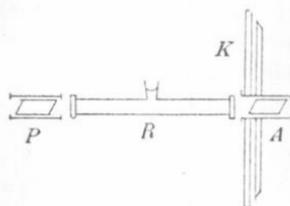
Die Instrumente zur Messung der Lichtdrehung (Saccharimeter) haben entweder einen Teilkreis an der Polarisationsvorrichtung, durch dessen Drehung man die Drehung der untersuchten Substanz mißt (Mitscherlich), oder einen „Kompensator“,

nämlich Quarzkeile, welche man verschiebt, bis sie die Drehung aufheben (Soleil).

Eine Anordnung zur Messung in hoher Temperatur s. Landolt Chem. Ber. 1895, 3102.

### I. Saccharimeter mit gedrehtem Nicol.

1. Mitscherlich. Das Instrument besteht aus dem festen polarisirenden Nicol  $P$  und dem auf dem Teilkreis  $K$  drehbaren analysirenden Okular-Nicol  $A$ . Ein weit-sichtiges Auge verlangt außerdem eine schwache Lupe vor  $A$  oder die Brille. Man stellt eine Natronflamme hinter dem Instrument vor einem schwarzen Schirm auf. Das von dem Leuchtgase herrührende bläuliche Licht wird durch gelbes Glas oder eine Lösung von Kaliumbichromat beseitigt.



Man bringt eine leere oder mit Wasser gefüllte Röhre zwischen die Nicol'schen Prismen und dreht den Okular-Nicol so, daß die Mitte des Gesichtsfeldes dunkel erscheint. Endlich wird die mit der (sehr gleichförmig gemischten!) Zuckerlösung gefüllte Röhre eingeschoben, wodurch das Gesichtsfeld in der früheren Stellung des Index hell wird. Die Anzahl Grade, um welche man nach rechts (im Sinne des Uhrzeigers) drehen muß, damit wieder die Mitte dunkel wird, ist der Drehungswinkel  $\alpha$ .

Die Deckplatten der Röhren darf man nicht zu fest anschrauben, weil die dadurch entstehende Doppelbrechung des Glases die Einstellung stört.

Eine Regulierung des Nullpunktes der Drehung, etwa auf den Nullpunkt der Teilung, geschieht leicht durch Drehung eines der Nicol's in seiner Fassung.

Den Drehungswinkel eines festen Körpers, z. B. einer zur Axe senkrecht geschnittenen Quarzplatte, mißt man ebenso wie oben, indem man den Körper zwischen die beiden Nicol bringt. Die optische Axe des Quarzes muß genau in der Visirrichtung liegen, wenn man nicht großen Täuschungen ausgesetzt sein will. Man orientirt die Platte nach dem Spiegelbilde des eigenen Auges oder einer kleinen vor das Auge gehaltenen Flamme.

Im weißen Licht entsteht, weil die einzelnen Farben verschieden stark gedreht werden, nach Einbringung der drehen-

den Lösung kein Dunkel mehr, sondern ein Wechsel von Farben. Man stellt auf die „empfindliche Farbe“, in welcher das Gelb ausgelöscht ist, ein, d. h. auf ein Violett, welches den ziemlich schroffen Übergang von Rot in Blau bildet. Für die Berechnung gilt die Konstante 1,41 (S. 215).

Den Zweifelfall, ob ein Körper links oder rechts dreht, entscheidet man danach, daß in dem richtigen Sinne der Drehung des Okulars der empfindliche Farbenwechsel von blau nach rot stattfinden muß.

Sollte man unsicher sein, ob der Drehungswinkel größer oder kleiner als  $180^{\circ}$  ist, so beobachte man mit rotem Lichte (Kupferglas) und mit Natrongelb. Die beiden Drehungen verhalten sich etwa gelb:rot = 4:3.

Eine größere Schärfe der Einstellung bieten die folgenden Abänderungen des Mitscherlich'schen Instrumentes.

2. Doppelquarzplatte. Zwei nebeneinander stehende, gleich dicke links und rechts drehende Quarzplatten, am günstigsten 3,75 mm dick, werden vor den Polarisator eingesetzt, genau senkrecht zur Sehnlinie.

Bei gekreuzten wie bei parallelen Nicols erscheinen beide Platten im Natronlicht gleich hell, im weißen Licht gleich gefärbt. Platten von 3,75 mm Dicke geben bei parallelen Nicol's die violette sog. empfindliche Farbe und sind auch im Natronlicht, welches sie um etwa  $80^{\circ}$  drehen, sehr empfindlich.

Nach Einbringung einer drehenden Substanz erscheinen beide Hälften ungleich. Dreht man den Okular-Nicol um den Drehungswinkel  $\alpha$  der Substanz nach, so wird die Gleichheit wieder hergestellt. Ist die Drehung beträchtlich, so verhindert die Farbenzerstreuung weißen Lichtes eine vollständige Gleichheit der Doppelplatte. Dann muß man also mit einfarbigem Lichte beobachten.

3. Polaristrobometer (Wild). Dasselbe gibt vermöge einer eingeschobenen Savart'schen Platte (zwei Quarze oder Kalkspate unter  $45^{\circ}$  gegen die Axe geschnitten, mit rechtwinklig gekreuzten Hauptschnitten) Streifen im Gesichtsfeld, welche bei homogenem Licht hell und dunkel, bei weißem Licht farbig sind. Das Okular wird zunächst so weit herausgezogen, daß diese Streifen möglichst scharf erscheinen.

Die saccharimetrische Einstellung findet auf das Verschwinden der Streifung in der Mitte des Gesichtsfeldes statt. Da das dem Auge abgewandte Nicol'sche Prisma gedreht wird, so ist die Drehung vom Auge aus gesehen im entgegengesetzten Sinne wie die Bewegung des Uhrzeigers zu rechnen.

Die Streifen verschwinden in vier je um  $90^\circ$  verschiedenen Stellungen. Über die etwaige Frage, ob der Drehungswinkel  $\alpha$  größer oder kleiner als  $90^\circ$  ist, vgl. vorige S.

Die Instrumente haben häufig noch eine zweite Kreisteilung, welche bei Anwendung einer 200 mm langen Röhre direkt den Gehalt von 1 l der Lösung an gr Zucker ergibt.

**Halbschattenapparate.** Das Gesichtsfeld ist in zwei Hälften geteilt, in denen beiden sich polarisiertes Licht, aber von verschiedenen Schwingungsrichtungen  $s_1$  und  $s_2$  (Fig.) befindet. Nullpunkt der Stellung des Analysators ist diejenige Stellung, in welcher die beiden Hälften gleich hell erscheinen, d. h. in welcher die Schwingungsrichtung  $A$  des Analysators gleiche Winkel mit den Schwingungsrichtungen in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes bildet.

Die größte Empfindlichkeit des relativen Helligkeitswechsels entsteht, wenn  $s_1$  und  $s_2$  sich wenig von einander unterscheiden und die Richtung  $A$  den stumpfen Winkel zwischen ihnen halbirt. Doch ist der Kleinheit der Neigung  $s_1 s_2$  durch die abnehmende Lichtstärke eine Grenze gesetzt. Man probirt die günstigste Stellung für die Lichtstärke und für die Durchsichtigkeit des Körpers, dessen Drehung gemessen werden soll, aus.



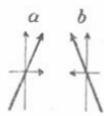
Der Nullpunkt ist immer erst nach dieser Regulierung zu bestimmen.

Nach Einschiebung des drehenden Körpers wird wieder auf gleiche Helligkeit eingestellt. Der Unterschied der jetzigen Einstellung gegen den Nullpunkt ist gleich dem Drehungswinkel.

In neuester Zeit werden auch Instrumente mit mehr als zweiteiligem Gesichtsfelde konstruiert, bei denen der Kontrast der Helligkeiten die Genauigkeit der Einstellung vergrößert.

4. Halbschattenapparat nach Laurent. Man beleuchtet mit Natriumlicht. Die Hälfte des Gesichtsfeldes ist vor dem Polarisator bedeckt von einer Krystallplatte (Glimmer- oder

Quarzplatte parallel zur Axe geschnitten), welche die beiden Schwingungskomponenten, in welche der Strahl bei dem Eintritt in die Krystallplatte zerfällt (Fig. *a*), um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschiebt. Bei dem Austritt setzen sich beide Komponenten wieder zu einer einzigen Welle zusammen, deren Schwingungsebene also gegen die des eintretenden Strahles gedreht ist (Fig. *b*), so daß aus der belegten und der unbelegten Hälfte, ähnlich wie bei dem Doppelquarz, Strahlen von verschiedener Schwingungsrichtung heraustreten.



5. Halbschattenapparat nach Lippich. Das Licht durchläuft zuerst ein größeres Polarisationsprisma mit geraden Endflächen (Glan'sches Prisma), dann ein zweites ähnliches, welches nur das halbe Gesichtsfeld einnimmt. Ersteres ist mit Hilfe eines Hebelarms um seine Längsaxe drehbar, so daß der Winkel zwischen den beiden Polarisationsebenen verändert werden kann.

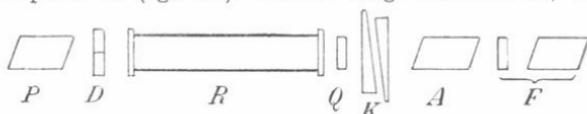
Die Beobachtung erfordert homogenes Licht, welches aber beliebige Wellenlänge haben kann.

6. Ein Cornu-Jellet'sches Prisma gibt gleichfalls zwei Hälften des Gesichtsfeldes, auf deren gleiche Helligkeit man einstellt.

## II. Saccharimeter mit Quarzkeilen (Soleil).

Die Drehung der Polarisationssebene durch eine Zuckerlösung kann durch eine entgegengesetzt drehende Quarzplatte kompensiert werden, und zwar nicht nur für einfarbiges sondern für beliebiges Licht, weil die Farbenzerstreuung im Quarz derjenigen in der Zuckerlösung sehr nahe proportional ist (S. 215). Keilförmige Quarze, von denen beliebige Dicken eingeschaltet werden können, lassen aus der zur Kompensation notwendigen Dicke die Drehung im Zucker beurteilen.

Beschreibung des Soleil'schen Saccharimeters. Das Licht tritt durch den polarisirenden Nicol *P* ein und geht von da durch die Doppelquarzplatte *D* (vgl. I 2). Hierauf folgt das Rohr *R*, welches mit



der Lösung gefüllt werden kann. Dann der Kompensator, bestehend aus einer rechtsdrehenden Quarzplatte *Q* und den beiden linksdrehenden Quarz-

keilen  $K$ , welche sich mittels eines Triebes gegeneinander verstellen lassen, also zusammen einen Linksquarz von veränderlicher Dicke vorstellen. In einer mittleren Stellung ist die Gesamtdicke derjenigen des Rechtsquarzes  $Q$  gleich, so daß  $Q$  und  $K$  zusammen keine Wirkung haben. Diese Stellung soll der Einstellung Null auf der mit dem Trieb verbundenen Teilung entsprechen. Es folgt dann der analysierende Nicol  $A$ , dessen Polarisationssebene derjenigen von  $P$  parallel sein soll.

Da Zuckerlösungen etc. gefärbt sein können, da auch nicht alle Augen für den gleichen Farbenwechsel empfindlich sind, so ist die violette Übergangsfarbe nicht immer die empfindlichste. Deswegen hat man in der Regel nach dem Auge zugewandt (bei manchen Instrumenten auch wohl umgekehrt auf der Seite der Flamme) einen Farbenregulator  $F$ . Dieser besteht wieder aus einer Quarzplatte und einem drehbaren Nicol, mit dessen Drehung die Farbe des Gesichtsfeldes sich ändert. Auf den Nullpunkt des Instrumentes hat diese Drehung keinen Einfluß.

Man legt das leere oder mit Wasser gefüllte Rohr ein, beleuchtet mit einer weissen Flamme oder mit Tageslicht und zieht zuerst das mit dem Okular verbundene, oben nicht mit gezeichnete kleine Fernrohr so weit heraus, daß die Quarzplatten scharf begrenzt erscheinen. Um die zweckmässigste Färbung zu erhalten, stellt man mittels der Zahnstange zunächst auf nicht ganz gleiche Färbung der Halbkreise ein. Durch Drehung des Farbenregulators (siehe oben) bewirkt man dann diejenige Färbung, welche den grössten Unterschied der Halbkreise gibt.

Nun stellt man mit dem Trieb auf gleiche Färbung ein und liest die Teilung ab, bringt die Zuckerlösung ein, stellt wieder ein und liest ab, beide Einstellungen einige Male wiederholend.

Es entspricht die Verschiebung um 1, bez. auch 0,1 Teilstrich einer Drehung des gelben Natronlichtes bei den Saccharimetern Soleil-Ventzke um  $0,346^{\circ}$  und Soleil-Dubosq um  $0,217^{\circ}$ .

Der Zuckergehalt von 100 cbcm der Lösung in gr wird also nach dem früheren bei Anwendung der 2 dm langen Röhre gefunden, wenn die Verschiebung am Mafsstabe von der leeren auf die gefüllte Röhre  $p$  Teile betragen hat,

$$\text{Soleil-V. } z = 0,2605 \cdot p, \quad \text{Soleil-D. } z = 0,1635 \cdot p.$$

Für Zuckersorten, deren Gehalt an reinem Zucker gefunden werden soll, ergibt sich also die Regel: man löse 26,05 bez. 16,35 g des Rohrzuckers zu 100 cbcm Lösung, dann zeigt die Verschiebung des Mafsstabes den reinen Zuckergehalt in Procenten an.

Die Probe für richtige Teilung ist durch die Anwendung reiner „Normal-Lösung“ von 26,05 bez. 16,35 g in 100 cbcm gegeben. Die Verschiebung muß dann 100 Teilstriche betragen. Teilungen von unbekanntem Wert werden durch bekannte Zuckerlösungen oder Quarzplatten bestimmt.

Soll der Nullpunkt der Teilung mit dem Zuckergehalt Null zusammenfallen, so stellt man bei leerer Röhre den Index auf Null und dreht am hinteren Nicol'schen Prisma, bis die Quarzplatten gleich gefärbt sind.

**Bestimmung des Zuckergehaltes, wenn noch andere drehende Substanzen vorhanden sind.**

Die Elimination des Einflusses anderer drehender Substanzen als Rohrzucker (z. B. Invertzucker oder Dextrin) beruht auf der Erfahrung, daß der rechtsdrehende Rohrzucker durch 10 Minuten langes Erwärmen mit Salzsäure auf etwa 70° in links drehenden Invertzucker verwandelt wird. Während Rohrzuckerlösungen von der Temperatur so gut wie unabhängig drehen, wird die Invertzuckerlösung ziemlich stark beeinflusst. Eine invertierte Lösung von der Länge  $l$  dm, welche in 100 cbcm  $x$  gr früheren Rohrzuckers enthält, dreht die Polarisationssebene des Natron-Lichtes bei der Temperatur  $t'$  um den Winkel (Gubbe)

$$(0,2330 - 0,00304(t' - 20)) \cdot zl.$$

Hieraus wird die praktische Regel abgeleitet: Nachdem die Drehung (d. h. der Winkel  $\alpha$  oder die Verschiebung  $p$  der Quarzkeile) der gewöhnlichen Lösung bestimmt worden ist, nimmt man 100 cbcm derselben, versetzt sie mit 10 cbcm konzentrierter Salzsäure und erwärmt 10 Minuten lang auf 70°. Nach der Abkühlung füllt man mit dieser invertierten Lösung eine um den zehnten Teil längere Röhre als die erste (oder wenn dieselbe Röhre benutzt wird, so multiplicirt man die jetzt beobachteten Winkel mit 1,1) und beobachtet die nunmehr erfolgende Drehung  $\alpha'$  (bez.  $p'$ ) nach links. Die Temperatur der Lösung bei dieser zweiten Beobachtung sei  $t'$ . Um schließlich die Drehung durch den Rohrzuckergehalt allein zu bekommen, teilt man die Summe  $\alpha + \alpha'$  oder  $p + p'$  durch  $1,350 - 0,00457(t' - 20)$ .

Denn wenn die zu eliminirende Drehung durch den Nichtzucker gleich  $\beta$  gesetzt wird, so hat man (S. 215 und 221)

$$\alpha = 0,665 z l + \beta.$$

$$\alpha' = (0,2330 - 0,00304(t' - 20)) z l - \beta.$$

Folglich

$$\alpha + \alpha' = (0,8980 - 0,00304(t' - 20)) z l = (1,350 - 0,00457(t' - 20)) \cdot 0,665 z l.$$

0,665 z l ist aber die Drehung durch den Zuckergehalt allein.

#### Bestimmung eines Drehungsvermögens im Spektrum.

Beleuchtet man den Polarisationsapparat (Mitscherlich) mit gemischtem Licht (Sonne), so kann man das durchgegangene Licht mit einem Spektralapparat zerlegen. Die gekreuzte Stellung der Nicol's zeigt sich darin, daß das ganze Spektrum dunkel ist. Das Einschalten einer drehenden Substanz erhellt das Spektrum. Dreht man den Analysator nach, so tritt im Spektrum ein dunkles Band auf, welches bei weiterer Drehung von dem roten nach dem violetten Ende wandert. Die Mitte dieses Streifens entspricht demjenigen Licht, welches vollkommen ausgelöscht wird. Durch die jeweilige Stellung des Analysators wird also der Drehungswinkel dieses Lichtes gemessen.

### 46 a. Untersuchung doppelbrechender Körper. Erkennung des optischen Charakters einaxiger Krystalle.

Ein Körper bricht das Licht einfach, wenn er amorph oder regulär krystallisiert ist; doppelt, wenn er einem nicht regulären Krystallsysteme angehört oder aus anderen Ursachen, wie Druck, Zug, rasche Kühlung, nach verschiedenen Richtungen ungleich beschaffen ist.

Man erkennt diese Beschaffenheit mit dem Polarisationsapparat, einer Verbindung von zwei das Licht polarisierenden Vorrichtungen. Polarisatoren sind Nicol'sche Prismen, Turmalinplatten, unbelegte, meistens schwarze Glasplatten, von denen man das Licht unter einem Einfallswinkel von  $56^\circ$  spiegeln läßt, oder Sätze von aufeinandergelegten Glasplatten, durch welche das Licht unter dem genannten Neigungswinkel hindurchgeht. Doppelbrechende Prismen (Kalkspat, Quarz) zerlegen das Licht in zwei senkrecht zu einander schwingende Strahlen; die gleichzeitige Farbenzerstreuung kann durch ein angekittetes Glasprisma aufgehoben sein. Für manche Zwecke bedarf man eines Lichtbündels von verschiedenen Richtungen im Krystall (eines „großen Gesichtsfeldes“). Dann werden zwischen den Krystall und die Polarisatoren Konvexlinsen eingeschaltet (Nörreberg'sches Polarisationsmikroskop). Zur Beobachtung kleiner Körper im polarisirten Lichte unter dem gewöhnlichen Mikroskop bringt man zwischen Beleuchtungsspiegel und Körper ein Nicol'sches Prisma und legt ein zweites auf das Okular des Mikroskops.

Vgl. hierzu Klein, Berl. Sitz. Ber. 1893, 221. — Über Polarisationsinstrumente überhaupt z. B. Groth oder Liebisch, Krystallographie. Eingehende Regeln zur Unterscheidung der Krystalle unter dem Mikroskop s. Lehmann, Molekularphysik I 295. 1888.

Die dem Auge zugewandte Polarisationsvorrichtung heißt Analysator, die andere wohl Polarisator schlechweg.

Meistens gebraucht man den Polarisationsapparat mit „gekreuzten Polarisationsvorrichtungen“, wobei das Gesichtsfeld dunkel erscheint. Die beiden in diesem Falle auf einander senkrechten Polarisationsebenen der Vorrichtungen sollen „Hauptebenen“ des Apparates heißen.

Ob ein durchsichtiger Körper einfach oder doppelt bricht, erkennt man mit gekreuzten Polarisatoren. Ein einfach brechender Körper läßt das Gesichtsfeld dunkel mit Ausnahme der wenigen Körper, welche das Licht drehen (46) ohne doppelt zu brechen. Ein doppelbrechender Körper erhellt, bez. färbt im allgemeinen das Gesichtsfeld. Nur in einzelnen Stellungen und auch dann nur bei kleinem Gesichtsfelde bleibt die Erhellung aus.

Es sei eine Planplatte von einem doppelbrechenden Krystall gegeben. Das Licht zerlegt sich bei dem Durchgang in zwei Wellenzüge, welche senkrecht zu einander polarisiert sind. Die Schwingungsebenen werden leicht erkannt, wenn man die Platte zwischen die gekreuzten Polarisationsvorrichtungen bringt. Die Platte hat dann nämlich zwei um  $90^\circ$  verschiedene Lagen, bei denen das Gesichtsfeld bez. die Mitte des Feldes dunkel bleibt. In diesen Stellungen fallen die Schwingungsebenen mit den Hauptebenen des Apparates zusammen.

Einaxiger Krystall. Eine der beiden Schwingungsebenen muß ein „Hauptschnitt“ sein, d. h. die Hauptaxe enthalten. Wenn die Mitte immer dunkel bleibt, so zeigt dies an, daß die Platte senkrecht zur Axe geschnitten ist. In einem Apparat mit größerem Gesichtsfelde — Turmalinzeige, Polarisationsmikroskop — erstreckt sich die Dunkelheit von der Mitte in die beiden Hauptebenen des Apparates (dunkles Kreuz); die vier Quadranten sind von Ringen durchsetzt, welche im einfarbigen Lichte (rotes Glas vor das Auge halten!) abwechselnd hell und dunkel, im weißen Lichte gefärbt erscheinen.

Lichtdrehende Körper (Quarz) zeigen das dunkle Kreuz im allgemeinen nicht.

Je enger die Ringe beisammenliegen, desto größer ist bei gleich dicken Platten die „Doppelbrechung“, d. i. der Unterschied der Lichtgeschwindigkeiten des ordentlichen und des außerordentlichen Strahles.

Über Schleifen und Poliren von Krystallplatten s. 7, 17.

#### Unterscheidung positiver und negativer Krystalle.

Ein Krystall, in welchem der außerordentliche Strahl stärker gebrochen wird als der ordentliche, heißt positiv und umgekehrt.

Man erkennt das Vorzeichen mit einer sog. Viertelwellen- oder cirkular polarisirenden Glimmerplatte, d. h. einer Platte von solcher Dicke, daß die beiden Schwingungen, welche die Platte durchsetzen, einen Gangunterschied von ein Viertel Wellenlänge erfahren. Diese Glimmerplatte legt man irgendwo zwischen die Polarisationsvorrichtungen, und zwar so, daß die Ebene der optischen Axen der Glimmerplatte um  $45^{\circ}$  gegen die Hauptebenen des Apparates geneigt ist. Dann zeigt die zu untersuchende Krystallplatte nicht mehr das schwarze Kreuz mit den gleichen Ringquadranten, sondern die Ringstücke sind in benachbarten Quadranten gegen einander verschoben, und in der Nähe des nunmehr hellen Mittelpunktes sind zwei dunkle Flecke entstanden. Liegen diese Flecke in der optischen Axenebene der Glimmerplatte, so ist der Krystall negativ und umgekehrt.

Das Glimmerplättchen läßt sich leicht in erforderlicher Dicke abspalten. Man erkennt seine Brauchbarkeit und die Richtung seiner optischen Axenebene am einfachsten dadurch, daß man dasselbe einmal auf einen bekannten Krystall (Kalkspat, negativ) anwendet. Die Axenebene des Glimmers läßt sich auch aus seiner Lemniskatenfigur (f. S.) bestimmen.

Die Erscheinung erklärt sich unter Zugrundelegung der Fresnel'schen Hypothese in folgender Weise: Angenommen, die Krystallplatte sei negativ, also von den den Krystall schräg durchsetzenden Strahlen pflanzen sich die außerordentlichen, d. i. die im Apparate radial schwingenden rascher fort als die ordentlichen, peripherisch schwingenden Strahlen. In einer gewissen geneigten Richtung, d. h. in der Krystallfigur in einer gewissen

Entfernung vom Mittelpunkte, welche innerhalb des ersten dunklen Ringes liegen muß, wird der radial schwingende Strahl dem anderen im Krystall um  $\frac{1}{4}\lambda$  vorausseilen; denn dem ersten dunklen Ringe entspricht ja ein Gangunterschied von  $\frac{1}{2}\lambda$ .

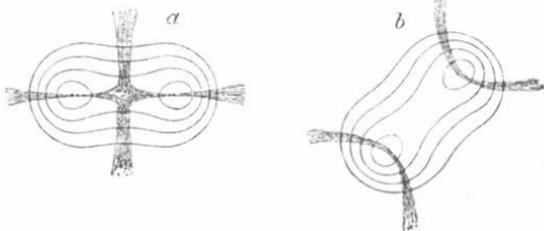
Nun pflanzt eine Glimmerplatte einen sie durchsetzenden Strahl, wenn er in der Axenebene schwingt, am langsamsten fort; unsere Viertelwellenplatte verzögert also die in ihrer Axenebene schwingende Lichtkomponente gegen die andere um  $\frac{1}{4}\lambda$ . Faßt man nun von den oben genannten Strahlen, deren radiale Komponente im Krystall um  $\frac{1}{4}\lambda$  vorausgeeilt war, diejenigen ins Auge, welche in der Axenebene der Glimmerplatte liegen, so sieht man, daß hier der Gangunterschied im Krystall durch die Glimmerplatte aufgehoben wird, das Gesichtsfeld also seine natürliche Beschaffenheit d. h. Dunkelheit haben muß. Daher entstehen die beiden dunklen Flecke in der Axenebene der Glimmerplatte.

Daß ein positiver Krystall sich umgekehrt verhalten muß, folgt von selbst. — Zugleich übersieht man leicht, daß die Durchmesser der Ringe in zwei Quadranten um  $\frac{1}{4}$  Ringabstand vergrößert, in den anderen beiden Quadranten um ebensoviel verkleinert sein müssen.

Über die Messung von Lichtbrechungsverhältnissen der Krystalle vgl. 40.

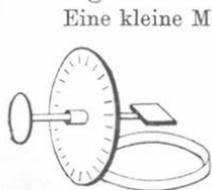
#### 47. Winkel der optischen Axen eines Krystalles.

Aus einem optisch zweiaxigen Krystall sei eine zur Mittelnie der beiden Axen senkrechte Platte geschliffen. Im gekreuzten Polarisationsapparat (46a) liefert die Platte, wenn das Gesichtsfeld hinreichend groß ist, eine Figur aus hellen und dunklen, bez. gefärbten Lemniskaten, welche von einem dunklen Kreuz oder von hyperbolischen dunklen Ästen durchzogen sind. Die beiden Scheitelpunkte der Hyperbel, um welche sich die Lemniskaten zusammenziehen, bezeichnen die optischen Axen des Krystalles.



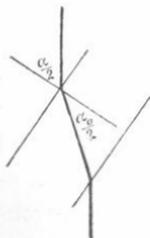
Fällt die Verbindungslinie der beiden Axenbilder mit einer Hauptebene des Apparates zusammen, so erscheint das dunkle Kreuz *a*. Dreht man die Krystallplatte von hier aus um  $45^\circ$ , so erscheinen die dunklen Äste symmetrisch gegen die Lemniskaten. Dieses in *b* dargestellte Bild ist zum Messen am ge-

eignetsten. Man markirt an der Krystallplatte die zur Verbindungslinie der optischen Axenbilder senkrechte Richtung.



Eine kleine Meßvorrichtung, bestehend aus einem getheilten Kreis, an dessen Drehungsaxe die Krystallplatte mit Wachs oder mit einem Kork befestigt wird und die mit einem Ring auf den unteren Teil des Nörremberg'schen Apparates aufgesetzt wird, ist leicht herzustellen. Einen besonderen Axenwinkelapparat nach Groth führt die Fuefs'sche Werkstätte aus.

Um mit Fig. *b* (vor. S.) zu messen, stellt man die Drehungsaxe symmetrisch gegen die Hauptebenen des Apparates. Man befestigt nun an der Drehungsaxe die Krystallplatte so, daß die oben markirte Richtung in der Axe liegt, stellt eins von den optischen Axenbildern (Scheitelpunkt der Hyperbel) in die Visirrichtung des Apparates (Fadenkreuz) ein und liest die Kreisteilung ab. Der Winkel  $\alpha$ , um welchen man alsdann drehen muß, damit der andere Scheitelpunkt in die Visirlinie des Apparates fällt, ist der scheinbare optische Axenwinkel, d. h. der Winkel der Lichtstrahlen, welche den Krystall in der Richtung der Axen durchlaufen haben, nach ihrem Austritt in die Luft.



Kennt man das mittlere Haupt-Brechungsverhältnis  $n$  des Lichtes in dem Krystall (40, II; Tab. 20), so findet man den wirklichen Winkel  $\alpha_0$  der optischen Axen im Krystall aus der Beziehung

$$\sin \frac{1}{2} \alpha_0 = 1/n \cdot \sin \frac{1}{2} \alpha.$$

Bei weiter auseinanderstehenden Axen erscheint natürlich nur eine Axe zur Zeit im Gesichtsfeld. Wenn der Winkel noch größer ist, so kann es vorkommen, daß wegen der Brechung und der totalen Reflexion überhaupt kein Licht, welches die Platte in der Richtung der Axen durchlaufen hat, in die Luft austritt. In diesem Falle kann man die Messung innerhalb einer Flüssigkeit ausführen, welche von zwei ebenen, zur Sehlinie senkrechten Glasflächen begrenzt wird. Das Verfahren ist im übrigen das nämliche wie vorhin. Der hier beobachtete Axenwinkel sei  $\alpha'$ , so findet man  $\alpha$ , wenn  $N$  das Brechungsverhältnis der Flüssigkeit ist, aus der Gleichung

$$\sin \frac{1}{2} \alpha = N \sin \frac{1}{2} \alpha'.$$

Da der Axenwinkel von der Farbe abhängt, so verlangt die genaue Messung eine bestimmte Lichtsorte, z. B. das Licht der Natronflamme oder auch des roten Kupferglases, welches man vor das Auge hält. Der Unterschied der Axenwinkel in verschiedenen Farben heißt Axendispersion für diese Farben.

Brechungsverhältnis  $N$  einer Flüssigkeit. Eins der einfachsten Mittel, dieses zu bestimmen, ist die Messung eines und desselben Axenwinkels (z. B. Baryt) in der Luft  $\alpha$  und in einer Flüssigkeit  $\alpha'$ . Es gilt dann die vorige Gleichung.

#### 47a. Photometrie.

##### I. Durch Beleuchtung aus verschiedener Entfernung.

Alle Photometer stellen auf gleiche Helligkeit ein. Lichtquellen können mit einander nach dem Satze verglichen werden: geben zwei Lichtquellen in den Abständen  $a_1$  bez.  $a_2$  gleiche Helligkeit, so verhalten sich ihre Lichtstärken

$$i_1 : i_2 = a_1^2 : a_2^2.$$

Sobald verschiedene Färbung vorhanden ist, wird die Schätzung gleicher Helligkeit vom subjektiven Ermessen abhängig.

1. Schatten-Photometer (Rumford). Vor einen weißen Schirm kommt ein dunkler, nicht zu schmaler Stab zu stehen. Die Lichtquellen werden so gestellt, daß die beiden Schatten des Stabes dicht nebeneinander liegen. Die Entfernungen werden dann so geregelt, daß die beiden Schatten gleich dunkel erscheinen, wobei darauf zu achten ist, daß beide Lichtbündel den Schirm in den Schattengebieten unter gleichem Winkel treffen. Die Abstände werden von jedem Lichte zu dem Schatten des anderen gemessen.

2. Beleuchtung zweier Flächen. Zwei gleiche Flächenstückchen werden unter gleichen Winkeln von den beiden Lichtquellen erhellt, deren Abstände  $a_1$  und  $a_2$  so ausgesucht werden, daß die Flächenhelligkeit gleich erscheint (Foucault). Fremdes Licht ist hier auszuschließen. Entweder neigt man die Flächen gegeneinander, beleuchtet von aufsen und beobachtet in der Mittellinie (Ritchie) oder man trennt durch eine Scheidewand und beobachtet das durchfallende Licht.

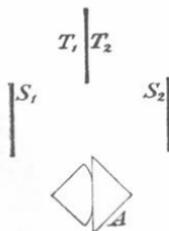
In dem Photometer von Leonh. Weber werden 2 Milchgläser beleuchtet, das eine mit einer konstanten Hilfsflamme

(Benzin), das andere erst mit der einen, dann mit der anderen Lichtquelle. Ein total reflektirendes Prisma bringt die Bilder der Gläser neben einander. Durch Regelung der Abstände wird gleiche Helligkeit bewirkt. Dieses Photometer gestattet auch Helligkeitsmessungen beleuchteter Flächen bei beliebiger Lage der letzteren, indem man den Abstand der Benzinkerze reguliert. (Wied. Ann. 20, 326. 1883.)

3. Vergleichung auffallenden Lichtes mit durchfallendem (Bunsen). Ein kleiner Schirm (Papier) sei an verschiedenen Stellen ungleich stark durchscheinend gemacht, entweder vermöge eines kreis- oder besser ringförmigen Fett- oder Stearinflecks oder auch durch teilweises Bekleben eines dünnen Papiers mit einem zweiten.

Einseitig von dem Schirm in ungeändertem Abstände befinde sich eine konstante Lichtquelle (kleine Gasflamme von konstanter Höhe; Benzin- oder Petroleumlampe, etwa eine halbe Stunde zuvor angezündet; elektrische Glühlampe mit konstanter Spannung). Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werden folgeweise auf der anderen Seite des Schirmes in solchen Abständen  $r_1$  und  $r_2$  aufgestellt, daß die verschiedenen Schirmteile gleich hell erscheinen. Da die scheinbare Helligkeit von dem Winkel abhängt, unter welchem man das Papier ansieht, so ist eine konstante Visirrichtung innezuhalten.

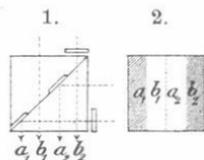
Photometerwürfel (Lummer und Brodhun). Die Hypotenusenflächen zweier rechtwinkliger Prismen berühren sich mit ihren mittleren Teilen unter Druck vollständig, so daß hier keine Reflexion, sondern vollständige Durchlässigkeit vorhanden ist. Außen ist das eine Prisma angeschliffen, so daß die Fläche des anderen totale Reflexion gibt. Rechts und links von dem beiderseits gleichen weissen Schirm  $T$  werden die zu vergleichenden Lichtquellen aufgestellt.  $S_1$  und  $S_2$  sind gleiche Spiegel. In die Fläche  $A$  hineinsehend erblickt man die Schirmseite  $T_1$  durch die Mitte hindurch,  $T_2$  dagegen total reflektiert an den Rändern. Beide Teile erscheinen gleich hell, wenn  $T_1$  und  $T_2$  gleich hell beleuchtet sind. Die Vergleichung kann auf weniger als 1% Fehler sicher sein.



Gegen Ungleichheiten der Seiten 1 und 2 schützt folgendes Verfahren: auf die Seite 1 kommt ein konstantes Hilfslicht; die zu vergleichenden Lichtstärken stellt man folgeweise auf die Seite 2. Vgl. vor. S.

Kontrast-Photometer. Die Genauigkeit der Einstellung wird noch erhöht, wenn man 4 Felder herstellt, von denen je zwei auf gleiche, aber paarweise verschiedene Helligkeit eingestellt werden. Die Abschwächung des Lichtes geschieht durch Glasplatten (Fig. 1), welche geeigneten Teilen der Eintrittsflächen vorgesetzt werden und etwa 8% des Lichtes wegnehmen. Eine Gestalt des Photometerwürfels mit Kontrast ist z. B. die folgende.

Die Teile über  $a_1$  und  $a_2$  der hinteren Hypotenusenfläche (Fig. 1) sind mit dem Sandgebläse weggeätzt. An diesen Stellen findet in dem vorderen Prisma totale Reflexion des von rechts kommenden Lichtes statt, während durch die Teile über  $b_1$  und  $b_2$  das geradeaus kommende Licht durchgeht. Die beiden Glasplatten schwächen die Beleuchtung von  $a_1$  und  $b_2$  ab. Die Plattenränder liegen so, daß man sie nicht sieht. Die Einstellungsfigur ist unter 2 dargestellt.



Lummer und Brodhun, Z. S. f. Instr. 1889, 44 u. 461; 1892, 41.

4. Rotirender Sektor (Talbot). Durch eine rasch rotierende undurchsichtige Scheibe mit einer Sektoröffnung, deren Größe meßbar verändert werden kann, wird eine Strahlung bis zur Gleichheit mit einer anderen abgeschwächt.

Ähnlich läßt sich eine verstellbare Sektorblende vor einem die Strahlen zusammenfassenden Objektiv benutzen (Kundt und Stenger).

Vergleichung sehr verschiedener Lichtstärken. Man vergleicht beide Lichtquellen mit einer Lampe, deren Helligkeit am besten etwa gleich dem geometrischen Mittel aus beiden Lichtstärken ist. Die beiden Helligkeitsverhältnisse sind mit einander zu multiplicieren.

## II. Durch Polarisation.

Passirt polarisiertes Licht einen Polarisator und bilden die Schwingungsrichtungen (oder was auf dasselbe hinauskommt, die Polarisationsrichtungen) beider den Winkel  $\varphi$  mit einander, so wird, von einem durch

Reflexion verloren gehenden Bruchteil abgesehen, der Bruchteil  $\cos^2\varphi$  durchgelassen (Malus).

1. Die eine Hälfte eines Gesichtsfeldes werde konstant durch polarisirtes Hilfslicht beleuchtet, die zweite Hälfte durch eine weniger helle Lichtquelle, welche mit einer anderen verglichen werden soll. Man betrachte dieses Gesichtsfeld mit einem Nicol. Die Hälften mögen gleich hell erscheinen, wenn des letzteren Schwingungsrichtung mit derjenigen des Hilfslichtes den Winkel  $\varphi_1$  bildet. Nun beleuchtet man mit der anderen Lichtquelle aus derselben Entfernung. Der Winkel  $\varphi_2$  bewirke die Gleichheit der beiden Hälften. Dann ist

$$i_1 : i_2 = \cos^2\varphi_1 : \cos^2\varphi_2.$$

2. Zwei Lichter werden senkrecht zu einander polarisirt und beleuchten so die beiden Hälften eines Gesichtsfeldes, welche durch einen drehbaren Nicol beobachtet werden. Man drehe letzteren so, daß die Helligkeit gleich erscheint. Sind  $\varphi_1$  und  $\varphi_2 = 90 - \varphi_1$  die Winkel, welche alsdann von der Schwingungsrichtung des Nicol mit denjenigen der beiden Lichtquellen eingeschlossen werden, so ist  $i_1 : i_2 = \cos^2\varphi_2 : \cos^2\varphi_1 = \operatorname{tg}^2\varphi_1$ . Fehlerquellen können durch Auswechseln der Lichtquellen erkannt und eliminirt werden (Zöllner).

3. Gleiche Mengen senkrecht zu einander polarisirten Lichtes mit einander gemischt verhalten sich wie gewöhnliches Licht. Man kann also die gleichen Mengen beider Teile durch ein Polarisoskop (z. B. Savart) an dem Ausbleiben der Interferenzerscheinungen erkennen (Arago; Wild, Pogg. Ann. 118, 193. 1863).

**Lichteinheit.** Während einiger Zeit konstant brennt eine Gasflamme mit Druckregulator oder etwa auf konstante Höhe gedreht; oder eine vor vielleicht einer halben Stunde angezündete Benzin- oder Petroleumlampe. Für längere Zeiträume kann eine elektrische Glühlampe, mit konstanter Spannung und nie länger als nötig gebrannt, eine unveränderte Lichtstärke gewähren.

Eine immer reproducirbare Lichteinheit herzustellen ist mit großen Schwierigkeiten verbunden. Das alte Mittel, die Normalkerze aus Wallrat, deren Flamme eine bestimmte Höhe haben soll (englische Kerze bei 45 mm Flammhöhe) und deren Verbrauch an Brennstoff die Wage kontrolirt, wird mehr und

mehr verlassen. In Deutschland ist jetzt die Hefner-Lampe<sup>1)</sup> mit Amylacetat gebräuchlich, welche an einem 8 mm dicken Docht eine Flamme von 40 mm Länge gibt (Elektrotechn. Z.-S. 1884 S. 20). — Die Leuchtkraft wird durch Kohlensäuregehalt der Luft beeinträchtigt.

Das von 1 qcm schmelzenden Platins ausgestrahlte Licht (Violle) als Einheit zu verwirklichen besteht geringe Aussicht.

Lummer und Kurlbaum schlagen glühendes festes Platin vor, dessen Temperatur aus dem Procentgehalt an solchen Strahlen definirt wird, die von einer Wasserschicht von bestimmter Dicke absorbirt werden. Berl. Sitz. Ber. 1894, 229.

### III. Stärke farbigen Lichtes im Spektrum.

1. Vergleichsfeld. An die Stelle der Skale im Spektralapparat (41) kommt eine horizontal verschiebbare Öffnung, die konstant beleuchtet wird (Petroleumlampe) und deren von dem Prisma zurückgeworfenes weißes Bild sich auf den zu untersuchenden Teil des Spektrums projicirt. Durch eine geeignete Kombination von Rauchgläsern schwächt man das Licht der Lampe bis zu einem solchen Bruchtheile ab, daß jenes Bildchen gerade nicht mehr auf dem Spektrum sichtbar ist. Diesem Bruchtheile wird die Lichtstärke in dem betreffenden Teil des Spektrums proportional gesetzt. Die Durchlässigkeit der Rauchgläser wird nach I, 1 oder 2 bestimmt. Haben mehrere Gläser die einzelnen Durchlässigkeiten  $d_1, d_2, d_3 \dots$ , so besitzen sie hintereinander gestellt die Durchlässigkeit  $d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots$ . Das Verfahren ist instrumentell einfach, aber unvollkommen.

2. Verstellbarer Spalt. Durch die beiden Hälften eines Spaltes, die einzeln zu gemessenen Breiten verstellbar sind, werden von zwei zu vergleichenden Lichtquellen zwei sich berührende Spektra entworfen. Sind an einer Stelle die Helligkeiten der Spektra gleich, so verhalten sich die Intensitäten für diese Farbe der Spektra nahe umgekehrt wie die Spaltbreiten. Große Helligkeitsunterschiede werden zuvor durch Rauchgläser abgeschwächt.

Über 1 u. 2 vgl. Vierordt, Pogg. Ann. 137, 200, 1869; 140, 172, 1870.

Ein Photometer mit verstellbaren Spalten an zwei Rohren

1) Die Phys.-techn. Reichsanstalt beglaubigt Hefner-Lampen.

unter Anwendung des Photometerwürfels (S. 228) siehe bei Lummer und Brodhun, Z. S. f. Instr. 1892, 132.

3. Spektro-Photometer mit Polarisatoren. Auch die unter II genannten Methoden lassen sich durch Einschieben von Prismen zur Vergleichung der Stärken der einzelnen Farben von Lichtquellen benutzen. Dies geschieht in den Spektrophotometern von Glan (Wied. Ann. 1, 351. 1877) und von Wild (ib. 20, 452. 1883).

Das Glan'sche Photometer hat einen in eine obere und eine untere Hälfte getheilten Spalt. In diese beiden Hälften treten die beiden zu vergleichenden Lichter ein, das eine etwa durch ein totalreflektirendes Prisma hineingeworfen. Auf dem Wege durch das Spaltrohr werden die beiden Lichter senkrecht zu einander polarisirt, die andere Schwingungskomponente von jedem ist abgeblendet.

Im Fernrohr erscheinen die Spektren beider Lichter übereinander; durch passendes Ausziehen des Spaltrohres bringt man sie an einer beliebigen Stelle zur Berührung. Durch verstellbare Schirme werden die Spektren bis auf den jeweiligen zur Untersuchung bestimmten Teil abgeblendet. Eine Skale erlaubt, gerade wie am Spektralapparat, die Farben durch Zahlen zu bezeichnen.

Vor dem Spaltrohr sitzt ein Teilkreis mit drehbarem Nicol, welchen man so stellt, daß die beiden Hälften gleich hell erscheinen. Findet man diese Gleichheit bei einem Drehungswinkel  $\varphi$  aus der Nullstellung des Nicol, so ist das Helligkeitsverhältnis der beiden Lichter  $= k \cdot \text{tg}^2 \varphi$ .  $k$  ist ein von 1 nicht sehr verschiedener Faktor, welcher aus ungleichen Schwächungen der beiden Lichter im Instrument entsteht.

Sonst wäre  $\cos^2(90 - \varphi) / \cos^2 \varphi = \text{tg}^2 \varphi$  das Verhältnis.

Die Nullstellung des Nicol kann aus dem Maximum der Dunkelheit gefunden werden, welches eine von den Hälften des Gesichtsfeldes bei dieser Stellung haben muß. Der Faktor  $k$  ergibt sich, wenn man beide Hälften, etwa durch eine Flamme hinter sehr homogenem Milchglas, gleich erleuchtet und auf gleiche Helligkeit einstellt, aus dem hierfür erforderlichen Drehungswinkel  $\varphi_0$  des Nicol als  $k = \text{ctg}^2 \varphi_0$ .

Über eine andere Anordnung des Photometers s. A. König, Wied. Ann. 53, 785. 1894.

#### IV. Bestimmung eines Absorptions-Koeffizienten mit dem Spekto-Photometer.

Wird von einer Lichtmenge  $s$  auf ihrem Wege von der Länge  $\delta$  durch einen Körper die kleine Menge  $\sigma$  absorbiert, so heißt  $\sigma/(s\delta) = A$  der Absorptionskoeffizient des Körpers für das betreffende Licht.  $A$  hängt von der Farbe ab. Bei der Durchstrahlung einer Dicke  $d$  wird die Intensität  $i$  des eintretenden Lichtes geschwächt zu

$$i' = i \cdot e^{-A \cdot d}.$$

Ist  $i/i'$  gemessen, so findet man also

$$A = \frac{1}{d} \log \text{nat} \frac{i}{i'} = \frac{1}{d} \cdot 2,30 \cdot \log \text{brigg} \frac{i}{i'}.$$

$i/i'$  wird nach dem vorigen gemessen, indem die eine Spalthälfte frei gelassen, die andere mit dem absorbierenden Körper bedeckt wird.

Lichtverlust bei Reflexionen. Mit jedem Durchtritt durch die Trennungsoberfläche zweier verschieden brechender Mittel ist eine Schwächung verbunden, indem von dem (senkrecht) einfallenden Licht der Bruchteil  $\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$  reflektiert wird (Fresnel), wo  $n$  das gegenseitige Brechungsverhältnis der Mittel ist. Für gewöhnliches Glas gegen Luft also ist  $[(n-1)/(n+1)]^2 = (0,5/2,5)^2 = \frac{1}{25}$ . Aus den bekannten  $n$  lassen sich die Schwächungen ausrechnen und die aus ihnen entspringenden Korrekturen anbringen. Man kann dieselben auch vermeiden, indem man sie auf beiden Wegen praktisch merklich gleich macht. Zu dem Zweck bedeckt man die beiden Spalthälften mit verschiedenen dicken, gleich begrenzten Schichten des Körpers und setzt die Differenz der beiden Dicken für  $d$  in Rechnung. Bei absorbierenden Gläsern kann man auch die eine Spalthälfte mit einem dünnen farblosen Glase bedecken und dann von der Schwächung absehen.

#### 47b. Messung einer Wärmestrahlung.

Die Energie einer Strahlung wird gemessen, indem man die Strahlung durch Absorption in einer mit Lampenrufs oder mit Platinschwarz (7, 18) überzogenen Fläche in Wärme umsetzt. Um an mehreren Flächen identische Absorption zu haben, muß man auf identische Herstellung derselben große Sorgfalt verwenden.

Größere Strahlungsmengen können direkt kalorimetrisch gemessen werden, z. B. im Pyrheliometer von Pouillet. Auch die Geschwindigkeit einer bestrahlten Crookes'schen Lichtmühle kann zur Beurteilung der Strahlung dienen.

Spektrale Zerlegung geschieht mit Steinsalz- oder Flussspat-Präparaten.

#### Thermosäule (Melloni).

Die eine Gruppe von Lötstellen wird geschwärzt und bestrahlt. Man mißt den ersten Ausschlag einer vorher ruhenden Galvanometernadel von mäfsiger Dämpfung und setzt die Strahlungsenergie diesem Ausschlage proportional.

Auch kann ein leichter Thermobügel, in einem starken magnetischen Felde aufgehangen, durch die Bestrahlung selbst zum Ausschlage verwendet werden (Radiomikrometer).

#### Bolometer (Langley).

Man benutzt die Widerstandsänderung eines dünnen Platin-, Eisen- oder Nickel-Drahtes oder Blechstreifens durch die bei der Einstrahlung entstehende Erwärmung. Platinbleche, mit einer zehnfach dickeren Silberschicht zusammengeschweisft, lassen sich auf  $\frac{1}{2000}$  mm Dicke auswalzen; nach dem Aufspannen auf einen Rahmen wird das Silber abgeätzt.

Der zu bestrahlende Draht bildet den Zweig einer von einem konstanten Strom durchflossenen Wheatstone'schen Brücke (71 b). Der Strom ist einige Zeit vorher geschlossen und das Galvanometer durch Abgleichen der Widerstände auf Null gebracht. Die Bestrahlung des einen Zweiges bewirkt einen der Strahlungsenergie nahe proportionalen ersten Ausschlag.

Um von Temperaturschwankungen unabhängig zu sein, werden die Materialien benachbarter Zweige gleich gewählt.

Doppelte Empfindlichkeit erreicht man durch gleichzeitige Bestrahlung gegenüberliegender Brückenzeige.

Über die Ausführung vgl. z. B. Lummer u. Kurlbaum, Wied. Ann. 46, 204. 1892.

### 47c. Erzeugung beliebig elliptischen Lichtes und Untersuchung eines Polarisationszustandes. Babinet's Kompensator.

#### Schwingungsformen des Lichtes nach dem Durchtritt durch eine Krystallplatte.

Geradlinig polarisirtes d. h. nur in einer Ebene schwingendes Licht von der Wellenlänge  $\lambda$  gehe durch eine Platte aus einem doppelbrechenden Krystall in einer anderen Richtung, als derjenigen einer optischen Axe. Die Schwingung zerfällt im Krystall in zwei auf einander senkrechte Komponenten. Die durch die Strahlenrichtung gehenden Ebenen, welche diese Komponenten enthalten, sollen die Hauptebenen heißen.

1. Fällt die Schwingungsrichtung des eintretenden Lichtes in eine der Hauptebenen, so wird das Licht nicht geändert.

2. Ebenso ist dasselbe nach seinem Austritt ungeändert, wenn der Gangunterschied der beiden Schwingungen im Krystall  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  etc. beträgt.

3. Der Gangunterschied betrage  $\frac{1}{2}\lambda$ ,  $\frac{3}{2}\lambda$  etc.; dann bleibt das austretende Licht geradlinig polarisirt, schwingt aber im allgemeinen in einer anderen Ebene als beim Eintritt. Bildete die Schwingungsrichtung vor dem Eintritt den Winkel  $\varphi$  mit einer Hauptebene, so bildet die Schwingungsrichtung des austretenden Lichtes mit derselben Hauptebene den gleichen Winkel  $\varphi$  nach der entgegengesetzten Seite. Specieller Fall:  $\varphi = 45^\circ$ ; das austretende Licht hat eine um  $90^\circ$  gedrehte Schwingungsrichtung.

4. Die Schwingung des eintretenden Lichtes sei gegen die Hauptebenen um  $45^\circ$  geneigt. Der Gangunterschied betrage  $\frac{1}{4}\lambda$ ,  $\frac{3}{4}\lambda$ ,  $\frac{5}{4}\lambda$  etc. Das austretende Licht ist cirkular polarisirt, d. h. die Bahnen der Äthertheilchen sind Kreise.  $\frac{1}{4}\lambda$ ,  $\frac{5}{4}\lambda$ , etc. gibt die Kreisbewegung entgegengesetzt wie  $\frac{3}{4}\lambda$ ,  $\frac{7}{4}\lambda$  etc. Ebenso wird die Schwingungsrichtung umgekehrt, wenn die Schwingungsebene des eintretenden Lichtes um  $90^\circ$  geändert wird.

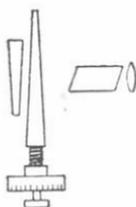
5. In allen anderen Fällen tritt elliptisch polarisirtes Licht aus. Wenn die Neigung der Schwingungsrichtung gegen die Hauptebenen  $45^\circ$  beträgt (vgl. Nr. 4), so sind die Ellipsen um so gestreckter bez. um so runder, je näher der Gangunterschied 0,  $\frac{1}{2}\lambda$ ,  $\lambda$ ,  $\frac{3}{2}\lambda$  etc. bez.  $\frac{1}{4}\lambda$ ,  $\frac{3}{4}\lambda$ ,  $\frac{5}{4}\lambda$  etc. beträgt. Vgl. auch die Figur S. 237. Das Axenverhältnis der Schwingungsellipse für den Gangunterschied  $k \cdot \lambda$  ist

$$a/b = \operatorname{tg} k\pi.$$

#### I. Erzeugung beliebig elliptischen Lichtes mit dem Kompensator.

Der Babinet'sche Kompensator gibt die Möglichkeit, in den Weg eines Lichtstrahles eine Krystallplatte von beliebiger wirksamer Dicke einzuschalten und hierdurch dem Lichte verschiedene Schwingungsformen zu erteilen.

Zu dem Zwecke sind hintereinander zwei sehr schwach keilförmige Quarzplatten von gleichem brechenden Winkel vorhanden, die in der Mitte gleich dick sind. Die Schneiden sind einander parallel auf entgegengesetzter Seite gelegen. Beide Keile haben die optische Axe parallel der einen Begrenzungsebene, der eine aber parallel der Schneide, der andere senkrecht dazu. Der längere Keil ist in seiner Richtung mittels einer Mikrometerschraube verschiebbar, deren Bewegung an einer Trommel abgelesen wird. Man visirt durch einen Okular-Nicol, dessen Polarisationssebene (größere Diagonale des Rhombus) um  $45^\circ$  gegen die Hauptschnitte der Quarze geneigt sei, mittels eines Okularfadens immer nach der Mitte des feststehenden kleineren Keils. Liegen an dieser Stelle gleich dicke Schichten der beiden Keile hintereinander, so tritt hier der durchgegangene Strahl ungeändert aus. Indem man den beweglichen Keil verschiebt, bewirkt man einen dieser Verschiebung proportionalen Gangunterschied der beiden Schwingungskomponenten.



Wert  $\varepsilon$  eines Trommelteils. Um den Trommelteil in Gangunterschied auszuwerten (selbstverständlich für Licht von einer bestimmten Wellenlänge), läßt man das betreffende Licht durch einen Nicol, dessen Polarisationssebene ebenfalls unter  $45^\circ$  gegen die Hauptschnitte geneigt ist, einfallen und beobachtet dasselbe mit dem Okular-Nicol. Wir wollen annehmen, daß die beiden Nicol gekreuzt sind. Irgendwo wird dann im Gesichtsfeld ein dunkler Streifen erscheinen, den man mit der Trommel auf den Faden einstellt. Die Trommelstellung sei jetzt  $= p_0$ . Dann dreht man die Trommel, bis der nächste dunkle Streifen auf dem Faden liegt. Die jetzige Trommelstellung (die ganzen Umdrehungen natürlich mitgezählt) sei  $= p_1$ . Dann entspricht also der Trommelunterschied  $p_1 - p_0$  gerade einer Wellenlänge, d. h. es bedeutet die Verschiebung um einen Trommelteil eine Änderung des Gangunterschieds um  $\lambda/(p_1 - p_0)$ , und es ist

$$\varepsilon = 1/(p_1 - p_0).$$

Für verschiedene Farben ist bei der geringen Dispersion des Quarzes  $\varepsilon$  ungefähr deren Wellenlänge umgekehrt proportional. Die umstehende Figur deutet die Schwingungszustände des durchgegan-

genen Lichtes in dem Bezirk zwischen zwei dunklen Streifen für den Fall an, daß das eintretende Licht von links oben nach rechts unten schwingt (d. h. daß, nach Fresnel, die kurze Diagonale des polarisirenden Nicol so gerichtet ist). In den dunklen Streifen ist das Licht ungeändert (2); mitten dazwischen ist durch Voraneilen um  $\frac{1}{2}\lambda$  linear polarisirtes Licht von einer um  $90^\circ$  gedrehten Schwingungsrichtung entstanden (3).

In je  $\frac{1}{4}$  Abstand von den Enden haben wir Voraneilen um  $\frac{1}{4}$  bez.  $\frac{3}{4}\lambda$ , also cirkular polarisirtes Licht etc.

In der einen Hälfte findet die Schwingung links-, in der anderen rechtsherum statt.



Wie man sieht, entspricht die Figur dem Falle, daß von links nach rechts gerechnet die horizontale Schwingungskomponente gegen die vertikale verzögert ist. Da nun im Quarz, als in einem positiven Krystall, der außerordentliche, parallel der optischen Axe schwingende Strahl der stärker verzögerte ist, so steht für unsere Figur die Schneide desjenigen Keils, dessen optische Axe in der Richtung des Keils liegt, links.

Axenverhältnis der Ellipsen. Die Ellipticität eines Lichtes ist durch das Verhältnis  $a/b$  der beiden Hauptaxen der Ellipse charakterisirt. Steht die Trommel auf dem Teilstrich  $p$ , so befindet sich in dem Fadenkreuz Licht von dem Axenverhältnis (vgl. oben Nr. 5).

$$a/b = \text{tg}[\varepsilon \cdot 180^\circ (p - p_0)].$$

Bestimmung des Nullpunktes. An den dunklen Stellen beträgt der Gangunterschied ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge; ob aber  $0, \lambda, 2\lambda \dots$ , kann man homogenem Licht nicht ansehen. Um denjenigen Streifen zu finden, in welchem der Gangunterschied  $0$  ist, d. h. wo die Quarze gleich dick sind, braucht man nur weißes Licht anzuwenden. Dann findet man nur einen wirklich dunklen Streifen, der eben den Nullpunkt bezeichnet. Die übrigen sind wegen der verschiedenen Wellenlänge der Lichtsorten gefärbt.

## II. Untersuchung der Schwingungsform eines Lichtes.

Wir setzen homogenes Licht voraus von eben der Farbe, welche im Vorigen angenommen, für welche also  $\varepsilon$  bestimmt wurde. Außerdem soll dieses Licht eine ganz bestimmte Schwingungsform haben, also nicht etwa natürliches Licht mit

polarisirtem gemischt sein, sondern Licht von einer bestimmten Schwingungsellipse, wie es etwa aus geradlinig polarisirtem nach dem Durchgang durch einen Krystall, z. B. Glimmer, entstanden ist.

Lage der Axen der Schwingungsellipse. Man stelle den Kompensator mit der Trommel genau auf den Punkt  $\frac{1}{4}\lambda$  (Fig. v. S.) ein, an welchem er geradlinig polarisirtes Licht in cirkularpolarisirtes verwandelt, mit anderen Worten nach S. 236 die Trommel auf den Teilstrich  $p_0 + 1/(4\epsilon) = p_0 + \frac{1}{4}(p_1 - p_0)$ . Nun richte man den Kompensator auf das zu untersuchende Licht. Der Kompensator sei um seine Seh-Axe drehbar. Bei dieser Drehung wandert der dunkle Streifen im allgemeinen; man drehe, bis er auf den Beobachtungsfaden fällt. Die beiden Hauptschnitte des Kompensators fallen in dieser Lage mit den beiden Axen der Schwingungsellipse zusammen. Den analysirenden Nicol dreht man dabei so, daß der Streifen immer möglichst kräftig bleibt. Wird der Faden bei keiner Stellung des Kompensators von einem Streifen erreicht, so drehe man den Analysator um  $90^\circ$ ; dann wird es der Fall sein.

Spezielle Fälle. 1. Ändert sich das Gesichtsfeld nicht, wenn man den ganzen Kompensator dreht, so bedeutet dies cirkularpolarisirtes Licht. Wird in diesem Falle der Analysator allein gedreht, so wechselt ein auf dem Faden liegender dunkler Streifen mit zwei beiderseitig in gleichem Abstände auftretenden ab. 2. Beobachtet man andererseits bei der Drehung des ganzen Kompensators anstatt der Wanderung der Streifen ein abwechselndes Auftreten von Streifen links und rechts symmetrisch vom Faden, so zeigt dies linearpolarisirtes Licht an.

Axenverhältnis der Ellipse. Um dieses zu bestimmen, drehen wir den Analysator sorgfältig in die Lage, bei welcher der Streifen möglichst dunkel ist. Die Polarisationsebene des Analysators bilde mit einem Hauptschnitt des Kompensators jetzt den Winkel  $\varphi$ , dann ist

$$\frac{\text{Axe parallel jenem Hauptschnitt}}{\text{Axe senkrecht zu jenem Hauptschnitt}} = \text{tg } \varphi.$$

Über die Theorie d. Bab. Kompensators, s. z. B. Dorn, im Anhang zu Neumann, Vorlesungen über Optik; C. Schmidt, Zeitschr. f. Instr.-Kunde, 1891, 439; und Wied. Ann. 45, 377. 1892.