

Ueber einen Spectralapparat zur Herstellung von intensivem monochromatischem Licht.

Von

E. A. Wülfing in Tübingen.

Mit Tafel VI und 18 Figuren im Text.

Inhalt.

	Seite
1. Einleitung	344
2. Brechungsexponent und Winkel der Prismen	346
3. Grösse und Bewegung der Prismen	351
4. Brennweite und Grösse der Linsen	363
5. Einstellung von Licht bestimmter Wellenlänge	366
6. Beleuchtung des Instrumentes und Helligkeit des erzielten monochromatischen Lichtes	369
A. Beleuchtung mit Sonnenlicht	372
B. Beleuchtung mit künstlichen Lichtquellen	379
a) Wie kann die Beleuchtungsstärke des Sonnenlichtes durch künstliche Lichtquellen erreicht werden?	380
b) Beleuchtungsstärke durch elektrisches Bogenlicht	387
c) Beleuchtungsstärke durch elektrisches Glühlicht und glühenden Platindraht	390
d) Beleuchtungsstärke durch DRUMMOND'sches Kalklicht, Gas-, Acetylen- und Petroleumlicht	395
e) Beleuchtungslinse für Collimatoren bei Verwendung künstlicher Lichtquellen	397
7. Schluss	403

1. Einleitung.

Vor zwei Jahren erschien in TSCHERMAK'S Mittheilungen ein Aufsatz¹, in welchem zwei Spectralapparate erwähnt sind, von denen der kleinere, dem FUESS'schen Goniometer Modell 2 angepasste, von mir und nachher auch in der von FUESS ausgeführten Form von C. LEISS² eine eingehendere Besprechung erfahren hat, während der grössere zwar auch abgebildet, aber nur kurz beschrieben wurde. Da dieser letztere Apparat eine weitere Verwendung zu finden scheint, so will ich die einzelnen Theile des Instrumentes und ihre Wirkungsweise ausführlicher schildern. Ferner mögen auch einige Abänderungen beschrieben werden, die zwar noch nicht ausgeführt worden sind, von denen sich aber mit Sicherheit sagen lässt, dass sie eine Verbesserung des Instrumentes bedeuten. Bei seiner Construction war an erster Stelle maassgebend, äusserst intensives monochromatisches Licht von möglichst verschiedenen Wellenlängen zu erhalten, damit die Untersuchung der Mineralien innerhalb weiterer Grenzen geschehen kann, als dies bei Anwendung von monochromatischen Flammen, GEISSLER'Schen Röhren und Strahlenfiltern bisher möglich war.

Auf eine genauere Besprechung der mechanischen Ausführung der einzelnen Theile glaube ich um so weniger eingehen zu sollen, als hierüber von LEISS kürzlich ein Aufsatz erschienen ist³; zur Orientirung mögen nur folgende Bemerkungen eingeschaltet werden.

Ein mit drei Stellschrauben versehener kräftiger Fuss *F* läuft nach oben in ein Rohr *R* (Fig. 1) aus, in welchem ein anderes Rohr *r* auf und nieder geschoben und durch die Klemmschraube *s* in jeder Lage festgehalten werden kann. Das Rohr *r* trägt einen Kasten *K*, in welchem zwei das

¹ E. A. WÜLFING: Apparate zur optischen Untersuchung der Mineralien und neue optische Bestimmungen am Diamant und Eisenglanz. TSCHERMAK'S Mineralogische und petrographische Mittheilungen. 15 (1896). p. 49—76.

² C. LEISS: dies. Jahrb. 1896. 2. p. 256—258.

³ C. LEISS: Spectralapparat nach E. A. WÜLFING zur Beleuchtung mit Licht verschiedener Wellenlänge. Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1898. p. 209—213. Mit 3 Figuren.

Spectrum erzeugende Prismen sich befinden. An der einen Seite dieses Prismengehäuses ist ein Rohr *A* befestigt, welches eine Linse und einen Spalt *e* trägt und als Collimator wirkt, es möge als Eintrittsrohr bezeichnet werden; an der anderen Seite befindet sich ebenfalls ein Rohr *B* mit einer Linse und einem Spalt *a*, das die Bezeichnung Austrittsrohr führen soll¹. (Vergl. auch Fig. 14 p. 362.)

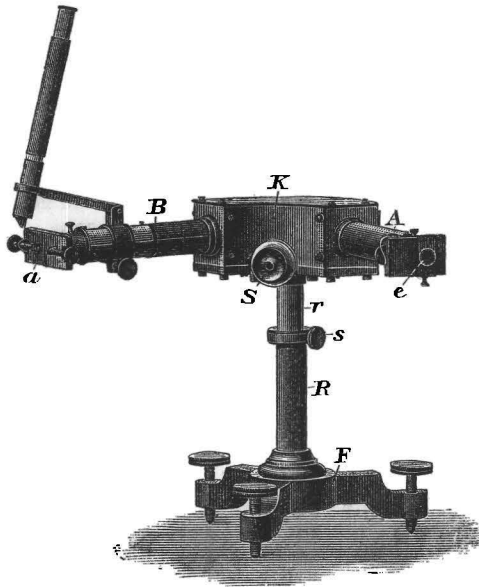


Fig. 1.

Der Hergang, wie mittelst dieses Instrumentes monochromatisches Licht jeder beliebigen Wellenlänge erzeugt werden kann, ist kurz folgender. Das durch den Eintrittsspalt eintretende Lichtbündel wird durch die Collimatorlinse in ein paralleles Bündel verwandelt, fällt auf die beiden Prismen, erfährt hier eine spectrale Zerlegung und gelangt alsdann in das zweite Rohr, wo in der Ebene des Austrittsspaltcs ein scharfes Spectrum entworfen wird. Von diesem Spectrum lässt man nur einen kleinen, der Breite des Austrittsspaltcs entsprechen-

¹ Das erste Modell des Instrumentes hat Herr Universitäts-Mechaniker ALBRECHT in Tübingen ausgeführt; es unterscheidet sich von dem in Fig. 1 abgebildeten Instrument nur in der Construction des Fusses.

den Theil austreten, um ihn dann als monochromatisches Licht zu verwenden. Die Strahlen dieses austretenden Lichtes dürfen, wenn sie eine bequeme Beobachtung ermöglichen sollen, ihre Lage im Raum nicht ändern und ebenso muss die Lage der in das Instrument eintretenden, von der Sonne oder von einer Lampe herrührenden Lichtstrahlen eine im Raum unveränderliche sein. Daher müssen Ein- und Austrittsrohr wie auch die beiden Spalte eine feste, unveränderliche Lage gegeneinander besitzen. Die verschiedenen Theile des Spectrums gelangen also nicht durch Bewegung der Rohre, sondern durch Bewegung der Prismen zum Austritt; ihre Strahlen können unter diesen Bedingungen die Prismen, da eben die Ablenkung eine constante, nämlich gleich der Neigung von Ein- und Austrittsrohr ist, nicht unter den Winkeln der Minimalablenkung durchlaufen, sie erfahren infolge dessen auch eine etwas grössere Lichtschwächung. Diese Lichtschwächung ist aber bei der nicht sehr grossen Bewegung, welche die Prismen machen müssen, um das ganze sichtbare Spectrum am Austrittsspalt vorbeizuführen, sehr klein, so dass es wohl gerechtfertigt ist, jene zweckmässigere Anordnung der unveränderlichen Lage von Ein- und Austrittsrohr trotz eines kleinen Lichtverlustes vorzunehmen.

Die Einstellung von Licht bestimmter Wellenlänge geschieht bei Beleuchtung mit Sonnenlicht mit Hülfe der FRAUNHOFER'schen Linien, deren Lage in der Mitte des Austrittspaltes mittelst einer Lupe oder eines schwach vergrössernden Mikroskops erkannt wird. Bei der Beleuchtung mit künstlichen Lichtquellen geschieht diese Einstellung vermöge einer Theilung, welche an einer die Prismen bewegenden Schraube angebracht ist.

2. Brechungsexponent und Winkel der Prismen.

Die beiden Prismen haben in den bisher ausgeführten Instrumenten (Combination I) je einen brechenden Winkel von 60° . Ihr Brechungsexponent stimmt bis auf wenige Einheiten der vierten Decimale mit dem einer Glassorte von SCHOTT und Gen. in Jena, nämlich mit dem gewöhnlichen

Silicatifint No. 36 O. 103 überein. Das Dispersionsvermögen ist innerhalb vier Decimalen das gleiche. Da ich nun den Ursprung meines Glases nicht genau kenne — es wurde aus einer der Rathenower Fabriken bezogen — das Jenaer Glas aber jederzeit leicht zu erhalten ist, so lege ich dem auf diese Prismen sich beziehenden Theil meiner Rechnungen die Brechungsexponenten, welche SCHOTT und Gen.¹ mittheilen, zu Grunde. Für diese Glassorte, wie auch für alle übrigen, sind die Brechungsexponenten nur bis zur G_1 -Linie in dem angeführten Verzeichniss mitgetheilt, für meine Rechnung bedarf ich aber der Bestimmungen von noch weiteren Linien, besonders der FRAUNHOFER'schen Linie H_1 und noch einer Linie jenseits des gewöhnlich sichtbaren Violetts z. B. der L-Linie, für welche die Werthe durch graphische Extrapolation sowie auch durch Vergleich mit einem Glase von ähnlichem Brechungs- und Dispersionsvermögen gefunden wurden². Die Brechungsexponenten des Glases No. 36 sind alsdann:

A_1 (Kalium α)	1,6099
C (Wasserstoff α)	1,6153
D (Natrium)	1,6202
F (Wasserstoff β)	1,6324
G_1 (Wasserstoff γ)	1,6428
H_1 (0,397 μ)	1,654
L (0,382 μ)	1,659.

Diese Werthe in Verbindung mit den brechenden Winkeln von 60° bestimmen nun den Winkel D, welchen die am Prismengehäuse fest angeschraubten Ein- und Austrittsrohre miteinander zu bilden haben. D berechnet sich aus der Minimalablenkung einer Linie, welche etwas jenseits des äussersten, noch gut sichtbaren violetten Lichtes liegt. Ich wähle dazu das Licht der L-Linie (von 0,000382 mm Wellenlänge), welche in einem Refractionsspectrum etwa so weit von H_1 wie H_1 von h entfernt ist. Man kann nun zu der Rechnung die bekannte Formel

¹ Productions- und Preisverzeichniss Juli 1886. 3. Ausgabe. Sommer 1893. Nachträge vom August 1888 und Januar 1892.

² In diesem Falle (Combination I) habe ich zum Vergleich ein schweres Flintglas von Rosette herangezogen vom spec. Gew. 3,615, welches von MASCART gemessen wurde. Ann. chim. phys. (4.) 14. (1868). s. a. LANDOLT und BÖRNSTEIN's Physikalisch-chemische Tabellen. 2. Aufl. (1894). p. 417.

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

verwenden, oder auch, was schliesslich auf das Gleiche hinausläuft, die aus Fig. 2 sich ergebenden Beziehungen der Winkel benutzen. D ist der gesuchte Winkel von Ein- und Austrittsrohr, δ der Winkel der Minimalablenkung für die L-Linie, i_0 der Einfallswinkel, α der brechende Winkel jedes Prismas, also 60° , n der Brechungsindex für L, also 1,659.

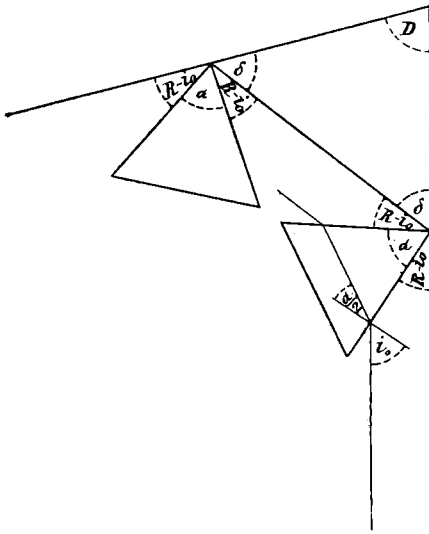


Fig. 2.

$$D = 2R - 2\delta$$

$$\delta = 2R - \alpha - 2(R - i_0)$$

$$\delta = 2i_0 - \alpha$$

$$\sin i_0 = n \cdot \sin \frac{\alpha}{2},$$

woraus folgt

$$D = 75^\circ 48,4'.$$

Ein- und Austrittsrohr bilden also einen spitzen Winkel miteinander. Bei Verwendung künstlicher Lichtquellen hat dies für die Aufstellung der Lampe und der Beobachtungs-

instrumente (Mikroskop, Axenwinkelapparat, Goniometer), sowie auch für den Beobachter selbst keine Unbequemlichkeiten zur Folge. Bei Verwendung von Sonnenlicht wird man aber besonders bei tiefen Fensternischen leicht durch die Wand gehindert, jene Instrumente bequem aufzustellen. Es scheint mir daher zweckmässiger, die brechenden Winkel der Prismen oder deren Brechungsindex oder beide so zu wählen, dass bei Minimalablenkung für die L-Linie die austretenden Strahlen senkrecht zu den eintretenden liegen oder allenfalls auch einen vom Rechten wenig abweichenden spitzen oder stumpfen Winkel mit diesen bilden. Auch dürfte die mechanische Ausführung des Apparates eine leichtere

sein, wenn die Prismen so gewählt werden, dass die beiden Rohre zu einander senkrecht stehen¹.

Es lassen sich natürlich sehr viele Combinationen zwischen Brechungsexponent und brechendem Winkel der Prismen ausrechnen, welche zu dem angestrebten Ziel führen. Als nächste Combination (II) will ich wieder zwei Prismen von 60° annehmen und den Brechungsexponenten für L berechnen, welcher einer Minimalablenkung von 90° entspricht. Nach der bekannten Formel:

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

ist also $\delta = 45^\circ$ anzunehmen, woraus sich dann

$$n = 1,5867$$

ergiebt. Unter den SCHOTT'schen Gläsern kommen No. 61 O. 522 und 63 O. 376 dieser Forderung am nächsten; es ist nämlich bei

$$\begin{aligned} \text{No. 61} & \dots \dots nL = 1,581 \\ \text{No. 63} & \dots \dots nL = 1,596^2 \end{aligned}$$

Danach berechnet sich der Winkel der Minimalablenkung δ , also auch der Winkel D der Rohre zu 91° 4,4' und 88° 14,7'. Mit diesen Glassorten wird man also der Forderung, dass Eintritts- und Austrittsrohr zu einander senkrecht stehen sollen, so nahezu gerecht, als dies für praktische Zwecke von Bedeutung ist. Von den beiden Gläsern wird man No. 63 nicht nur wegen des geringeren Preises, sondern auch wegen der grösseren Dispersion, wodurch also ein grösseres Spectrum erhalten wird, den Vorzug geben. Freilich erreicht die Länge des Spectrums noch nicht diejenige der ersten Combination.

¹ Bei dem nach DIPPEL's Angaben von ABBÉ verbesserten ROLLET'schen Spectropolarisator ist offenbar aus ähnlichen Gründen eine solche senkrechte Lage von Ein- und Austrittsrohr gewählt worden. DIPPEL, Handbuch der allgemeinen Mikroskopie. Braunschweig 1882. p. 620.

² Die Zahlen sind in der gleichen Weise wie bei dem Glas No. 36 gefunden worden. Zum Vergleich wurden herangezogen FRAUNHOFER's Crownglas Lit. M vom spec. Gew. 2,756. Ber. München. Akad. 5 (1814—1815) und ein leichtes Flintglas von GUINAND vom spec. Gew. 3,239, gemessen von MASCART, Ann. chim. phys. (4.) 14 (1868); s. a. LANDOLT-BÖRNSTEIN's Tabellen, p. 417.

Wollte man sich indessen hiermit nicht begnügen und bei diesem Glas No. 63 die beiden Rohre bei Minimalablenkung der äussersten violetten Strahlen genau senkrecht zu einander stellen, so könnte man den brechenden Winkel der Prismen auch etwas kleiner wählen. Wenn man aber schon einmal von dem so verbreiteten Winkel von 60° , der in der Technik am häufigsten und darum wohl am leichtesten genau hergestellt wird, abgeht, so kann man auch eine andere Glassorte wählen und für diese den passenden brechenden Winkel, der für die L-Linie eine Minimalablenkung von 45° ergibt, berechnen. Unter dieser Voraussetzung wird man dann aber auch ein stärker dispergirendes Glas anwenden, um die in Combination II geringer gewordene Dispersion wieder zu erhöhen. Abgesehen von den theuren und auch nicht so sehr widerstandsfähigen Gläsern mit hohem Brechungs- und Dispersionsvermögen käme wohl das schwere Silicatflintglas No. 39 O. 192 von SCHOTT und Gen. in Betracht. Für dieses Glas erhält man in ähnlicher Weise, wie dies oben geschehen ist¹, für den Brechungsexponenten der L-Linie

$$n_L = 1,721$$

und also nach der Formel

$$1,721 = \frac{\sin \frac{\alpha + 45}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

den brechenden Winkel

$$\alpha = 51^\circ 17'.$$

Die Brechungsexponenten dieses Glases auch für die übrigen Linien lauten:

A ₁ (Kalium α)	1,6608
C (Wasserstoff α)	1,6674
D (Natrium)	1,6734
F (Wasserstoff β)	1,6885
G ₁ (Wasserstoff γ)	1,7015
H ₁ (0,397 μ)	1,715
L (0,382 μ)	1,721

¹ Zum Vergleich wurde ein Flintglas von HOFMANN, bei welchem v. D. WILLIGEN, Arch. Musée Teyler 1 (1868), 2 (1869), die Bestimmungen wenigstens bis zur H-Linie ausgedehnt hat, herangezogen. Vergl. LANDOLT-BÖRNSTEIN's Tabellen, p. 417.

Zwei Prismen von der Glassorte No. 39, von denen jedes einen brechenden Winkel von $51^{\circ} 17'$ hat (Combination III), lenken also in der Minimalstellung das äusserste violette Licht um 90° ab. Um eine Vorstellung davon zu erhalten, wie genau bei senkrechter Ablenkung der brechende Winkel und der Brechungsexponent mit den obigen Zahlen übereinstimmen müssen, möge erwähnt werden, dass eine bis auf $10'$ fehlerhafte Herstellung des brechenden Winkels in dem Werth für die Minimalablenkung $13'$ und demnach in der Stellung der Rohre $26'$ ausmachen kann, und dass der gleiche Unterschied durch einen um drei Einheiten der dritten Decimale von obigem Brechungsexponenten abweichenden Werth erreicht wird. Es hat also in praktischer Hinsicht keine Schwierigkeit, die gewünschte Forderung zu erfüllen.

Schliesslich will ich noch angeben, wie sich die Dispersionen in den drei Combinationen zu einander verhalten. Ich wähle dazu die von SCHOTT mitgetheilten Brechungsexponenten und berechne den Winkelabstand der A_1 -Strahlen von den G_1 -Strahlen, wenn die letzteren ein Prisma in der Stellung der Minimalablenkung durchlaufen.

Combination	Glassorte	Brechender Winkel α	Winkel von Ein- und Austrittsrohr	Dispersion A_1 bis G_1
I	No. 36	60°	$75^{\circ}48'$	$3^{\circ}11'$
II	" 63	60°	$88^{\circ}15'$	$2^{\circ}20'$
III	" 39	$51^{\circ}17'$	$90^{\circ} 0'$	$2^{\circ}55'$

Das grösste Spectrum giebt die Combination I; ihr am nächsten steht die Combination III, welche ein nur um 9% kürzeres Spectrum entwirft und also praktisch den gleichen Werth hat, aber noch den Vorzug der senkrechten Stellung der beiden Rohre besitzt.

3. Grösse und Bewegung der Prismen.

Bei den meisten kleineren Spectralapparaten haben die Flächen der Prismen quadratische oder kreisrunde Form, obgleich die Projection des Querschnitts der Collimator- und Fernrohlinsen auf diese Prismenflächen elliptisch sind und demnach eine grössere Ausdehnung des Prismas in horizon-

taler als in verticaler Richtung nothwendig machen, wenn kein Lichtverlust eintreten soll. Es ist von Wichtigkeit, hierauf zu achten, wenn man wie in dem vorliegenden Fall die grösstmögliche Helligkeit erzielen will. Bei sehr vielen mineralogischen Untersuchungen, besonders bei Umwandlung des monochromatischen Lichtbüschels in einen Selbstleuchter mittelst einer matten Glastafel, muss man eben wenigstens für einen Theil des Spectrums eher eine zu geringe Beleuchtungsstärke als das Gegentheil befürchten.

Die verticale Ausdehnung der Prismen braucht nur un-erheblich grösser als die Öffnung der Collimatorlinse zu sein;

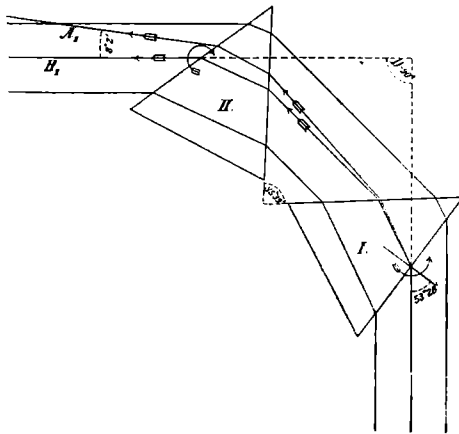


Fig. 3.

die horizontale Ausdehnung richtet sich aber nach der Art der drehenden Bewegung, welche die Prismen ausführen müssen, um alle Lichtarten des Spectrums an den Austrittsspalt gelangen zu lassen. Da, wie schon mehrfach hervorgehoben, Ein- und Austrittsspalt eine unveränderlich feste Lage besitzen sollen, so kann die Einstellung der verschiedenen FRAUNHOFER'schen Linien in die Mitte des Austrittsspalt nur durch Drehung der Prismen erfolgen. Zunächst ist es für eine zuverlässige mechanische Ausführung am einfachsten, wenn die Drehung der beiden Prismen aus der Minimalstellung in entgegengesetztem Drehungsinne, also symmetrisch zu Ein- und Austrittsrohr erfolgt, d. h. wenn

die Drehung des ersten Prismas in normalem, die des zweiten in anormalem Sinne oder die des ersten Prismas in anormalem

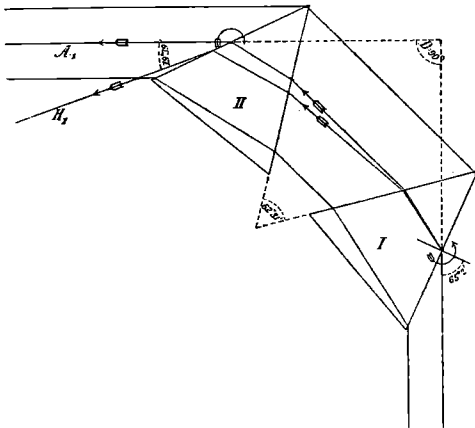


Fig. 4.

und die des zweiten in normalem Sinne stattfindet. In Fig. 3, 4, 5 und 6 sind die Verhältnisse für die Combination III,

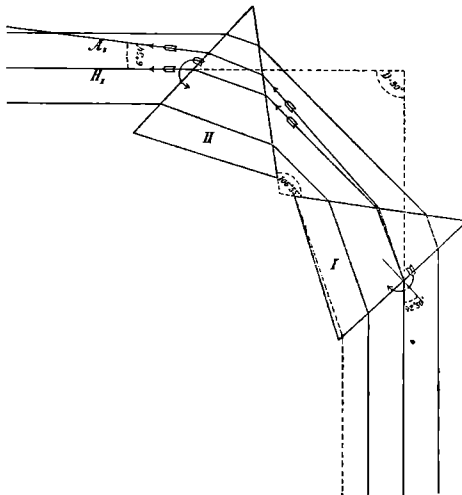


Fig. 5.

also für Glassorte No. 39 und für Prismen mit brechendem Winkel von $51^{\circ} 17'$ und genau senkrechter Lage von Ein- und Austrittsrohr dargestellt. Diese Figuren zeigen die Stellungen

der Prismen für die Fälle, dass die äussersten noch zu verwendenden rothen und violetten Strahlen, also diejenigen der A_1 - und H_1 -Linie senkrecht austreten, und zwar ist in den Figuren 3 und 4 diese Stellung bei anormaler Drehung von Prisma I, in Fig. 5 und 6 bei normaler Drehung dieses Prismas — die Minimalstellung für L-Licht als Anfangslage betrachtet — erreicht. Bei allen vier Figuren sind nur die mittleren mit Pfeilen versehenen Strahlen dispergirt gezeichnet. Der Vergleich von Fig. 4 und 6 zeigt deutlich, dass bei anormalem Drehungssinn von Prisma I die Prismen viel grösser sein

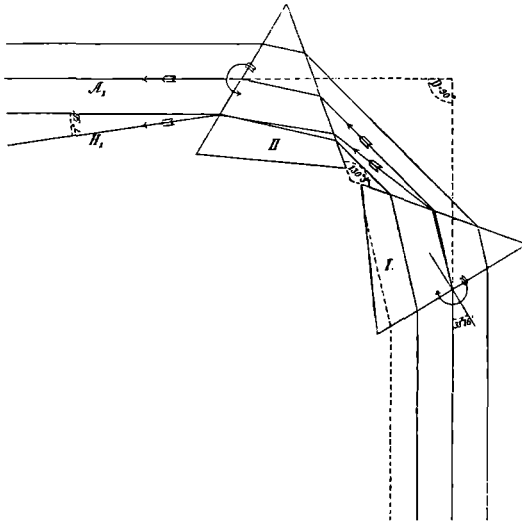


Fig. 6.

müssen, um ein Lichtbündel von gegebenem Querschnitt ohne Verlust abzulenken, als dies bei normaler Drehung der Fall ist.

Die Grösse der drehenden Bewegung, welche die Prismen auszuführen haben, damit die verschiedenen Theile des Spectrums an den Austrittsspalt gelangen, ist in den Tabellen p. 356 und 357 für die Linien A_1 , C, D, F, G_1 , H_1 , L angegeben. Die dort verzeichneten Winkel sind die Einfallswinkel, unter welchen die vom Collimator ausgesandten Strahlen die erste Fläche des ersten Prismas treffen müssen, damit die betreffende Lichtart durch die beiden Prismen um 90° abgelenkt wird. Die Winkel in Tabelle 1 beziehen sich auf normale, die in

Tabelle 2 auf anormale Drehung von Prisma I aus der Minimalstellung für violettes Licht¹.

¹ Das System von Gleichungen, welches zur Berechnung dieser Winkel benutzt wurde, ist folgendes (vergl. Fig. 7):

1. $\sin i_0 = n \cdot \sin e_0$
2. $\sin i_1 = n \cdot \sin e_1$
3. $e_0 + e_1 = \alpha$
4. $i_0 + i_1 = \delta + \alpha$
5. $i_1 - i_0 = 2x$

i_0 und i_1 , e_0 und e_1 sind die Einfallswinkel und Brechungswinkel an den beiden Flächen eines Prismas. α ist der brechende Winkel des Prismas und δ die Minimalablenkung für Licht der L-Linie. x ist gleich dem Winkel, um welchen das Prisma gedreht werden muss, um eine andere FRAUNHOFER'sche Linie einzustellen, so dass

$$\begin{aligned} J_0 &= i_0 + x \\ J_1 &= i_1 - x. \end{aligned}$$

Da nun

$$J_0 = J_1 = \frac{\delta + \alpha}{2}$$

ist, so lässt sich der Werth von x durch Probiren auf die Weise finden, dass man J_0 so lang um einen Winkel x vergrössert und verkleinert, bis die aus den Gleichungen 1 und 2 sich ergebenden

Werthe von e_0 und e_1 zusammen gleich α werden. Etwas einfacher gestaltet sich die Rechnung, wenn man die fünf Gleichungen nach x auflöst. Herr cand. math. MÜLSCHLEGEL hatte die Freundlichkeit, mich hierbei zu unterstützen.

$$\begin{aligned} \sin \frac{i_1 + i_0}{2} \cos \frac{i_1 - i_0}{2} &= n \sin \frac{e_1 + e_0}{2} \cos \frac{e_1 - e_0}{2}; \\ \sin \frac{\delta + \alpha}{2} \cdot \cos x &= n \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{e_1 - e_0}{2}; \\ \sin \frac{i_1 - i_0}{2} \cos \frac{i_1 + i_0}{2} &= n \sin \frac{e_1 - e_0}{2} \cos \frac{e_1 + e_0}{2}; \\ \sin x \cdot \cos \frac{\delta + \alpha}{2} &= n \sin \frac{e_1 - e_0}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}; \end{aligned}$$

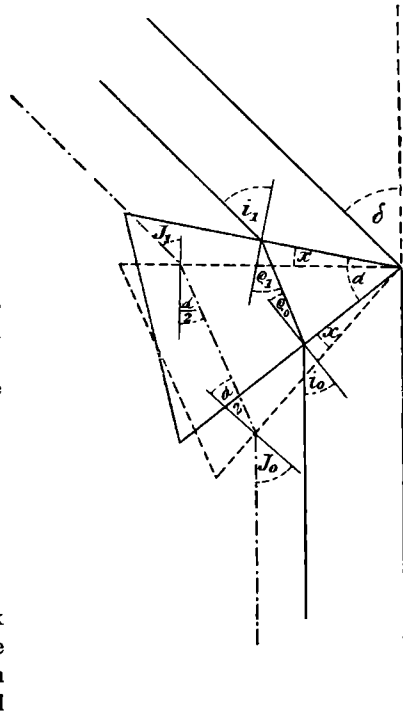


Fig. 7.

1. Einfallswinkel bei normaler Drehung von Prisma I.

	A ₁	C	D	F	G ₁	H ₁	L
Combination I Glas No. 36 Prismen von 60°	40° 50,9'	41° 42,9'	42° 33,2'	44° 53,1'	47° 19,9'	51° 13,9'	56° 2,9'
Combination II Glas No. 63 Prismen von 60°	38° 58,5'	39° 46,5'	40° 34,1'	42° 42,0'	44° 52,5'	47° 55,4'	52° 56,4'
Combination III Glas No. 39 Prism. v. 51° 17,4'	31° 15,7'	32° 13,7'	33° 9,2'	35° 46,7'	38° 35,7'	42° 49,7'	48° 8,7'

$$\left. \begin{aligned} \cos \frac{\varrho_1 - \varrho_0}{2} &= \frac{\sin \frac{\delta + \alpha}{2} \cdot \cos x}{n \sin \frac{\alpha}{2}} \\ \sin \frac{\varrho_1 - \varrho_0}{2} &= \frac{\cos \frac{\delta + \alpha}{2} \cdot \sin x}{n \cos \frac{\alpha}{2}} \end{aligned} \right\} \cotg^2 \frac{\varrho_1 - \varrho_0}{2} = \operatorname{tg}^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \cotg^2 x \cotg^2 \frac{\alpha}{2};$$

$$\left. \begin{aligned} \cos^2 \frac{\varrho_1 - \varrho_0}{2} &= 1 - \frac{\cos^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \cdot \sin^2 x}{n^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \\ \sin^2 \frac{\varrho_1 - \varrho_0}{2} &= \frac{\cos^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \cdot \sin^2 x}{n^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \end{aligned} \right\} \cotg^2 \frac{\varrho_1 - \varrho_0}{2} = \frac{n^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \sin^2 x} - 1;$$

$$\begin{aligned} \frac{n^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{\delta + \alpha}{2}} &= \sin^2 x + \operatorname{tg}^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \cdot \cos^2 x \cotg^2 \frac{\alpha}{2} \\ &= 1 - \cos^2 x + \operatorname{tg}^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \cos^2 x \cotg^2 \frac{\alpha}{2}. \end{aligned}$$

$$\cos^2 x = \frac{n^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \cos^2 \frac{\delta + \alpha}{2}}{\cos^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\delta + \alpha}{2} \cotg^2 \frac{\alpha}{2} - 1 \right)}.$$

2. Einfallswinkel bei anormaler Drehung von Prisma I.

	A ₁	C	D	F	G ₁	H ₁	L
Combination I Glas No. 36 Prismen von 60°	71° 14,9'	70° 22,9'	69° 32,6'	67° 12,7'	64° 45,9'	60° 52,9'	
Combination II Glas No. 63 Prismen von 60°	66° 54,5'	66° 6,5'	65° 18,5'	63° 10,6'	61° 0,5'	57° 59,5'	wie in Tab. 1.
Combination III Glas No. 39 Prism. v. 51° 17,4'	65° 1,7'	64° 3,7'	63° 8,2'	60° 30,7'	57° 41,7'	53° 27,7'	

Nach diesen beiden Tabellen ist für die Einstellung von der äussersten rothen bis zur äussersten noch deutlich sichtbaren violetten Linie, also von A₁ bis H₁ eine Drehung der Prismen von 10° 23', 8° 57' und 11° 34' erforderlich; für den am häufigsten gebrauchten Theil des Spectrums zwischen den Linien C und G₁ beträgt diese Drehung 5° 37', 5° 6' und 6° 22'. Die Tabellen zeigen nun ebenfalls, was schon aus der vergleichenden Betrachtung von Fig. 4 und 6 zu sehen war, wie ungünstig die Verhältnisse bei anormaler Drehung von Prisma I werden. Um dies noch besser zu erkennen, möge die zur vollständigen Brechung des von der Collimatorlinse ausgehenden Lichtbündels nothwendige horizontale Ausdehnung der Prismen durch die Öffnung der Collimatorlinse ausgedrückt werden. Erfolgt die Drehung von Prisma I in normalem Sinne, so ist die Neigung der dem Collimator zugekehrten Fläche bei der Einstellung für violettes Licht am grössten, erfolgt die Drehung umgekehrt, so treten die gleichen Verhältnisse bei der Einstellung für rothes Licht ein. Aus den zugehörigen Einfallswinkeln berechnet sich sodann die horizontale Ausdehnung der Prismenfläche (B), in Einheiten des Durchmessers der Collimatorlinse (ω) ausgedrückt, nach der Formel,

$$B = \frac{\omega}{\cos i}$$

folgendermaassen :

	bei normaler Drehung von Prisma I	bei anormaler Drehung von Prisma I
Combination I	1,60	3,11
„ II	1,49	2,55
„ III	1,36	2,37

Beispielsweise würde bei einer Collimatorlinse von 24 mm Durchmesser für Combination III, um nur diese herauszugreifen, bei anormaler Drehung die polirte Prismenfläche eine horizontale Ausdehnung von 57 mm haben müssen, damit bei der Einstellung der A_1 -Strahlen kein Lichtverlust erfolgt. Bei umgekehrter Drehung braucht jene Fläche für den gleichen Collimator eine horizontale Ausdehnung von nur 34 mm zu haben. Nach den obigen Coëfficienten würde man $32\frac{1}{2}$ mm erhalten; es ist aber noch zu berücksichtigen, dass bei normaler Drehung die zweite Fläche von Prisma I von dem Lichtbündel in grösserem Querschnitt als die erste Fläche getroffen wird. Es muss also das Prisma etwas grösser sein, damit die linke Seite des Lichtbündels nicht die mattgeschliffene Fläche des Prismas berühren, eine unregelmässige Zerstreuung erfahren und eine störende Aufhellung des Gesichtsfeldes hervorrufen kann (vergl. Fig. 5 und 6 die punktirten Linien links).

Für die Ausführung der normalen Drehung von Prisma I spricht aber auch noch ein anderer Umstand, welcher damit zusammenhängt, dass bei der Drehung eines Prismas aus der Stellung der Minimalablenkung das Spectrum ganz verschiedene Breiten erhält, je nachdem die Drehung in dem einen oder anderen Sinne ausgeführt wird. Um den Unterschied dieser Breiten der Spectren bei verschiedenem Drehungssinn der Prismen zu erkennen, mögen die Verhältnisse bei Combination III etwas eingehender besprochen werden. Die erste der folgenden Tabellen enthält die Winkel, um welche die verschiedenen Strahlen des Spectrums nach ihrem Austritt aus dem zweiten Prisma von einander abweichen, und zwar sind diese Winkel von der Mittellinie des Austrittsrohres aus, also von jenem Strahl, welcher den Austrittsspalt trifft, gezählt. In der zweiten Tabelle sind die Abstände der FRAUNHOFER'schen Linien, wie sie durch eine Linse von 200 mm Brennweite (s. folgenden Abschnitt) entworfen werden, in Millimetern angegeben.

Winkelabstände der verschiedenfarbigen Strahlen von der
Axe des Austrittsrohres.

Combination III Glassorte No. 39	Im Aus- tritts- spalt liegt	A ₁	C	D	F	G ₁	H ₁	L
Bei anormaler Drehung von Prisma I	A ₁	0° 0,0'	1° 30,6'	2° 58,4'	7° 9,0'	11° 44,8'	19° 39,3'	—
	H ₁	8° 2,1'	7° 8,0'	6° 17,8'	4° 7,0'	2° 9,2'	0° 0,0'	—
Bei normaler Drehung von Prisma I	A ₁	0° 0,0'	0° 50,2'	1° 37,2'	3° 42,8'	5° 40,9'	7° 56,3'	—
	D	1° 33,0'	0° 45,1'	0° 0,6'	1° 58,1'	3° 47,0'	5° 49,0'	—
	F	3° 23,3'	2° 36,7'	1° 53,4'	0° 0,0'	1° 43,0'	3° 36,0'	—
	H ₁	6° 53,6'	6° 6,5'	5° 23,2'	3° 30,6'	1° 49,6'	0° 0,0'	0° 49,8'

Längenabstände der FRAUNHOFER'schen Linien A₁ bis H₁ in mm bei
einer Linse des Austrittsrohres von 200 mm Brennweite.

Combination III Glassorte No. 39	Im Aus- tritts- spalt liegt	A ₁	C	D	F	G ₁	H ₁	L
Bei anormaler Drehung von Prisma I	A ₁	0,00	5,28	10,38	25,08	41,58	71,44	—
	H ₁	0,00	3,22	6,18	13,84	20,72	28,24	—
Bei normaler Drehung von Prisma I	A ₁	0,00	2,92	5,66	12,98	19,90	27,88	—
	D	0,00	2,80	5,42	12,30	18,64	25,80	—
	F	0,00	2,72	5,24	11,84	17,84	24,42	—
	H ₁	0,00	2,78	5,32	11,92	17,80	24,18	27,08

Die in der letzten Tabelle angeführten Abstände der FRAUNHOFER'schen Linien von einander sind in Fig. 8—13 p. 360 in wirklicher Grösse gezeichnet. Die Pfeile geben die Lage des Austrittsspalt an. Die Figuren 8 und 9 beziehen sich auf anormale, die Figuren 10—13 auf normale Drehung von Prisma I. In ersterem Fall hat das Spectrum bei Austritt von A₁-Licht die Länge von Fig. 8, bei Austritt von H₁-Licht die Länge von Fig. 9, im letzteren Fall haben die Spectren bei Austritt von A₁-, D-, F- und H₁-Licht die Längen von Fig. 10—13. Aus diesen Figuren ersieht man, dass die durch die beiden Prismen erzeugte Dispersion viel gleichmässiger bei normaler als bei anormaler Drehung von Prisma I verläuft.

Es können aber noch andere Erwägungen für eine normale Drehung von Prisma I und demnach eine anormale Drehung von Prisma II aus der Minimalstellung für L-Licht in Betracht kommen. Da von jedem Spectrum nur die Theile, welche in der

Nähe des austretenden Strahles liegen, Berücksichtigung finden und also bei anormaler Drehung das eigentlich zur Verwendung kommende Spectrum sich aus dem linken Ende von

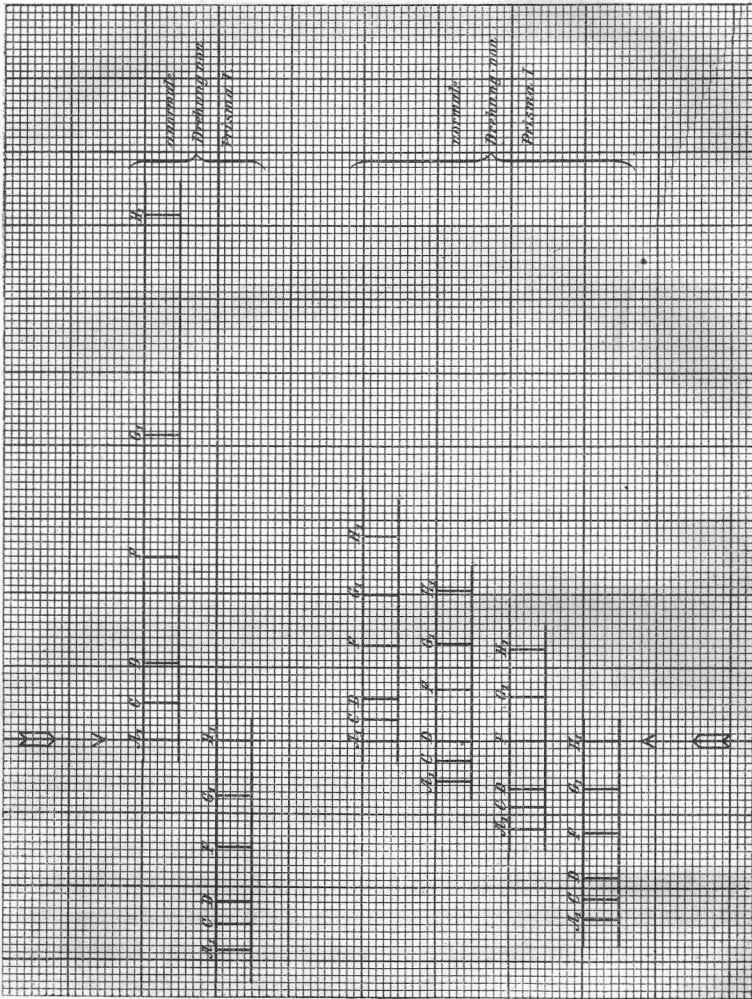


Fig. 8. Fig. 9.

Fig. 10. Fig. 11. Fig. 12. Fig. 13.

Fig. 8 und dem rechten Ende von Fig. 9 zusammensetzt, so würde man hier ein Spectrum anwenden, in welchem das Roth aussergewöhnlich stark dispergirt wäre. Nun aber erfolgt wohl die Änderung der optischen Constanten in den

Krystallen im Grossen und Ganzen proportional der Verschiebung der Linien in einem Refractionsspectrum, d. h. also die Änderung ist von A_1 bis D ungefähr so gross, wie von D bis F, wie von F bis G_1 und von G_1 bis H_1 , wie eben im Durchschnitt die Linien A_1 , D, F, G_1 , H_1 in einem gewöhnlichen Refractionsspectrum etwa gleichweit von einander abstehen. Das combinirte Spectrum, welches man aus den verschiedenen Stücken der bei den verschiedenen Einstellungen gewonnenen Einzelspectren construiren kann, sollte daher auch wenigstens ungefähr mit einem gewöhnlichen Refractionsspectrum übereinstimmen. Bei anormaler Drehung ist dies nach Fig. 8 und 9 keineswegs der Fall. Das rothe Ende des combinirten Spectrums wird nahezu doppelt so stark dispergirt, als es bei einem gewöhnlichen Refractionsspectrum der Fall ist, und die Lichtstärke würde dementsprechend für die rothen Strahlen etwa viermal geringer ausfallen. Bei den in Fig. 10—13 gezeichneten Spectren liegen die Verhältnisse viel günstiger und daher ist die Drehung von Prisma I aus der Minimalstellung für L in normalem Sinne, bei welcher überdies, wie bereits oben erörtert, viel kleinere Prismen erforderlich sind, unbedingt vorzuziehen.

Überhaupt ändert sich die Länge der Spectren bei normaler Drehung so wenig, dass eine Verzerrung und undeutliche Abbildung der FRAUNHOFER'schen Linien bei dieser eigenthümlichen Art der Prismenbewegung nicht gross sein kann, womit auch die Beobachtung vollständig übereinstimmt. Das Instrument ist daher auch als recht guter Spectralapparat zu gebrauchen, wenn man den Austrittsspalt durch ein etwa zwei- bis fünfmal vergrösserndes Ocular ersetzt¹. Wenn man sich begnügt, kleinere Theile des Spectrums auf einmal zu übersehen, so erlaubt der Apparat auch viel stärkere Vergrösserungen anzuwenden, so dass man schon viele Details der Linien wahrnehmen kann. Bei einer etwa 50fachen Vergrösserung mittelst des Mikroskopes konnte ich zwischen den Linien A, a, B, C, D, E, b, F, G, h, H_1 , H_2 mindestens 6, 3, 4, 21, 31, 13, 43, 91, 62, 31, 7, also in summa über

¹ Wie dies auch schon TUTTON für seinen Apparat vorgeschlagen hat. (Philosoph. Trans. 185. 1894. p. 922; Zeitschr. f. Kryst. 24. 1895. p. 463.)

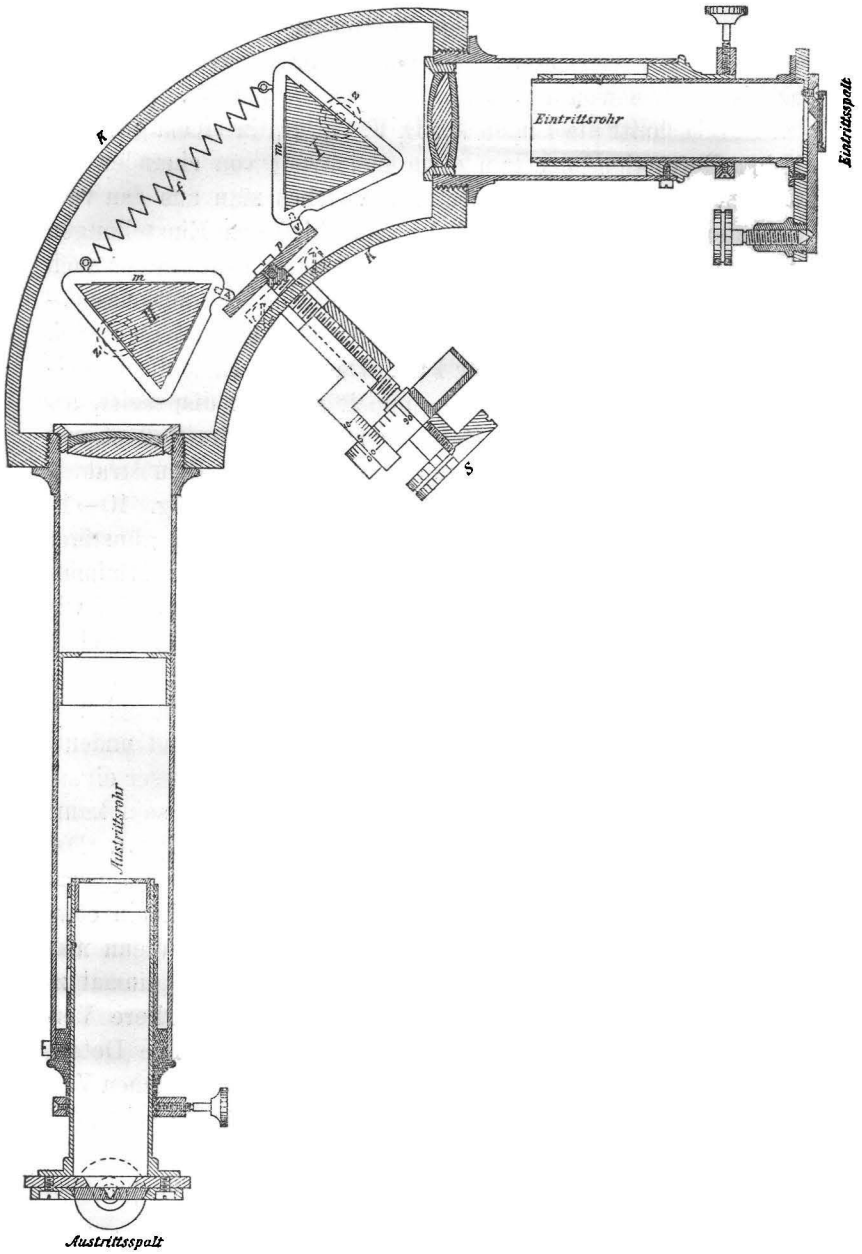


Fig. 14. $\frac{1}{3}$ der wirklichen Grösse.

300 Linien deutlich und dazwischen noch ein ganzes Gitterwerk verwaschener Linien wahrnehmen. Bei Einschaltung einer Indigolösung liessen sich auch noch jenseits A_1 und besonders jenseits H_2 viele Linien erkennen.

Die mechanische Ausführung der Prismenbewegung habe ich in folgender Weise herstellen lassen. Jedes Prisma ist auf einer Metallplatte m (Fig. 14)¹, welche unten an der Seite einen conischen Zapfen z trägt, befestigt, und dieser um eine verticale Axe sich drehende Zapfen liegt in einer passenden Ausbohrung der Grundplatte des Gehäuses K . Die Verlängerung der Drehaxe des Zapfens von Prisma I liegt in der dem Collimator zugekehrten Fläche dieses Prismas und befindet sich in der Mitte vor der Linse des Eintrittsrohres; für die Drehaxe von Prisma II gilt das Gleiche mit Bezug auf die Linse des Austrittsrohres. Die zugekehrten Ecken der Grundplatten der beiden Prismen tragen Vorsprünge v , welche gegen eine durch die Schraube S vor- oder rückwärts bewegliche Platte p stossen. Damit diese Vorsprünge immer fest an der Schraubenplatte anliegen, sind die äusseren Ecken der Prismenplatten durch eine Spiralfeder f , welche bestrebt ist, diese Ecken einander zu nähern und demnach die Vorsprünge v gegen p zu drücken, verbunden.

4. Brennweite und Grösse der Linsen.

Die Lichtstärke der einzelnen Theile des Spectrums hängt an erster Stelle von der Lichtquelle ab und ist am grössten bei der Beleuchtung mit Sonnenlicht, welches durch eine Linse auf den Eintrittsspalt concentrirt wird. Hierbei ist aber auf die Apertur des Collimators und der Beleuchtungslinse zu achten. Beträgt der Radius der Beleuchtungslinse R und ihre Brennweite F , und ist demnach die Tangente ihres halben Öffnungswinkels $= \frac{R}{F}$, so sollten ungefähr die gleichen Verhältnisse bei der Collimatorlinse vorhanden sein, wobei zu bemerken ist, dass die Einstellung erleichtert wird, wenn die Beleuchtungslinse eine etwas grössere Apertur besitzt. Wenn man indessen eine einfache biconvexe Linse zur Beleuchtung anwendet, was

¹ Herr C. LEISS hatte die Freundlichkeit, Fig. 14 nach meinen Angaben und Skizzen auszuführen.

wohl meistens der Fall ist, so kann man bei einer solchen das Verhältniss $\frac{R}{F}$ für den Collimator genau einhalten, da infolge der chromatischen und sphärischen Aberration die Apertur schon reichlich vergrössert wird. Je grösser man die Brennweite der Beleuchtungslinse wählt, um so grösser ist natürlich auch das Sonnenbild, welches auf dem Spalt entworfen wird; die Intensität dieses Sonnenbildes ist aber pro Flächeneinheit bei gleicher Apertur der Linse immer die gleiche (vergl. p. 375) und kann nur durch Vergrösserung der Apertur gesteigert werden. Man wird daher der Collimatorlinse eine möglichst grosse Apertur, d. h. eine möglichst kleine Brennweite im Verhältniss zu ihrer Öffnung zu geben haben und am besten ein dreifaches STEINHEIL'sches Fernrohrobjectiv (eine Crown-glaslinse zwischen zwei Flintglas-Menisken) mit dem Öffnungsverhältniss $\frac{R}{F} = \frac{r}{f} = \frac{1}{3}$ anwenden, wo r und f den Radius und die Brennweite der Collimatorlinse bedeuten¹. Man würde ganz kleine Linsen dieser Art mit kurzer Brennweite anwenden können, wenn man nicht befürchten müsste, den kleinen Collimator zu stark zu erwärmen, was besonders bei concentrirtem Sonnenlicht eintreten kann, und wenn ferner bei kurzen Collimatoren nicht der Spalt auch entsprechend schmal sein müsste, um ein scharfes Spectrum zu entwerfen. Von den STEINHEIL'schen dreifachen Objectiven möchte ich besonders solche von 20—27 mm Öffnung und entsprechender vierfacher Brennweite empfehlen². Nur wäre es erwünscht, diese Linsen nicht für die Linien D und F zu achromatisiren, wie das meines Wissens gewöhnlich geschieht, sondern etwa für die C- und G-Linien; dasselbe gilt auch für die weiter unten besprochene Linse des Austrittsrohres. Die Kostbarkeit dieser Linsen wird durch die damit erzielte viel intensivere

¹ Bei den bisher ausgeführten Instrumenten der hier besprochenen Construction verhielt sich der Radius der Collimatorlinse zu ihrer Brennweite etwa wie 1:14, bei dem kleineren dem FUESS'schen Goniometer, Modell II angepassten Apparat (vergl. Einleitung p. 344) aber wie 1:7½. Die Linse an diesem kleineren Spectralapparat entspricht fast genau der in Fig. 14 im Eintrittsrohr abgebildeten, wenn man dieselbe als in wirklicher Grösse gezeichnet annimmt.

² C. A. STEINHEIL Söhne, Preisliste über Instrumente für Astronomie und Physik. 1894. p. 2. B. No. 5 u. 6.

Beleuchtung reichlich aufgewogen. Bei diesen Linsen ist wie gesagt die Tangente des halben Öffnungswinkels gleich $\frac{1}{8}$, bei zweifachen Objectiven würde dieser Werth aber auf $\frac{1}{16}$, und bei weniger guten Fabrikaten sogar auf $\frac{1}{20}$ heruntergehen müssen, wenn man von den Linsen noch eine scharfe Abbildung erwartet.

Dementsprechend verhalten sich auch die Querschnitte der vom Heliostaten ausgesandten Lichtbündel, welche durch die gleiche Beleuchtungslinse auf dem Spalt concentrirt werden und welche von jenen Linsen noch aufgenommen werden können, zu einander wie die Quadrate jener Werthe für die Tangenten der halben Öffnungswinkel, also wie $\frac{1}{8}^2$ zu $\frac{1}{16}^2$ zu $\frac{1}{20}^2$ oder wie zu 1 zu $\frac{1}{4}$ zu $\frac{1}{6}$. Die Verwendung gewöhnlicher zweitheiliger gegenüber den dreitheiligen Linsen hat also eine Verringerung der Lichtintensität um das 4—6fache zur Folge. Jene Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ eignet sich auch dazu, das Licht einer Gaslampe mit oder ohne Glühkörper vollständig auszunutzen. Da nämlich diese Lampen mindestens einen Durchmesser von 25 bis 30 mm haben, so geben sie die erforderliche Apertur in einem Abstand von 100—120 mm, und in diesem Abstand lässt sich immer eine solche Lampe vor dem Spalt aufstellen¹.

¹ Solange man derartige Lampen zur Beleuchtung verwenden und sie auf nicht weniger als 100 mm dem Spalt nähern will, bringt ein Collimator von noch grösserer Apertur keine Vortheile. Andernfalls, wenn man also durch weitere Näherung der Lampe keine zu grosse Erwärmung des Instrumentes befürchtet, könnte man vorschlagen: Dreitheilige Objective von PETER SCHÜLL (Erzeugnisse der Präcisionswerkstätte für Optik. Bockenheim-Frankfurt a. M. 1894, p. 4), Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{6}$. STEINHEIL'sche aplanatische Lupen (l. c. p. 10), Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{7}{38}$, oder gar STEINHEIL'sche Lupen erweiterter Construction (CARL ZEISS, Mikroskope und mikroskopische Hilfsapparate. Jena 1895, p. 103), Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{3}$. Wenn auch die letzteren beiden Lupen nicht für Zwecke, wie sie hier verfolgt werden, construirt sind, so weiss ich doch von der einen, dass sie sehr wohl dazu dienen kann, von der zuletzt erwähnten möchte ich es vermuthen. Die Lichtstärke eines STEINHEIL'schen Objectives mit der Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ verhält sich zur Lichtstärke dieser drei Constructionen wie

$$\left(\frac{1}{8}\right)^2 : \left(\frac{1}{6}\right)^2 : \left(\frac{7}{38}\right)^2 : \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 9 : 16 : 19\frac{1}{2} : 64.$$

Es würde sich also hiernach die Lichtstärke noch um das 7fache steigern lassen.

Die Brennweite der Linse des Austrittsrohres, welche bei den sonstigen Spectralapparaten das Objectiv des Beobachtungsfernrohres bildet und welches mit einem passenden RAMSDEN'schen oder HUYGHENS'schen Ocular combinirt auch hier, wie schon oben p. 361 gesagt, die gleichen Dienste leisten kann, richtet sich nach der gewünschten Länge des Spectrums, also nach dem in mm gemessenen Abstand der Linien A_1 und H_1 . Bei der Combination III bewegt sich die Winkeldispersion dieser Linien von $6^\circ 54'$ bis $7^\circ 56'$. Nennen wir die gewünschte Länge des Spectrums L , die Brennweite der Linse des Austrittsrohres f' , so haben wir die Beziehung

$$L = f' \cdot \operatorname{tg} 6^\circ 54' \text{ bis } f' \cdot \operatorname{tg} 7^\circ 56'.$$

Eine Länge des Spectrums von etwa 25 mm glaube ich als passend bezeichnen zu können, so dass die Brennweite der Linse etwa 200 mm betragen sollte. Das Spectrum hätte dann bei Einstellung der A_1 -Linie eine Länge von etwa 28 mm, bei Einstellung der H_1 -Linie eine Länge von etwa 24 mm. Der Durchmesser der Linse mag gleich dem der Collimatorlinse sein; wenn man also diese von 20—27 mm Durchmesser wählt, so bedarf man für die Linse des Austrittsrohres einer solchen von der Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ bis $\frac{1}{6}$ und muss also kein dreitheiliges, sondern kann ein zweitheiliges Objectiv z. B. C No. 18 und 19 der STEINHEIL'schen Preisliste verwenden.

5. Einstellung von Licht bestimmter Wellenlänge.

Vor der Linse des Austrittsrohres befindet sich in der Entfernung ihrer Brennweite ein Spalt, der schon mehrfach als Austrittsspalt erwähnt wurde¹. Dieser Spalt lässt nach

¹ Die von Herrn Universitätsmechaniker EUG. ALBRECHT herrührende Construction des Collimatorspaltes wurde in meiner früheren Arbeit, auf welche ich wegen der Einzelheiten verweisen möchte (TSCHERMAK's Mitth. 15. p. 57), schon abgebildet und beschrieben. Nur will ich hier betonen, dass es wesentlich darauf ankommt, die Schraube in einen recht spitzen Kegel auslaufen zu lassen und auch die conische Vertiefung, gegen deren Wand die Schraubenspitze drückt, ähnlich zu gestalten. In Fig. 14, p. 362 ist dieser Kegel, welcher links am Eintrittsspalt zu erkennen ist, etwas zu stumpf gezeichnet. Je spitzer sein Scheitelwinkel ist, um so leichter ist eine Feinbewegung am Spalt auszuführen. Dieser Scheitelwinkel sollte weniger als 60° betragen.

einer schon oft vorgeschlagenen und seit langer Zeit gebräuchlichen Methode¹ einen so kleinen Theil des Spectrums austreten, dass derselbe als monochromatisch angesehen werden kann. Die Mitte des sich nach beiden Seiten erweiternden Spaltes ist durch einen aus der unteren Fassung hervorragenden Zahn markirt und die Einstellung geschieht bei Sonnenlichtbeleuchtung, indem man eine bestimmte FRAUNHOFER'sche Linie durch Bewegung der Prismen an die Stelle jenes Zahnes bringt. Man führt diese Einstellung durch eine schwach vergrößernde Lupe oder durch ein ebenso schwach vergrößerndes Mikroskop aus. Da aber die Beobachtung nicht in der Richtung der austretenden Strahlen erfolgen kann, weil man hier durch die mit monochromatischem Licht beleuchteten Instrumente (Mikroskop, Goniometer und Axenwinkelapparat) gehindert ist, so geschieht sie mit Hilfe eines total reflectirenden Prismas von oben oder von der Seite.

Um über die Lage einer FRAUNHOFER'schen Linie nicht im Zweifel zu sein, wird der Spalt vorübergehend weit d. h. auf einige Millimeter geöffnet. Neuerdings hat Herr LEISS an dem Austrittsspalt eine Verbesserung angebracht², indem er die symmetrisch zur Mittellinie erfolgende Öffnung durch Bewegung einer einzigen Schraube erreicht. Zur schnellen Einstellung ist auch bei diesem Spalt der Zahn, welcher die Mitte angiebt, nicht fortzulassen. Besser wäre es wohl, den Spalt auf der unteren Seite mit einem Glas zu bedecken, welches zwei etwa $\frac{1}{2}$ mm von einander abstehende Linien trägt. Mitten zwischen diese Linien, welche ihre Lage also immer unver-

¹ Die Methode ist so einfach, dass jeder Forscher, der starkes monochromatisches Licht von sehr verschiedener Wellenlänge gebrauchen will, darauf verfallen muss. Es mögen hier nur einige Autoren, welche diese Methode angewandt haben, genannt werden: L. FOUCAULT, Pogg. Ann. **88**. 1853. p. 386; auch MOIGNO's Cosmos. **2**. 1853. p. 232. — HELMHOLTZ, Pogg. Ann. **94**. 1855. p. 1—28; auch Handbuch der physiologischen Optik. 2. Aufl. 1896. p. 352. — LIPPICH, Sitzber. d. Wien. Akad. **91**. 1885. p. 1070; auch LANDOLT, Das optische Drehungsvermögen organischer Substanzen. Braunschweig 1898. p. 384. — ABNEY, Philosoph. Magaz. **20**. 1885. p. 172 bis 174, Philosoph. Trans. **177**. 1887. p. 423—426. — TUTTON, Philosoph. Trans. **185**. 1894. p. 913—941. Übersetzung in Zeitschr. f. Krystallogr. **24**. 1895. p. 455—474.

² Zeitschr. f. Instr. 1898, p. 210.

ändert beibehalten, wird die gewünschte FRAUNHOFER'sche Linie eingestellt. Dieses Glas braucht nur so weit den Spalt zu bedecken, dass es noch eben im Gesichtsfeld des Mikroskopes erscheint, den grössten Theil des monochromatischen Lichtbüschels aber ungehindert also ohne Schwächung durch Reflexion austreten lässt. Ein Mikroskop ist bei diesem Spectralapparat einer Lupe vorgezogen worden, nicht um eine stärkere Vergrößerung zu erlangen, sondern nur um das Auge nicht zu nahe an den Austrittsspalt bringen zu müssen, wo der Raum schon durch die Beobachtungsinstrumente beschränkt ist. Das Mikroskop besitzt ein Objectiv von etwa 45 mm Brennweite und 10 mm Öffnung, welches in der vierfachen Entfernung — theils in horizontaler, theils nach der Reflexion durch das Prisma in verticaler Richtung gemessen — ein gleich grosses Bild des Spectrums entwirft. Dieses Bild wird durch eine etwa fünffach vergrößernde Lupe betrachtet, so dass also das ganze Spectrum, von dem allerdings immer nur kleinere Theile gleichzeitig überblickt werden, in einer Länge von 115—135 mm erscheint (vergl. Taf. VI).

Die Genauigkeit der Einstellung ergibt sich folgendermaassen. Die auf Glas eingravirten Linien erscheinen im Bild in einem Abstand von 1 mm. Nun kann ein normales Auge die Einstellung auf die Mitte zweier um einen scheinbaren Millimeter von einander abstehenden Linien gut bis auf $\frac{1}{30}$ mm genau ausführen und daher können auch die einzelnen FRAUNHOFER'schen Linien auf den 20×115 bis 20×135 , d. i. auf den 2300—2700sten Theil des Spectrums richtig eingestellt werden.

Damit auch bei Verwendung künstlicher Beleuchtung die Herstellung monochromatischen Lichtes von vorgeschriebener Wellenlänge möglich ist, wurde der Kopf der Schraube mit einer Theilung versehen, welche eine Scala bestreicht (Fig. 14 p. 362). Eine Controle der den einzelnen FRAUNHOFER'schen Linien entsprechenden Werthe der Theilung kann durch Wolkenlicht, oder natürlich auch durch monochromatische Flammen leicht ausgeführt werden.

Wie gross die Bewegung dieser Schraube sein muss, um das ganze Spectrum am Austrittsspalt vorbeizuführen, hängt schliesslich von der Grösse der Prismen ab, da mit deren Grösse auch der Abstand der einander zugekehrten Ecken

von den beiden Drehpunkten zunimmt. (Indessen könnte man auch kleinere Prismen auf grösseren Grundplatten befestigen.) Ich will beispielsweise für die Combination III drei verschiedene Prismenbreiten, nämlich von 29, 34 und 39 mm, annehmen (die dazu passenden Durchmesser der Collimatorlinsen würden 20, 24 und 27 mm betragen). Die Abstände der zugekehrten Ecken dieser Prismen von ihren Drehpunkten betragen, auf ganze Millimeter abgerundet, 23, 27 und 31 mm. Auf Kreisen mit diesen Halbmessern bewegen sich nun die Ecken oder auch näherungsweise die Vorsprünge v (Fig. 14) für Einstellung aller Linien von A_1 bis H_1 über einen Bogen von $11^\circ 34'$ (s. Tab. 2 auf p. 357). Nun wirkt aber die Schraube senkrecht zur Verbindungslinie der Drehaxen und die zugekehrten Prismenecken befinden sich in den beiden Grenzstellungen für A_1 und H_1 ungefähr gleich weit diesseits und jenseits dieser Verbindungslinie (vergl. Fig. 5 und 6 p. 353 und 354), daher ist die erforderliche Bewegung der Schraube nahezu gleich der Sehne des Bogens von $11^\circ 34'$ und beträgt für die drei Prismengrößen 4,6, 5,4 und 6,2 mm. Wenn man also der Schraube eine Steigung von 1 mm giebt und den Schraubenkopf in 100 Theile theilt, so kann man noch direct bis auf den 460sten, 540sten und 620sten Theil der ganzen Bewegung ablesen und durch Schätzung natürlich eine noch erheblich genauere Einstellung erreichen.

6. Beleuchtung des Instrumentes und Helligkeit des erzielten monochromatischen Lichtes.

Das Instrument ist anfänglich für Sonnenlichtbeleuchtung construirt worden und mit dieser lassen sich auch die bei weitem besten Resultate erlangen. Da man es aber in vielen Fällen vorziehen wird, von der Sonne nicht abhängig zu sein, so will ich auch die künstlichen Beleuchtungsquellen, wie dieselben sich für das Instrument verwerthen lassen, in den Kreis meiner Betrachtungen ziehen.

Es wird zunächst nothwendig sein, einige Angaben über die Helligkeit der einzelnen Spectralregionen zu machen, um Anhaltspunkte für die Intensität der Lichtbüschel zu erhalten, welche bei Einstellung der verschiedenen FRAUNHOFER'schen Linien den Austrittsspalt verlassen. Die Messungen der einzel-

nen Autoren auf diesem Gebiete schwanken recht erheblich und sind natürlich an erster Stelle abhängig von der Art der das Spectrum erzeugenden Lichtquelle¹. Ich benutze hier die Messungen von ABNEY und FESTING², welche sich auf elektrisches Licht beziehen und werde die gleichen Zahlen, da es sich überhaupt hier nur um eine ungefähre Orientirung handelt, auch auf das Sonnenspectrum anwenden. Überdies haben jene Autoren in einem früheren Aufsatz³ die Ähnlichkeit der Intensitätscurven von Sonnenlicht und elektrischem Licht dargethan, wie dies auch für den grössten Theil des Spectrums aus den Beobachtungen OSCAR EMIL MEYER'S sich ergibt⁴.

¹ Die Helligkeitscurve des durch eine Petroleumlampe erzeugten Spectrums unterscheidet sich von der des Gaslichtes; diese ist wieder verschieden von der des elektrischen Glüh- und Bogenlichtes und letztere zeigt wieder Abweichungen von der Helligkeitscurve anderer Lichtquellen, wie des Kalk- oder Zirkonlichtes, der Magnesiumflamme, des glühenden oder schmelzenden Platins u. s. w. Ich konnte mich auf diesem mir fernliegenden Gebiet, das mir erst bei Abfassung dieses Capitels bekannt wurde, nur sehr oberflächlich orientiren. Wenn ich recht verstanden habe, so zeigt die Helligkeitscurve bei allen gebräuchlichen künstlichen Lichtquellen einen weniger steilen Verlauf nach dem rothen Ende, einen steileren Verlauf nach dem blauen Ende des Spectrums; als dies bei Sonnenlicht der Fall ist. Man kann im allgemeinen sagen, dass eine Parallelverschiebung der Intensitätscurve von Blau nach Roth bei den künstlichen Lichtquellen gegenüber dem Sonnenlicht stattfindet. Da aber, soweit ich mich durch MASCART'S *Traité d'Optique*. 3. 1893 unterrichten konnte, die Angaben verschiedener Beobachter bis zu dem dreifachen Betrag von einander abweichen, so beschränke ich mich auf die Wiedergabe der Intensitätsverhältnisse des Sonnenspectrums. Wie weit das PURKINJE'sche Phänomen hier die Intensitätsverhältnisse beeinflusst, habe ich natürlich ebenfalls nicht weiter verfolgt.

² Phil. Trans. 1892. 183. 534.

³ Phil. Trans. 1886. 177. 447 und Taf. 25.

⁴ Zeitschr. f. angew. Elektrizitätslehre. 1. 1879. p. 326. Siehe auch Beiblätter Ann. Phys. Chem. 4. 1880. p. 131. O. E. MEYER fand für das Intensitätsverhältniss von elektrischem Licht, Sonnen- und Gaslicht in den verschiedenen Spectralregionen folgende Zahlen:

	Elektr. Licht zu Sonnenlicht	Gaslicht zu Sonnenlicht
Roth	2,09	4,07
Gelb D	1,00	1,00
Grün E	0,99	0,43
Blau F	0,87	0,23
Violett G	1,03	0,15

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich wieder auf Combination III (Glassorte No. 39). Das aus den Zahlen auf p. 359 combinirte Spectrum (vergl. auch Fig. 10—13 p. 360) ist fünfmal vergrössert — also in der Grösse, wie es durch das Mikroskop betrachtet dem normalen Auge erscheint — auf Taf. VI gezeichnet, wobei mit Hilfe der Linien A_1 , C, D, F, G_1 , H_1 und der Curve I die übrigen Linien auf graphischem Wege gefunden wurden. Die Lage dieser Linien dürfte in der Zeichnung bis auf 0,2 mm und für das wirkliche Spectrum also bis auf 0,04 mm richtig sein¹. Die Abstände der einzelnen Punkte der steilen Curve II geben die Lichtintensitäten der verschiedenen Theile des Spectrums an. Die Fläche, welche von dieser Curve und der Ordinatenaxe eingeschlossen wird, ist ein Maass für das durch den Einfallsspalt eintretende Licht, wobei irgend eine Breite dieses Spaltes als constant angenommen wird. Das Quantum des austretenden Lichtes hängt dann ab von der Breite des Austrittsspalt und berechnet sich aus den Flächenstücken, welche von zwei um die Spaltbreite von einander abstehenden Linien und der Intensitätscurve II abgegrenzt werden. Ich will die Breite des Austrittsspalt zu 0,2 mm (und demnach in der 5mal vergrösserten Figur auf Taf. VI zu 1,0 mm) annehmen, so dass also, da das ganze Spectrum von A_1 bis H_1 eine Länge von 24,7 mm hat, das als monochromatisch angesehene Lichtbündel 0,8% des ganzen Spectrums beträgt. In diesem Fall ist das Licht 7mal weniger monochromatisch als Natriumlicht² und reicht also wohl für die Bestimmung von Brechungsexponenten auf vier Decimalen sowie überhaupt für die meisten krystalloptischen Untersuchungen vollkommen aus. Bei vielen Bestimmungen dürfte das Licht sogar viel weniger monochromatisch sein.

Der Inhalt der von der Intensitätscurve II begrenzten Fläche beträgt nach Messung auf dem Millimeterpapier und nach

¹ Die Abbildung dieses combinirten Refractionsspectrums auf Taf. VI kann daher auch zur Orientirung über die Lage der verschiedenen Linien, wie sie in einem in Fig. 14 in halber Grösse gezeichneten Apparat dem Auge wirklich erscheinen, dienen.

² Die beiden Natriumlinien D_1 und D_2 stehen im Spectrum von Combination III um etwa 0,03 mm von einander ab.

Wägung von ausgeschnittenen Kartonschablonen 2770 qmm ($\pm 2\%$). Die von einem 1 mm breiten Spalt an den einzelnen Stellen herausgeschnittenen Flächenstücke sind in der folgenden Tabelle mitgetheilt. Die daneben aufgeführten Brüche (S) geben an, der wievielte Theil des einfallenden Lichtes bei den verschiedenen Linien zum Austritt kommt. Dabei ist die Schwächung des Lichtes durch Reflexion, Beugung und Absorption an den Linsen und Prismen nicht berücksichtigt.

	Spaltbreite in Fig. auf Taf. VI 1 mm in Wirklichkeit 0,2 mm	S
a	0,5 qmm	$\frac{1}{5546}$
B	4 "	$\frac{1}{893}$
Li	8 "	$\frac{1}{348}$
C	17 "	$\frac{1}{163}$
D	100 "	$\frac{1}{28}$ (27,7)
Tl	60 "	$\frac{1}{48}$
E	50 "	$\frac{1}{55}$
F	6 "	$\frac{1}{462}$
Sr	1,5 "	$\frac{1}{1847}$
G ₁	0,6 "	$\frac{1}{4617}$
h	? "	"

A. Beleuchtung mit Sonnenlicht.

Ich verfolge nun zunächst die Beleuchtung mit Sonnenlicht und will annehmen, dass jeder Punkt des Eintrittspaltes so stark beleuchtet wird, wie durch eine Flamme von 60 000 Normalkerzen Lichtstärke in 1 m Entfernung¹; es entsteht dann die Frage nach der Helligkeit der den Austritts-

¹ Die Angaben über die Helligkeit der Sonne schwanken in ziemlich weiten Grenzen. Ältere Beobachter, wie WOLLASTON und andere, fanden dieselbe gleich 60 000 Meter-Kerzen, neuere wie CROWA (Photométrie solaire. C. R. 95. 1882. p. 1271—1273. 96. 1883. p. 124) gleich 85 000 Meter-Kerzen. Ich will die kleinere Zahl schon aus dem Grund annehmen, weil die Sonne in unseren Breiten nur selten die höchste Intensität zeigt. Der WOLLASTON'schen Angabe liegen wohl englische Normalkerzen zu Grunde, die sehr nahezu mit dem Licht der HEFNER'schen Amylacetat-Lampe übereinstimmen sollen. Bei meinen ferneren Vergleichen nehme ich also das Sonnenlicht zu 60 000 H. K. in 1 m Entfernung an.

spalt verlassenden als monochromatisch angesehenen Lichtbündel. Da nun die Begriffe Lichtstärke, Intensität der Beleuchtung, Helligkeit, Glanz (éclat), Beleuchtungsstärke, Erleuchtungsstärke u. s. w. nicht einheitlich gebraucht und verstanden werden, so will ich die obige Frage in folgende concrete Form fassen: Wie stark wird ein Schirm, welcher erstens im Austrittsspalt und zweitens in einem gewissen Abstand vor dem Austrittsspalt aufgestellt ist, durch das austretende monochromatische Lichtbündel beleuchtet? Diese Beleuchtung soll durch diejenige einer Anzahl Normkerzen in 1 m Entfernung ausgedrückt werden.

Vorauszuschicken ist, dass alles durch den Eintrittsspalt eindringende Sonnenlicht, soweit es nicht durch Reflexion, Beugung und Absorption eine Schwächung erfährt, zur Bildung des Spectrums verwendet wird; ferner, dass die Breiten von Ein- und Austrittsspalt proportional den Brennweiten der zugehörigen Linsen angenommen werden. Bei Combination III ist die Brennweite der Linse des Austrittsrohres $f' = 200$ mm, diejenige der Collimatorlinse möge halb so gross, also $f = 100$ mm sein. Nimmt man alsdann die Breite des Eintrittsspaltcs zu 0,1 mm an, so soll die Breite des Austrittsspaltcs 0,2 mm betragen. Die Fläche des Eintrittsspaltcs, welche in jedem ihrer Punkte eine Bestrahlung wie mit 60 000 Kerzen in 1 m Entfernung erfährt, wird durch die Prismen in ein Spectrum ausgedehnt und ausserdem noch in verticaler Richtung proportional dem Verhältniss der Brennweiten der Linsen von Collimator und Austrittsrohr vergrössert. Der Einfluss der spectralen Zerlegung auf die Lichtschwächung in den einzelnen Spectralregionen ergibt sich aus dem Coëfficienten S, welcher für einen 0,2 mm breiten Austrittsspalt in der Tabelle auf p. 372 angegeben ist. Der Einfluss der Verbreiterung in verticalem Sinne ist aber ausserdem noch zu berücksichtigen. Bei Combination III ist die Breite des Spectrums doppelt so gross, wie die Länge des Collimatorspaltes und die Lichtstärke also noch 2 mal kleiner als sie sich aus der spectralen Zerlegung ergibt. Hiernach berechnet sich die Beleuchtungsstärke (K), welche ein Schirm in der Ebene des Austrittsspaltcs durch die einzelnen Spectralregionen erfährt,

nach der Formel: $K = \frac{60\,000}{2} \cdot S$. Für einige Spectralregionen, welche den folgenden FRAUNHOFER'schen Linien benachbart sind, erhält man die daneben aufgeführten Werthe für die Beleuchtungsstärke K.

a	3	Kerzen in 1 m Entfernung
B	22	„ „ „ „
Li	43	„ „ „ „
C	92	„ „ „ „
D	540	„ „ „ „
Tl	326	„ „ „ „
E	273	„ „ „ „
F	32	„ „ „ „
Sr	8	„ „ „ „
G ₁	3	„ „ „ „
h	?	

Wenn man nun ferner untersuchen will, wie stark ein Schirm in einem bestimmten Abstand vor dem Austrittsspalt beleuchtet wird, so ist zu bedenken, dass die Lichtstrahlen divergent austreten, sich demnach auf eine grössere Fläche vertheilen und proportional dieser Vertheilung an Lichtstärke abnehmen. Bei der Beleuchtung mit einfachem Sonnenlicht tritt Licht von sehr geringer Apertur in den Collimator ein, so dass auch nur ein sehr schwach divergentes Lichtbündel den Austrittsspalt verlässt und grössere Flächen überhaupt nicht intensiv zu beleuchten sind. Ferner enthält der austretende Lichtkegel in seinen centralen Theilen mehr Licht als am Rande, weil die Apertur der Sonne nur etwa neun Mal die scheinbare Öffnung des Spaltes übertrifft, was eine ganz deutliche Halbschattenbildung zur Folge hat.

Viel günstiger liegen auch in dieser Hinsicht die Verhältnisse, wenn man das Sonnenlicht durch eine Beleuchtungslinse auf dem Collimatorspalt concentrirt. Es ist schon oben p. 363 gesagt, dass diese Beleuchtungslinse die gleiche Apertur wie die Collimatorlinse haben muss, sie kann dabei aber sehr verschiedene Durchmesser besitzen. In der folgenden Tabelle sind einige Grössen zusammengestellt. Die beigefügte Grösse des Sonnenbildes, welches von diesen Linsen entworfen wird, ist für achromatische und aplanatische Systeme berechnet.

	Durchmesser	Brennweite	Sonnenbild
1.	25 mm	100 mm	1 mm
2.	50 „	200 „	1 $\frac{3}{4}$ „
3.	75 „	300 „	2 $\frac{1}{2}$ „
4.	100 „	400 „	3 $\frac{1}{2}$ „
5.	125 „	500 „	4 $\frac{1}{2}$ „

Die Grenze ist schliesslich in der für die vollständige Beleuchtung nothwendigen Länge des Heliostat-Spiegels gegeben¹. Mit der grösseren Brennweite steigt allerdings nicht die Intensität des Sonnenbildes pro Flächeneinheit (vergl. p. 364 und p. 377), aber das grössere Sonnenbild beleuchtet einen grösseren Theil des Spaltes und erhöht auf diese Weise die Gesamtintensität des austretenden monochromatischen Lichtbündels², was besonders bei der Umwandlung des

¹ Wenn D der Durchmesser der Linse ist, so soll die Breite des Spiegels nur unerheblich grösser sein. Seine zur Beleuchtung der ganzen Linsenöffnung nothwendige Länge L hängt vom Stand der Sonne ab. Bei Verwendung der Mittagssonne und bei Südlage des Fensters berechnet sich diese Länge im Verhältniss zur Breite, wenn φ die geographische Breite des Ortes und δ die Declination der Sonne an dem betreffenden Tage ist, nach der Formel:

$$\frac{L}{D} = \frac{1}{\sin \frac{1}{2} (R - \varphi + \delta)}$$

Für Freiburg i. B. und Königsberg (Unterschied der geographischen Breite 6 $\frac{3}{4}$ °) wären beispielsweise folgende Längen der Heliostatspiegel im Verhältniss zu ihren Breiten erforderlich, wenn diese Spiegel gleichmässig ausgenutzt werden sollen:

	Freiburg	Königsberg
Am 21. Juni (längsten Tag)	1,85	2,05
Am 21. März oder 22. Sept. (Tag- und Nachtgleiche)	2,79	3,30
Am 22. December (kürzesten Tag)	6,19	9,70

Die meisten Heliostatspiegel, die ich gesehen habe oder die mir aus Abbildungen bekannt sind, haben Längen, welche die Breiten höchstens etwa um das Doppelte übertreffen, sie sind also für eine richtige Ausnutzung entweder viel zu breit oder viel zu kurz. Um wenigstens für den grössten Theil des Jahres in unseren Breiten volle Ausnutzung zu erhalten, sollte ein Heliostatspiegel vier- bis fünfmal länger wie breit sein; er sollte für das vorliegende Instrument eine Breite von etwa 10 cm und eine Länge von etwa 50 cm haben.

² Ich habe früher (TSCHERMAK's Mitth. 15. 1896. p. 58) gesagt, dass, je grösser die Brennweite der Beleuchtungslinse werde, desto schneller das Sonnenbild über den Spalt wandere. Das ist freilich richtig, aber auf die Bequemlichkeit der Beobachtung hat dies keinen Einfluss, denn das Sonnenbild ist auch proportional der Brennweite grösser ge-

Spectrallichtes in einen Selbstleuchter mittelst einer matten Glastafel nicht ohne Bedeutung ist. Übrigens setzt die mit der Brechung verbundene Krümmung der Spectrallinien der zu verwendenden Länge des Spaltes eine Grenze, wenn auch hier durch eine leichte Krümmung des Ein- oder Austrittspaltes der zu befürchtende Mangel grösstentheils beseitigt werden kann. Ich habe bisher eine Beleuchtungslinse verwendet, welche der dritten in der obigen Tabelle etwa gleichkommt. Mein Heliostat-Spiegel hat eine Breite von etwa 80 mm und eine Länge von etwa 300 mm. Die Länge reicht allerdings in den Wintermonaten bei südlicher Lage des Zimmers nicht ganz aus; sie sollte für die Breite von Tübingen 510 mm betragen¹.

worden und bedarf genau der gleichen Zeit, nämlich bei achromatischer Linse etwa zwei Minuten, um am Spalt vorbeizuwandern. Die Sonne durchläuft einen Bogen von 360° in etwa 24 Stunden und demnach einen Bogen gleich ihrem eigenen scheinbaren Durchmesser von 0° 32' in etwa

$$\frac{24 \text{ Stunden}}{360} \cdot \frac{60}{32} \text{ oder in } 2,1 \text{ Minuten.}$$

HELMHOLTZ giebt 3 Minuten an (Phys. Optik. 2. Aufl. 1896. p. 300), er berücksichtigt dabei offenbar die Ausbreitung des Sonnenbildes durch eine nichtplanatische Linse.

¹ Die Befestigung des Heliostaten ist aus der Abbildung in meiner früheren Arbeit zu ersehen; sie muss so ausgeführt sein, dass auch bei grellestem Sonnenlicht eine vollständige Verdunklung des Zimmers möglich ist. Hierauf näher einzugehen, würde zu weit führen. Dahingehende Angaben finden sich z. B. in WEINHOLD's physikalischen Demonstrationen, Leipzig 1881; auch erste Lieferung der 3. Auflage. Leipzig 1898. Die genaue Einstellung des Instrumentes auf den von der Beleuchtungslinse entworfenen Lichtkegel geschieht am einfachsten, wenn man den Deckel des Prismengehäuses zur Seite schiebt (derselbe sollte daher nicht festgeschraubt sein, sondern durch irgend eine Vorrichtung sich leicht öffnen und wieder staubdicht schliessen lassen) und einen Papierstreifen vor die Collimatorlinse hält. Bei richtigem Gang der Strahlen muss dieser Papierstreifen innerhalb des Durchmessers der Collimatorlinse gleichmässig beleuchtet sein. Wenn man aber dieses Öffnen und Schliessen des Prismengehäuses vermeiden will, so ist es für eine schnelle Einstellung zweckmässig, in der nach aussen gebogenen Wand gegenüber der ersten Fläche von Prisma I ein Fenster mit einer matten Glastafel anzubringen. Die richtige Einstellung lässt sich infolge der Reflexion an der ersten Fläche von Prisma I auf jener Glastafel, oder bei Einschaltung eines glatten Glases an der gegenüberliegenden Wand des Zimmers erkennen.

Die Verstärkung, welche man mit einer solchen Beleuchtungslinse erhält, folgt aus dem 29. LAMBERT'schen Satz¹.

„Ist der Gegenstand unendlich weit entfernt, so verhält sich die mittlere Helligkeit des Bildes zur directen Beleuchtung, wie das Quadrat der Tangente des scheinbaren Halbmessers der Linse, vom Brennpunkt aus gesehen, zum Quadrat der Tangente des scheinbaren Halbmessers des Gegenstandes².“

Die Öffnung der Collimatorlinse wurde bei Combination III angenommen zu

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{1}{8} \text{ oder } \frac{a}{2} = 7^{\circ} 7\frac{1}{2}'.$$

Der scheinbare halbe Öffnungswinkel der Sonne sei $0^{\circ} 16'$, dann ist die durch eine richtige Beleuchtungslinse zu erreichende Verstärkung $= \frac{\operatorname{tg}^2 7^{\circ} 7\frac{1}{2}'}{\operatorname{tg}^2 0^{\circ} 16'} = 721$.

¹ Photometria 1760; deutsche Übersetzung von ANDING, OSTWALD'S Klassiker. 31. 1892. p. 116.

² Dieser Satz lässt sich vielleicht in folgender Weise der Vorstellung unmittelbarer zugänglich machen, als es in der obigen Fassung möglich ist.

Ein Bündel Sonnenstrahlen habe einen Durchmesser $2R$ und demnach einen Querschnitt πR^2 . Dieses Strahlenbündel werde das eine Mal direct auf den Collimatorschlitz geleitet, das andere Mal durch eine Linse von richtiger Apertur und der Öffnung $2r$ zu einem Sonnenbild vom Durchmesser 2ρ und demnach einer Fläche $\pi \rho^2$ vereinigt. Das Sonnenbild liege in der Ebene des Spaltes. Von der ganzen Lichtmenge, welche in dem Strahlenbündel enthalten ist, empfängt der Collimatorschlitz bei directer Beleuchtung denjenigen Theil, der seiner Fläche (Breite mal Höhe) im Verhältniss zu πR^2 , und bei der durch eine Linse concentrirten Beleuchtung denjenigen Theil, der seiner Fläche im Verhältniss zu $\pi \rho^2$ entspricht. Die in den Schlitz nach der einen oder der anderen Art eindringenden Lichtmengen müssen sich daher verhalten wie R^2 zu ρ^2 .

F sei die Brennweite der Beleuchtungslinse. Dann ist, wenn α der Öffnungswinkel dieser Linse ist, $R = F \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$. Ferner ist

$$\rho = F \cdot \operatorname{tg} \frac{a}{2},$$

wo α gleich dem scheinbaren Winkel der Sonne sein soll. Es folgt unmittelbar

$$\frac{R^2}{\rho^2} = \frac{\operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}},$$

was zu beweisen war.

Diese etwa 700fache Verstärkung der Beleuchtung wird in vollem Umfang allerdings nur durch eine achromatische und aplanatische Linse erreicht; bei der Verwendung einer einfachen biconvexen Linse ist die Verstärkung geringer, aber immer noch ausserordentlich gross. Die Beleuchtungsstärke des Austrittsspales erfährt eine proportionale Vergrösserung, der Hauptvorteil bei der Verwendung jener Beleuchtungslinse liegt aber darin, dass das austretende Lichtbündel sich aus stark divergenten Strahlen zusammensetzt und daher schon in kurzer Entfernung vor dem Austrittspalt eine grössere Fläche zu beleuchten erlaubt. In einer Entfernung von 200 mm hat diese Fläche etwa die Breite der Linse des Austrittsrohres und wegen der Spallänge eine etwas grössere Höhe. Ich will annehmen, sie habe eine Breite von 25 mm und eine Höhe von 30 mm und demnach eine Fläche von 750 qmm. Auf diese Fläche vertheilt sich nun die 700mal grösser gewordene Beleuchtungsstärke K des Austrittsspales. Dieser Spalt habe wieder eine Breite von 0,2 mm und eine beleuchtete Höhe von 6 mm (entsprechend 0,1 mm und 3 mm des Eintrittsspales). Zur Berechnung der Beleuchtungsstärke der Fläche in 200 mm Entfernung hat man alsdann, wenn man den im Verhältniss zur ganzen Fläche hier nur sehr schmal auftretenden Halbschatten nicht berücksichtigt, die Formel

$$\frac{\text{Fläche des Austrittsspales} \times K \times 700}{\text{Beleuchtete Fläche des Schirmes in 200 mm Entfernung}},$$

wo die Werthe von K der Tabelle auf p. 374 zu entnehmen sind.

Zu dem gleichen Resultat gelangt man natürlich durch folgende Formel

$$\frac{\text{Fläche des Eintrittsspales} \times \text{Beleuchtungsstärke des Eintritts-} \\ \text{spales bei einfachem Sonnenlicht} \times 700}{\text{Beleuchtete Fläche des Schirmes in 200 mm Entfernung}} \cdot S,$$

wo die Werthe von S der Tabelle auf p. 372 zu entnehmen sind. Wegen der Abrundung der Werthe für K und S sind die nach der ersten und zweiten Formel berechneten Zahlen für die Beleuchtungsstärke des Schirmes nicht genau dieselben. Für die einzelnen Spectralregionen erhält man folgende Werthe:

	Beleuchtungsstärke des Schirmes in Meterkerzen
a	3
B	24
Li	49
C	103
D	606
Tl	365
E	305
F	36
Sr	9
G ₁	4

Soll die Beleuchtung noch intensiver werden, so kann man die Breite des Austrittspaltes vergrössern, über 1 mm wird man hier aber wohl selten hinausgehen. In diesem Fall umfasst das austretende Lichtbündel 4% des Spectrums. Das Licht ist dann 30mal weniger monochromatisch als Natriumlicht, aber immer noch einfarbiger als das Licht der LANDOLT'schen Strahlenfilter¹ und wird also auch noch, besonders wenn man die optischen Schwerpunkte für bestimmte Leuchtquellen ermittelt, ausgedehnte Anwendung finden können. Innerhalb dieser Grenzen, also bis zu einer Breite von 1 mm, kann man übrigens näherungsweise annehmen, dass die Beleuchtungsstärke im Spectrum nach der einen Seite so viel zu- wie nach der anderen Seite abnimmt, also im Durchschnitt constant bleibt und demnach die Beleuchtungsintensität proportional der Breite zunimmt. Bei 1 mm Breite des Austrittspaltes würde die Beleuchtungsstärke des Schirmes in 200 mm Entfernung etwa 5mal grösser werden als dies in der letzten Tabelle angegeben ist. Sollte eine noch weitere Steigerung der Beleuchtung gewünscht werden, so wäre auch der Eintrittspalt zu verbreitern.

B. Beleuchtung mit künstlichen Lichtquellen.

Ich gehe schliesslich zur Besprechung der Verhältnisse bei der Beleuchtung mit künstlichen Lichtquellen über und ich darf hier wohl nochmals hervorheben, dass es niemals möglich ist, auf diesem Wege eine Intensität der Beleuchtung

¹ Ber. d. deutsch. chem. Ges. 27. 1894. p. 2872—2887. Sitzber. Berlin. Akad. 1894. p. 923.

zu erreichen, wie sie nach den auf den letzten Seiten enthaltenen Angaben durch concentrirtes Sonnenlicht gewonnen werden kann. Dagegen lässt sich sehr wohl durch künstliche Lichtquellen eine Intensität der Beleuchtung erzielen, welche nicht nur derjenigen durch einfaches Sonnenlicht gleichkommt, sondern dieselbe sogar erheblich übertrifft. Ehe ich aber auf die einzelnen Lampen eingehe, will ich zunächst erörtern, auf welche Weise es überhaupt möglich ist, durch künstliche Lichtquellen die Beleuchtungsstärke des Austrittspaltes so weit zu steigern, dass sie der bei einfacher Sonnenbeleuchtung erhaltenen gleich kommt.

a) Wie kann die Beleuchtungsstärke des Sonnenlichtes durch künstliche Lichtquellen erreicht werden?

Ich setze wieder die Sonnenbeleuchtung gleich derjenigen von 60 000 Kerzen in 1 m Entfernung. Um dann eine der Sonne möglichst ähnliche künstliche Lichtquelle zu erhalten, sollte jene Lichtstärke von 60 000 Kerzen in einer Kugel oder in einem Kreis von 9,3 mm Durchmesser — nämlich gleich dem scheinbaren Durchmesser der Sonne in 1 m Entfernung vom Auge — sich vereinigen lassen. Allerdings würde der Gang der Strahlen hier insofern von der wirklichen Sonnenbeleuchtung abweichen, als bei letzterer die von einem Punkt der Sonne nach den verschiedenen Punkten des Spaltes gehenden Strahlen wegen der grossen Entfernung der Sonne wirklich parallel sind, während bei der künstlichen Sonne diese Strahlen, die von einem Punkt in 1 m Entfernung ausgehen, bei 0,1 mm Spaltbreite einen Winkel von 20" und bei 3 mm Spalthöhe einen Winkel von 5' miteinander bilden. Ich komme hierauf gleich näher zu sprechen.

Mit den vorhandenen Mitteln, auch bei Anwendung von Elektrizität, scheint es nicht möglich zu sein, die Temperatur eines Körpers so weit zu steigern, dass er auf einen Raum von etwa 9 mm Durchmesser ein Licht von 60 000 Kerzen ausstrahlt. Das stärkste elektrische Bogenlicht, welches bis jetzt wohl hergestellt wurde, war auf der Frankfurter elektrischen Ausstellung im Jahre 1891 zu sehen. Es soll eine Lichtstärke von 40—50 000 Kerzen und Kohlenstäbe von etwa 5—6 cm Durchmesser gehabt haben, so dass der Lichtbogen mit den

glühenden Kohlenspitzen sicherlich auf mehrere Centimeter Durchmesser geschätzt werden kann. Es ist aber auch keineswegs nothwendig, diese Lichtintensität auf einen Kreis von noch nicht 1 cm Durchmesser zu concentriren, um den Collimator so stark wie mit einfachem Sonnenlicht zu beleuchten. Sollen diese 60 000 Lichteinheiten in 1 m Entfernung vor dem Eintrittsspalt liegen, so können sie sich, der Apertur des Collimators entsprechend, auf einen Kreis von etwa 25 cm Durchmesser vertheilen. Auf diesem Raum würde es aber möglich sein, nicht nur eine der Sonne äquivalente Lichtmenge, sondern eine erheblich grössere zu concentriren. Schon die allerdings sehr unbestimmt gehaltenen Angaben über die Frankfurter Lampe rechtfertigen diese Annahme. Die Stärke der einfachen Sonnenbeleuchtung und sogar eine erheblich grössere lässt sich aber auch mit viel kleineren Lichtquellen erreichen, wenn man dieselben nur entsprechend näher an den Spalt rückt. In der Tabelle p. 386 sind Grösse und Intensität der Lichtquellen angegeben, welche in den links aufgeführten Entfernungen vom Spalt der Sonnenbeleuchtung gleich kämen. Die Zahlen unter 1 beziehen sich auf die Beleuchtungsstärke des Eintrittsspaltcs. Diese Angaben können nur solange der durch die Sonne erhaltenen Beleuchtung gleich gesetzt werden, als man die Ausdehnung des Spaltes gegenüber der Entfernung der Lichtquelle vernachlässigen darf.

Schon diese Vernachlässigung ist für die kleineren Entfernungen nicht erlaubt, aber noch andere Verhältnisse treten hinzu, welche die in Colonne 1 aufgeführten Zahlen als nicht brauchbar erkennen lassen. Es kommt eben nicht nur darauf an, dass der Eintrittsspalt eine gewisse Beleuchtungsstärke erhält, sondern die Strahlen, welche diese Beleuchtungsstärke hervorrufen, sollten auch alle wie bei der Sonnenbeleuchtung durch die Collimatorlinse aufgefangen und nach dem Durchgang durch die Prismen wieder im Spectrum vereinigt werden. Dieses ist aber, um beispielsweise den in der Tabelle p. 386 angeführten vorletzten Fall herauszugreifen, bei der Lichtquelle von 0,1 mm Durchmesser in 0,4 mm Entfernung keineswegs der Fall. Wie wenig hier die Bedingungen für die richtige Beleuchtung eingehalten werden, ist aus Fig. 15 a. f. S. zu

ersehen, in welcher die Verhältnisse 10fach vergrössert gezeichnet sind. Um jeden Punkt des Spaltes genau so stark wie durch die Sonne zu beleuchten, muss die Lichtquelle, bei gleichbleibender Intensität pro Flächeneinheit, den Dimensionen des Spaltes entsprechend grösser werden. Zunächst muss die Lichtquelle so gross werden, dass jeder Punkt des Spaltes von ihr einen Lichtkegel von der Apertur $\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ erhält, und zwar muss die Axe dieses Lichtkegels parallel der Collimatoraxe laufen. An Stelle der

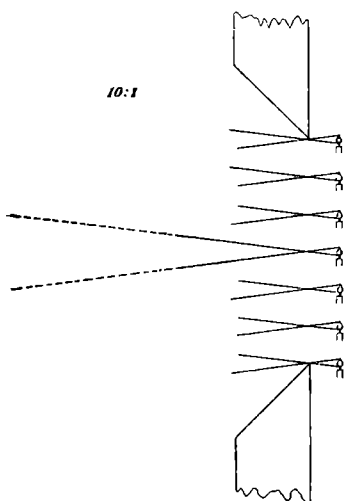


Fig. 15. 10fach vergrössert.

einen kleinen Lichtquelle wäre also ein ganzer Lichtfaden zu setzen. Wenn R der Radius der ursprünglich kreisförmig gedachten Lichtquelle ist und wenn ferner die Höhe des Spaltes h und seine Breite s ist, so sollte nach dieser ersten Forderung an die Stelle einer πR^2 grossen Leuchtfläche eine oben und unten halbkreisförmig begrenzte von der Höhe $2R + h$ und von der Breite $2R + s$ treten, deren ganze Fläche sich nach der Formel berechnete:

$$\phi_0 = \pi R^2 + (2R + s)h + 2Rs.$$

Die Leuchtkraft dieser Fläche müsste sein

$$L_0 = \phi_0 \times 1,22231,$$

wo letztere Zahl die Leuchtkraft einer 60000 Kerzen starken kreisförmigen Fläche von 125 mm Radius pro Quadratmillimeter bedeutet. Diese Leuchtkraft pro Quadratmillimeter will ich Lichtspannung nennen, sie wird auch als Flächenhelle (pro Quadratcentimeter; STRECKER, Hilfsbuch für die Elektrotechnik, Berlin 1898, p. 217) oder als Glanz (MASCART, Traité d'Optique. 3. 1893. p. 247) oder als Dichtigkeit der Strahlen (LAMBERT, Photometrie, OSTWALD'S Klassiker 31. 1892. p. 17) bezeichnet. Auch verwendet man dafür sehr

häufig den Ausdruck Intensität, wie das bereits bei LAMBERT, wenn auch nicht consequent geschieht.

Diese vergrößerte Fläche würde indessen der Sonnenbeleuchtung noch nicht vollkommen äquivalent sein, weil von den verschiedenen Lichtkegeln nur der in der Mitte des Spaltes auffallende von der Collimatorlinse vollkommen aufgefangen und zum Austrittsspalt weiter geleitet wird, die übrigen Lichtkegel aber infolge ihrer seitlichen Verschiebung, welche in horizontaler Richtung ausserordentlich gering, in verticaler

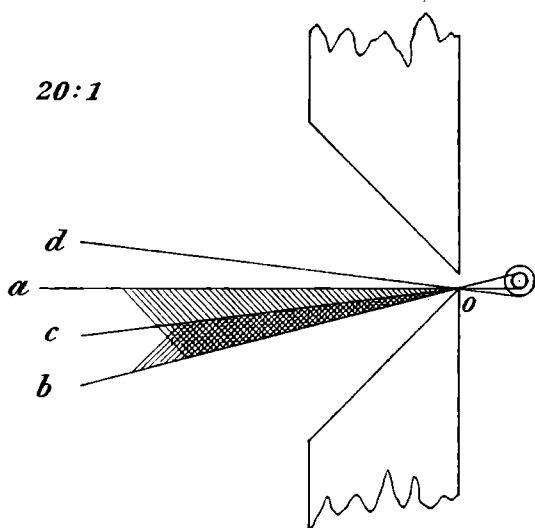


Fig. 16. 20 fach vergrößert.

Richtung aber wegen der zu 3 mm angenommenen Höhe des Spaltes gar nicht unbedeutend ist, eine theilweise einseitige Ablendung erfahren, für welche nach der anderen Seite hin ein Ersatz durch eine noch grössere Leuchtfläche geschaffen werden muss. In Fig. 16 sind diese Verhältnisse für den vorletzten Fall der Tabelle auf p. 386 20 fach vergrößert gezeichnet. Der innere von den beiden Kreisen hat, vom Spalt aus gesehen, eine Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ und soll die den Spalt beleuchtende Fläche vorstellen. Dieselbe hat man sich eigentlich um 90° , also senkrecht gegen die Ebene des Papiers gedreht zu denken. Ein Punkt am Rande des Spaltes empfängt von dieser Fläche Licht, welches den Raum aob erfüllt. Von

diesen Strahlen werden aber die innerhalb des Winkelraumes cob liegenden von der Collimatorlinse nicht aufgenommen; damit indessen der Punkt o die gleiche Lichtmenge durch den Collimator sendet wie ein in der Mitte des Eintrittsspaltel befindlicher Punkt, so muss wegen jenes Verlustes für Ersatz gesorgt werden. Es geschieht dies durch Vergrößerung der Lichtquelle bei gleichbleibender Lichtspannung, was durch den grösseren Kreis angedeutet ist. Jetzt kann der Punkt o einen Lichtkegel cod durch die Collimatorlinse senden und dieser Lichtkegel hat wieder die gewünschte Apertur $\text{tg } \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$.

Bei der Beleuchtung mit Sonnenlicht tritt auch eine solche Verschiebung der einzelnen Lichtkegel auf, dieselbe hat

aber keinen Einfluss auf die Beleuchtungsstärke des Austrittsspaltel, weil keiner dieser Strahlen den Rand der Collimatorlinse trifft und also auch keine Ablendung erfährt. Ist a die Entfernung der Lichtquelle vom Spalt und f die Brennweite des Collimators, so muss, um eine der Sonne auch für die Beleuchtungsstärke des Austrittsspaltel vollkommen äquivalente Beleuchtung zu erhalten, die Lichtquelle noch um $s \frac{a}{f}$ breiter und $h \frac{a}{f}$ höher werden als die aus der ersten

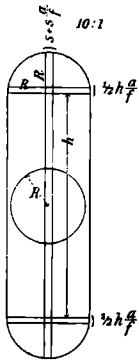


Fig. 17.
10fach vergrössert.

Betrachtung erhaltene Fläche misst. Eine solche Fläche ist für den in der Tabelle (p. 386) an viertletzter Stelle aufgeführten Fall in Fig. 17 in 10facher Linearvergrößerung gezeichnet; ihr Flächeninhalt berechnet sich bei einer Breite von $2R + s + s \frac{a}{f}$ und bei einer Höhe von $2R + h + h \frac{a}{f}$ nach der Formel

$$\Phi = \pi R^2 + \left(2R + s + s \frac{a}{f}\right) \left(h + h \frac{a}{f}\right) + 2R \left(s + s \frac{a}{f}\right).$$

Setzt man in diese Formel die Werthe ein:

$$\begin{aligned} s &= 0,1 \\ h &= 3,0 \\ f &= 100 \\ a &= 8R \end{aligned}$$

so ist

$$\Phi = R^2 \cdot 3,63951 + R \cdot 6,24600 + 0,3$$

und ihre Leuchtkraft

$$L = \Phi \times 1,22231 \text{ Kerzen.}$$

In der folgenden Tabelle (p. 386) sind für eine Reihe von Entfernungen die Lichtstärken und die zugehörigen Grössen der Lichtquellen mitgetheilt, mit denen man die gleiche Stärke der Beleuchtung wie mit der Sonne erhält, und zwar beziehen sich die Zahlen unter 1 auf die Beleuchtungsstärke eines einzigen, in der Mitte des Eintrittspaltes gelegenen Punktes, die Zahlen unter 2 auf die Beleuchtungsstärke des ganzen Eintrittspaltes und die Zahlen unter 3 auf die Beleuchtungsstärke des Austrittspaltes, auf die es hier allein ankommt.

Wenn man in dieser Tabelle die Zahlen von Colonne 1 und 3 vergleicht, so sieht man zunächst, dass die Stärken zweier Lichtquellen, welche die gleiche Beleuchtung des Austrittspaltes geben, sich keineswegs so verhalten, wie die Quadrate der Entfernungen vom Eintrittspalt. Wenn dies der Fall wäre, so müsste z. B. in einer Entfernung von 25 mm eine Lampe von etwa 44 Kerzen der Sonnenbeleuchtung gleichkommen — da $1000^2 : 25^2 = 70465 : 44$ —; es ist aber eine solche von 68 Kerzen erforderlich. In 10 mm Entfernung benöthigt man statt einer Flamme von 7 Kerzen einer solchen von 17 Kerzen und bei noch weiterem Heranrücken der Lichtquelle nimmt die erforderliche Lichtstärke sogar nahezu einfach proportional der Näherung ab. Man bedarf aber trotz dieser langsamen Abnahme schliesslich doch sehr kleiner Lichtquellen, um für den Austrittspalt die Intensität der Sonnenbeleuchtung zu erreichen. Die Werthe, welche man für L_0 und L erhält, sind im Allgemeinen wenig von einander verschieden, indessen habe ich die Rechnung trotz ihrer Umständlichkeit hier so eingehend besprochen, da man andernfalls kaum ein sicheres Urtheil über die Vorgänge bei der Beleuchtung gewinnen würde.

Mit Benutzung der Werthe dieser Tabelle in Colonne 3 lässt sich nun genauer die Grenze berechnen, bis zu welcher man überhaupt mit einem Collimator von der Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ und mit künstlichen Lichtquellen in der Beleuchtungsstärke

Abstand der Lichtquelle in mm	1.		2.			3.		
	Durchmesser der kreisförmigen Lichtquelle	Lichtstärke in Kerzen	Breite der Lichtquelle $2R + s$	Höhe $2R + h$	Lichtstärke in Kerzen	Breite der Lichtquelle $2R + s + s \frac{a}{f}$	Höhe $2R + h + h \frac{a}{f}$	Lichtstärke in Kerzen
1000	250	60 000	250,1	253,0	60 948	251,1	283,0	70 465
500	125	15 000	125,1	128,0	15 474	125,6	143,0	17 855
234	58,6	3 294	58,7	61,6	3 516	58,9	68,6	4 000
120	30	864	30,1	33,0	978	30,2	36,6	1 116
100	25	600	25,1	28,0	695	25,2	31,0	791
60	15	216	15,1	17,9	273	15,2	19,8	308
40	10	96	10,1	13,0	134	10,1	14,2	150
25	6,25	37,5	6,35	9,25	61,5	6,4	10,0	68
10	2,5	6	2,6	5,5	15,8	2,6	5,8	16,9
4	1,0	0,96	1,1	4,0	5,1	1,1	4,1	5,3
1	0,25	0,06	0,35	3,250	1,37	0,35	3,28	1,39
0,4	0,1	0,0096	0,225	3,125	0,755	0,229	3,137	0,760
0,1	0,025	0,0006	0,125	3,025	0,4620	0,126	3,055	0,4628

des Austrittsspalt es gelangen kann. Ich will diese Verhältnisse für elektrisches Bogenlicht, elektrisches Glühlicht, Petroleumflammen, ARGAND-Gasbrenner und AUER-Licht, Acetylenflammen und DRUMMOND'sches Kalklicht weiter verfolgen.

b) Beleuchtungsstärke durch elektrisches Bogenlicht.

Bei der elektrischen Bogenlampe des hiesigen physikalischen Institutes nehmen Flammenbogen und glühende Kohlen spitzen einen Raum von etwa 10 mm Durchmesser ein¹. Die Lampe war mit einem Strom von 20 Ampère und 55 Volt gespeist, wie Herr Prof. Dr. OBERBECK die Freundlichkeit hatte mir mitzuteilen, und dürfte nach WARBURG² eine Lichtstärke von etwa 2000 Kerzen besitzen. Solche Angaben beziehen sich nach Herrn Professor DIETRICH's in Stuttgart freundlicher Belehrung auf eine Durchschnittshelligkeit. Die maximale Lichtstärke, welche elektrische Bogenlampen bei verticaler Stellung der Kohlenstäbe in etwa 40° vom Horizont nach unten ausstrahlen, ist etwa zwei- bis dreimal so gross³. Diese aber pflegt man gewöhnlich bei Projections- und sonstigen wissenschaftlichen Beleuchtungszwecken zur Anwendung zu bringen, indem man die Kohlenstäbe entsprechend geneigt gegen die Verticale aufstellt, wie das auch bei der oben erwähnten Lampe der Fall ist. Wenn ich daher bei dieser Lampe für einen kleinen Bezirk eine Lichtstärke von 4000 Kerzen annehme, so möchte ich glauben, dass ich dieselbe eher zu niedrig als zu hoch gegriffen habe. Eine Lampe von dieser Stärke sollte nach der obigen Tabelle etwa 234 mm vor dem Eintrittspalt liegen, um den Austrittspalt mit Sonnenintensität zu bestrahlen. In diesem Abstand könnte der Flammenbogen der Apertur des Collimators und der Ausdehnung des

¹ Der eigentliche Flammenbogen hat nur eine Ausdehnung von etwa 3 auf 5 mm. ALLARD bestimmte an einer 200 Carcel (1816 H. K.) starken Lampe den Durchmesser der Leuchtfläche ebenfalls zu etwa 1 cm. PALAZ *Traité de Photométrie industrielle*. Paris (1892). p. 231.

² WARBURG giebt in seinem Lehrbuch der Physik, 2. Aufl. (1896), p. 352 an, dass die Lichtstärke einer mit 16 Ampère und 55 Volt betriebenen Bogenlampe sich auf ungefähr 1600 Kerzen belaufe.

³ PALAZ, *Traité de Photométrie industrielle*. Paris (1892). p. 210; STRECKER, *Hilfsbuch für die Elektrotechnik*. Berlin (1898). p. 213.

Spaltes entsprechend eine Grösse von 59 mm auf 69 mm haben, er hat aber nur einen Durchmesser von 10 mm, kann also auch dementsprechend bis auf 40 mm, wie aus der obigen Tabelle (p. 386) folgt, herangerückt werden. In diesem Abstand wären aber für eine der Sonne äquivalente Beleuchtung nur etwa 150 Kerzen erforderlich. Der Spalt wird also etwa $4000 : 150 = 27$ mal stärker beleuchtet. Diese Intensität dürfte etwa die Grenze sein, bis zu welcher man die Beleuchtung mit künstlichen Lichtquellen bei einem Collimator von der Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ treiben kann¹.

Eine grosse elektrische Bogenlampe bis auf etwa 4 cm dem Spalt zu nähern, bietet wohl einige Schwierigkeiten. Die Lampe lässt sich aber auch ohne Lichtverlust für den Austrittsspalt weiter entfernen, wenn man mittelst einer Beleuchtungslinse ein Bild des Flammenbogens auf dem Spalt entwirft, wie das LOCKYER bei seinen Spectraluntersuchungen bereits gethan hat. Von einer derartig verwendeten Beleuchtungslinse ist wiederholt behauptet worden, dass sie bei naheliegenden Lichtquellen keine Verstärkung der Collimatorbeleuchtung erzeugen könne, wie ebenso oft auch das Gegentheil hervorgehoben worden ist. Auf diese Frage werde ich weiter unten im Abschnitt e p. 397 näher eingehen. Bei der Verwendung elektrischen Bogenlichtes kann die Linse in der That gute Dienste leisten und von der wieder auf 234 mm vom Spalt aufgestellten Bogenlampe eine 27fache Sonnenbeleuchtung bewirken. Die Linse muss in diesem Fall eine Brennweite von $\frac{234}{4}$ mm — ich will rund 60 mm annehmen — haben, um in die Mitte zwischen Spalt und Flammenbogen, also 120 mm von beiden entfernt aufgestellt zu werden. In einer Entfernung von 120 mm soll aber nach der letzten Tabelle die Leuchtfäche, oder in diesem Fall die Linse eine Ausdehnung von 30,2 mm auf 36,6 mm haben, die Linse muss also eine recht grosse Apertur besitzen. Ferner sollte sie keine gar zu grosse sphärische Abweichung haben, was bei einfachen Linsen dieser Apertur immer zu be-

¹ Sollte der Flammenbogen von 4000 Kerzen Maximalstärke einen Durchmesser von 12 mm haben, so liesse sich mit demselben eine etwa zwanzigfache Sonnenbeleuchtung erreichen.

fürchten ist. Für eine derartige Beleuchtungslinse ist es daher am besten, eine STEINHEIL'sche Lupe erweiterter Construction, welche ein Verhältniss von Öffnung zu Brennweite wie 2 zu 3 besitzt, zu verwenden¹. Eine solche Lupe von 60 mm Brennweite hat eine Öffnung von 40 mm, sie reicht also bei einer Entfernung von 120 mm vom Spalt zur Beleuchtung des Collimators vollkommen aus, da dessen Apertur $\text{tg } \frac{\alpha}{2}$ nur $\frac{1}{8}$ betragen soll.

In Fig. 18 ist der Gang der Lichtstrahlen durch eine solche schematisch angedeutete Lupe von der Lampe bis zur Collimatorlinse in verticalem Querschnitt gezeichnet. Man sieht, dass nur ein sehr kleiner Theil des Flammenbogens, welcher genau gleich der Grösse der Spaltfläche ist, Verwendung findet; es könnte also auch eine viel kleinere Lichtquelle den gleichen Erfolg haben, wenn nur ihre Lichtspannung die gleiche bleibt. Bei einem 3 mm langen Spalt genügt auch ein nicht wesentlich grösserer Flammenbogen (um die Einstellung zu erleichtern, wird man ihn wohl ein klein wenig grösser machen), dessen Gesamtleuchtkraft nicht mehr als $\frac{3^2}{10^2} \cdot 4000 = 360$ Kerzen zu betragen hätte. In diesem Fall ist es aber ganz besonders wünschenswerth, eine aplanatische Linse, also eben eine STEINHEIL'sche Lupe, anzuwenden, damit infolge einer undeutlichen Abbildung

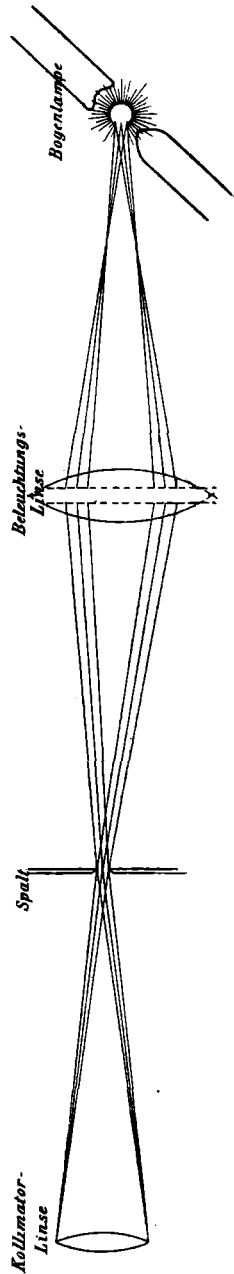


Fig. 18. $\frac{1}{3}$ der wirkl. Grösse.

¹ C. ZEISS, Mikroskope und mikroskop. Hilfsapparate. 1895. p. 103.

keine weitere Ausbreitung und Lichtschwächung des auf dem Spalt entworfenen Bildes erfolgt.

Eine elektrische Bogenlampe von nur 360 Kerzen Stärke liesse sich nun wohl auch näher als auf 240 mm an den Spalt heranrücken und demnach möchte man glauben, auch eine kleinere Beleuchtungslinse wählen zu dürfen. Die Grenze dieser Verkleinerung ist aber bald erreicht, da mit grösserer Annäherung an den Spalt die Apertur der Linse ganz ungeheuer wachsen müsste. Man könnte im höchsten Fall eine Linse von 30 mm Brennweite anwenden, die in 60 mm Entfernung von Spalt und Lichtquelle aufzustellen wäre. Ihre freie Öffnung sollte, wie aus der Tabelle auf p. 386 hervorgeht, 19,8 mm messen, und diese Maasse werden von den STEINHEIL'schen Lupen gerade noch erreicht. Wollte man die Lampe in 80 mm Entfernung vom Spalt aufstellen, so müsste die Hilfslinse eine Brennweite von 20 mm und eine Öffnung von 14,2 mm haben; derartige Linsen sind aber kaum noch aplanatisch und achromatisch herzustellen. Eine weitere Verstärkung der Beleuchtung ist mit dieser Annäherung der Lichtquelle an den Spalt nicht verbunden, sie hat den einzigen Vortheil der Verwendung einer kleineren und also etwas billigeren Beleuchtungslinse.

c) Beleuchtungsstärke durch elektrisches Glühlicht und glühenden Platindraht.

Eine 27fache Verstärkung der dem einfachen Sonnenlicht entsprechenden Beleuchtung lässt sich mit elektrischen Glühlampen nicht erreichen. Da aber eine derartig intensive Beleuchtung in vielen Fällen für die Beobachtung auch gar nicht nothwendig sogar nicht einmal erwünscht sein kann, und da diese Lampen eine so grosse Bequemlichkeit in ihrer Handhabung besitzen, so will ich untersuchen, wie weit die Beleuchtungsstärke des Austrittsspaltcs mit ihnen zu erreichen möglich ist.

Man wird im Allgemeinen mit einer solchen Lampe recht nahe an den Spalt heranrücken können und daher auch kleinere Gesammtlichtstärken gebrauchen. Über die Lichtspannung dieser elektrischen Glühlampen von geringer Stärke geben die in der folgenden Tabelle enthaltenen Zahlen einige Anhaltspunkte.

Lichtstärke in Kerzen	Länge des Kohlenfadens in mm	Dicke des Kohlenfadens in mm	Längsschnitt des Kohlen- fadens in qmm	Lichtspannung
25.	145	0,27	39,15	0,64 ¹
20			23	0,87 ²
16	125	0,2	25	0,64 ¹
10	110	0,15		0,61 ¹
6	20	0,15	3	2,0
3—4	12	0,15	1,8	1,7—2,2
1—2	5	0,15	0,75	1,3—2,8

Es hat hiernach den Anschein, als wenn bei den kleineren Fäden eine grössere Lichtspannung zu erreichen wäre. Sollte dies aber nicht daran liegen, dass man die kleineren Lampen überhaupt stärker in Anspruch nimmt, also gleichsam überanstrengt und dadurch eine kürzere Zeit gebrauchsfähig macht? Wenn dies der Fall ist, so würde sich wohl auch bei den grösseren Glühlampen die Lichtspannung etwas verstärken lassen, auf die Gefahr hin, eine etwas weniger lange Lebensdauer als die gewöhnliche von etwa 1000 Stunden zu erreichen. Nach Herrn Professor DIETRICH's gütiger Mittheilung ist die Lichtspannung bei den 100kerzigen Lampen etwas höher als bei den Lampen mittlerer Grösse.

Soll das Licht des Kohlenfadens nun möglichst vollständig ausgenutzt werden, so muss man diesem eine etwas andere Form geben, als es bei den gewöhnlichen Glühlampen der Fall ist; man muss die sogenannten Focuslampen verwenden. Am vortheilhaftesten wäre es, wenn der Faden in eine ebene Spirale aufgerollt würde, welche in einer Richtung etwas mehr zusammengedrückt ist, als in der dazu senkrechten. Diese Spirale dürfte beispielsweise bei einer Lampe von 16 Kerzen nicht breiter als 2,6 mm und nicht höher als 5,8 mm sein, wenn man die Intensität der einfachen Sonnenbeleuchtung

¹ SIEMENS-Lampe nach PALAZ, *Traité de Photométrie industrielle*. Paris 1892. p. 177. An einer Lampe des hiesigen Physikalischen Institutes von nominell 16 Kerzen, welche schadhaft geworden war und daher behufs Messung des Kohlenfadens geöffnet wurde, fand ich eine Lichtspannung von 0,66.

² Nach Sir W. THOMSON, *Nature* 27 (1883). p. 277; cf. MASCART, *Traité d'Optique* 3 (1893). p. 264.

mit dieser Glühlampe in 10 mm Entfernung vom Spalt erreichen wollte. Bei der in der Tabelle auf p. 391 angegebenen Lampe ist das nicht ausführbar, weil der Längsschnitt des Kohlenfadens schon 25 qmm beträgt und jene längliche Spirale im äussersten Fall 17 qmm bedecken könnte. Wenn es indessen möglich ist, eine Glühlampe von 16 Kerzen auf eine Lichtspannung von 2 Kerzen pro qmm zu bringen, bei welcher dann also der Längsschnitt des Fadens nur 8 qmm beträgt, so möchte ich glauben, dass dieser Faden sich in den vorgeschriebenen Flächenraum zusammendrängen lässt, und mit der Lampe also auch die Intensität der einfachen Sonnenbeleuchtung erreicht werden kann. Sollte eine derartige Lichtspannung aber bei den grösseren Lampen nicht möglich sein, so wird man wenigstens eine Beleuchtung erzielen, welche etwa dem dritten oder vierten Theil der einfachen Sonnenbeleuchtung gleichkommt. Die von Herrn BÖRNSTEIN construirte „Bostonlampe“, bei welcher dünnwandige, hohle Kohlencylinder zum Glühen gebracht wurden und deren Lichtspannung, wie auch Herr Professor DIETRICH mir bestätigte, eine aussergewöhnlich hohe gewesen ist, hätte hier geeignete Verwendung finden können; leider werden diese Lampen gegenwärtig nicht mehr gebaut.

Statt einer Lampe von 16 Kerzen kann man auch noch kleinere Glühlampen zur Beleuchtung verwenden, dann aber liegt der Gedanke nahe, die Lichtquelle in die Ebene des Spaltes zu legen, d. h. den Spalt ganz zu beseitigen und an seine Stelle einen lichtausstrahlenden Faden zu setzen¹. Wie stark muss dieser der Grösse des Spaltes gleichkommende, also 0,1 mm dicke und 3 mm lange Faden leuchten, um so viel Licht aus dem Collimator ausstrahlen zu lassen — oder was das Gleiche bedeutet zum Austrittsspalt zu senden —, wie dies durch einfache, durch keine Linse concentrirte Sonnenbeleuchtung geschieht? An Hand der in der obigen Tabelle auf p. 386 verzeichneten Werthe lässt sich die Frage näherungs-

¹ Herr Dr. ENGLISCH theilte mir mit, dass eine derartige Anordnung schon längst von QUINCKE in Heidelberg mittelst eines durch einen BUNSEN-Brenner zum Glühen gebrachten Platindrahtes getroffen worden sei, um einen möglichst einfachen Spectralapparat zur Beobachtung der Absorptionsspectra zu erhalten.

weise auf graphischem Wege beantworten. Exacter wird die Aufgabe durch folgende Überlegung gelöst. Die von der Sonne durch den Eintrittsspalt tretende Lichtmenge beträgt

$$\frac{\text{Fläche des Spaltes} \times 60\,000 \text{ Kerzen}}{\text{Oberfläche der Kugel von } 1000 \text{ mm Radius}} = \frac{0,3 \times 60\,000}{4\pi 1000^2}$$

Die gleiche Lichtmenge muss von dem Faden nach der ganzen Oberfläche der Collimatorlinse ausgesandt werden. Ist die Leuchtkraft des Fadens x , der Radius der Collimatorlinse r , die Brennweite der Collimatorlinse $8r$, wie immer nach Combination III, dann muss also, um die gleiche Beleuchtungsstärke des Austrittsspalt zu erhalten,

$$\frac{0,3 \times 60\,000}{4\pi 1000^2} = \frac{\pi r^2}{4\pi (8r)^2} \cdot x$$

sein, woraus folgt

$$x = 0,366693.$$

Auf graphischem Wege erhielt ich $0,3660 \pm 0,0060$. Die Leuchtkraft des Fadens muss also etwa $\frac{1}{3}$ Kerzenstärke betragen, um eine der Sonnenbeleuchtung äquivalente Beleuchtungsstärke des Austrittsspalt zu geben. Das gleiche Resultat ergibt sich übrigens auch unmittelbar aus der Thatsache¹, dass eine Fläche α genau so viel Licht von einer Fläche β erhält, als umgekehrt α auf β sendet, wenn α die gleiche Leuchtkraft pro Flächeneinheit, also die gleiche Lichtspannung wie die Fläche β besitzt. Die Fläche des Spaltes sendet genau so viel Licht durch die Collimatorlinse, wie ein an seiner Stelle gedachtes gleich grosses Stück der Beleuchtungsflamme.

Eine Lichtintensität von 0,366693 Kerzen pro 0,3 qmm oder, was dasselbe ist, eine Lichtspannung von 1,2223 Kerzen ist nach der Tabelle auf p. 391 bei kleinen Glühlampen, um die es sich hier nur handeln kann, gut zu erreichen und daher kommt man, wenn die sonstigen Überlegungen richtig sind, zu dem überraschenden Resultat, dass mit einer sehr kleinen Glühlampe, deren Faden in der Ebene des Spaltes liegt, die gleiche Beleuchtungsstärke des Austrittsspalt, wie mit einfachem Sonnenlicht erzielt wird. Auch könnte man die gleiche Wirkung durch eine Glühlampe erreichen, deren Licht durch

¹ LAMBERT, OSTWALD'S Klassiker 31. 1892. p. 73, Lehrsatz 16.

eine Beleuchtungslinse (vergl. p. 389 und Abschnitt e p. 397) auf dem Spalt concentrirt wird. Der Faden einer solchen Lampe brauchte nie erheblich länger als der Spalt zu sein (1—2 cm Länge würde auch für andere Spectralapparate immer genügen); er sollte aber etwas dicker sein, als dies gewöhnlich bei den Glühlampen der Fall ist, also vielleicht einen Durchmesser von 1 mm haben, damit man durch eine Beleuchtungslinse bequem ein scharfes Bild auf dem Spalt entwerfen kann, ohne doch bei geringen Erschütterungen der Lichtquelle ein Herausfallen des Bildes aus dem Spalt und damit eine Verdunklung des Gesichtsfeldes befürchten zu müssen.

Bei einer Lampe, welche direct den Spalt ersetzen soll, ist zwischen den beiden Schenkeln des glühenden Fadens eine undurchsichtige Platte anzubringen, welche das Licht von dem hinteren Faden abblendet. Der Vorderfaden muss eine möglichst gerade Linie bilden, 0,1 mm dick sein und durch ein Diaphragma auf 3 mm abgeblendet werden, wenn er den Dimensionen des bisherigen Spaltes gleichkommen soll. Ob die den Faden umgebende Glashülle den Gang der Lichtstrahlen ungünstig beeinflusst, bedarf eines Versuchs. Sollte dies der Fall sein, so wäre die Lampe vorne mit einer planparallelen Glasplatte zu schliessen. Die Glashülle ganz fortzulassen und an Stelle des Kohlenfadens etwa einen glühenden Platindraht zu setzen, würde eine erheblich geringere Beleuchtung zur Folge haben. Nach den Angaben über die VIOLLE'sche Platineinheit, d. i. der Lichtstärke von 1 qcm Platin im Augenblick seiner Erstarrung, kann nämlich ein solcher glühender Draht höchstens auf eine Lichtstärke von 0,175—0,195 HEFNER-Kerzen pro Quadratmillimeter gebracht werden. (STRECKER, Hilfsbuch der Elektrotechnik. Berlin 1898. p. 216.) Man wird aber einen solchen Draht durch einen elektrischen Strom kaum stärker als mit 0,1 Kerzen pro Quadratmillimeter leuchten lassen dürfen, wenn man nicht jeden Augenblick ein Abschmelzen befürchten will. In diesem Fall würde der Draht von 0,1 mm Dicke und 3 mm Höhe eine Lichtstärke von 0,03 Kerzen und demnach $\frac{1}{12}$ der Sonnenbeleuchtung geben. Eine solche Beleuchtungsstärke lässt sich aber auch mit einfacheren Mitteln erreichen. Natürlich muss die Lage des glühenden Fadens eine ganz bestimmte und unverrückbare

gegenüber der Linse des Collimators sein. Um aber eine Controle dieser Lage ausführen zu können, wäre vielleicht die Erscheinung der Umkehrung der FRAUNHOFER'schen Linien zu verwenden.

Ein selbstleuchtender Spalt würde es auch ermöglichen, die Collimatorlinse durch einen parabolischen Spiegel zu ersetzen, in dessen Brennebene der Faden liegt. In diesem Fall müsste die Glühlampe nur einen geradlinigen Faden enthalten, dessen directe Bestrahlung der Prismen durch einen kleinen Schirm verhindert wird. Giebt man diesem parabolischen Spiegel eine Brennweite so gross wie die der bisher angewandten Collimatorlinse, so erhält man, gleiche Öffnung der Linse des Austrittsrohres vorausgesetzt, auch die gleiche Beleuchtungsstärke (wenn man den kleinen Unterschied der Lichtstärke von Reflector und Refractor nicht berücksichtigt). Wenn aber die Brennweite des Spiegels kleiner, z. B. nur 50 mm gross ist, so würde man mit einer 4 mal kleineren Leuchtfläche, also mit einem 0,05 mm dicken und 1,5 mm langen Draht (der natürlich einen sehr kleinen elektrischen Strom verlangt, um eine Lichtstärke von etwa 0,18 Kerzen zu geben) den gleichen Erfolg, also wieder die gleiche Beleuchtungsstärke des Austrittsspalt, wie durch einfaches Sonnenlicht erhalten.

d) Beleuchtungsstärke durch DRUMMOND'sches Kalklicht,
Gas-, Acetylen- und Petroleumlicht.

Über die Verwendbarkeit von DRUMMOND'schem Kalk- (oder Zirkon-) Licht, von Acetylenlicht, von Petroleumflammen, von Leuchtgas in Form der ARGAND- oder der AUER-Brenner und über den Werth dieser Lichtquellen gegenüber dem einfachen Sonnenlicht giebt die folgende tabellarische Übersicht, welche die Spannung dieser Lichtquellen, also die Leuchtkraft pro Quadratmillimeter mittheilt, einige Anhaltspunkte. Die Lichtspannung der einfachen Sonnenbeleuchtung, auf einen Collimator von der Apertur $\text{tg } \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ bezogen, ist wieder zu 1,22231 angenommen worden. Die Zahlen machen keinen Anspruch auf Genauigkeit sondern sollen nur ein ungefähres Bild der Grössenordnung, in der die Lichtspannungen der verschiedenen Flammen sich bewegen, geben.

	Höhe Breite der Leucht- fläche in mm	Leuchtfläche in qmm	Leuchtkraft in HEFNER-Kerzen	Licht- spannung	Verhältnis zur einfachen Sonnen- beleuchtung
DRUMMOND'sches Kalk- licht (Leuchtgas und Sauerstoff)	7 7 ¹⁾	40	144 ²⁾	3,600	3
AUER-Brenner	35 25	875	30—90	0,034—0,102	$\frac{1}{38} - \frac{1}{12}$
Acetylenlicht ³⁾	24 19	360	24	0,067	$\frac{1}{18}$
ARGAND-Brenner	25 40	1000	20	0,02 ⁴⁾	$\frac{1}{27}$
Petroleumflamme ⁴⁾	44 44	1520	45 NK = 54 HK	0,036	$\frac{1}{34}$
Öllampe mit 1—6 Dochten ⁵⁾	88 88	6080	115 NK = 138 HK	0,022	$\frac{1}{35}$
	— —	—	—	0,018—0,045	$\frac{1}{27} - \frac{1}{35}$

Jede dieser Flammen muss nun, damit sie voll ausgenutzt wird, so nahe an den Spalt herangerückt werden, dass sie vom Spalt aus gesehen so gross erscheint, wie die in der Tabelle auf p. 386 unter 3 angegebenen zu den verschiedenen Entfernungen gehörigen Flächen. Rückt man sie noch näher an den Spalt, so ist damit keine Verstärkung der Beleuchtung verbunden, entfernt man sie aber weiter, so tritt eine Schwächung ein. Im günstigsten Fall ist immer die Beleuchtungsstärke des Eintrittsspaltess so gross, wie ein an seine Stelle gesetztes gleich grosses Stück der Beleuchtungsflamme.

Das DRUMMOND'sche Kalklicht, bei welchem ebenso wie bei dem elektrischen Bogenlicht eine Beleuchtungslinse mit Vortheil zu verwenden ist, kann eine etwa dreifache Sonnenbeleuchtung geben. Mit einem AUER-Brenner lässt sich etwa

¹ Die ganze leuchtende Kalkfläche ist etwas grösser, der stark glänzende Kern aber etwas kleiner, so dass die obigen Zahlen ungefähr das Richtige treffen.

² MÜLLER-POUILLET, Lehrbuch der Physik, 9. Aufl. 1897. p. 796.

³ Nach eigenen Messungen, welche Herr Prof. Dr. OBERBECK mir gestattete im hiesigen Phys. Institute auszuführen.

⁴ MEYER'S CONVERS.-Lexikon, 5. Aufl. 10 (1896). p. 988. Patent-Reichs-lampe von SCHUSTER & BÄR.

⁵ Nach ALLAND, cf. PALAZ, Photométrie industrielle. Paris 1892. p. 231.

⁶ VOIT fand 0,03 und für SIEMENS'sche Regenerativbrenner 0,04—0,06. cf. PALAZ, l. c. p. 232.

$\frac{1}{12}$ der Sonnenbeleuchtung erreichen, da aber die Lichtspannung der einzelnen Fäden des Glühstrumpfes wohl 2—3 mal grösser als diejenige der ganzen Flamme ist, so dürfte man mit einem AUER-Brenner von sehr engmaschigem Gewebe eine Beleuchtung erhalten, welche etwa dem sechsten Theil der Sonnenbeleuchtung gleichkommt. Von den übrigen Lichtquellen ist allenfalls noch Acetylenlicht zu berücksichtigen. Man erhält hier bei Verwendung einer Beleuchtungslinse auch eine Verstärkung, wenn man die Flamme nicht quer, sondern parallel zum Collimator aufstellt. ARGAND-Brenner und Petroleumlampen dürften sich als nicht geeignet zur Beleuchtung des Instrumentes erweisen.

e) Beleuchtungslinse für Collimatoren bei Verwendung künstlicher Lichtquellen.

Man hat vorgeschlagen, das Licht einer Lampe, welche zur Beleuchtung eines Collimators dient, durch eine Linse auf den Spalt zu concentriren¹, um dadurch eine höhere Intensität für das durchgehende Licht zu erhalten. Obgleich nun wiederholt behauptet wurde², dass bei der Verwendung gewöhnlichen Lampenlichtes eine Verstärkung in dem angegebenen Sinn nicht möglich sei, werden solche Linsen immer von neuem wieder vorgeschlagen³ und werden viele der zu Collimatorbeleuchtungen dienenden Lampen mit derartigen Linsen versehen.

Folgende Betrachtungen sollen die Verhältnisse, welche bei der Beleuchtung eines Collimatorspaltes eintreten können, etwas näher erläutern. Der Einfachheit wegen will ich die Beleuchtung eines kreisförmigen Stückes des Collimatorspaltes vom Radius ρ in Betracht ziehen und auf die p. 380—387 besprochenen Feinheiten nicht weiter eingehen. Die Lichtquelle möge ebenfalls kreisförmig angenommen werden, sie habe den Radius R und befinde sich in der Entfernung a vor dem Spalt.

¹ WEBSKY, Zeitschr. f. Krystallogr. 4 (1880). p. 547—548. LIEBISCH, Bericht über d. wissensch. Instr. a. d. Berliner Gewerbeausstellung i. J. 1879. Berlin 1880. p. 327.

² BREZINA, Methodik der Krystalbestimmung. Wien 1884. p. 25—29. LANDOLT, Das optische Drehungsvermögen organischer Substanzen. 2. Aufl. Berlin 1898. p. 354.

³ GROTH, Physikalische Krystallographie. 3. Aufl. Leipzig 1895: p. 625.

Bei der Beleuchtung ohne Linse sendet jeder Flammenpunkt einen Strahl nach einem Punkt des Spaltes; bei der Beleuchtung mit einer Linse sendet ein Flammenpunkt viele Strahlen nach einem Punkt des Spaltes¹. Für die Intensität der Beleuchtung ist es aber einerlei, ob n Strahlen in einem Flammenpunkt ihren Ursprung nehmen, oder ob sie von n verschiedenen Punkten herrühren, vorausgesetzt, dass diese verschiedenen Flammenpunkte alle die gleiche Lichtspannung haben. Die Lichtspannung der Lampe sei σ , dann ist die Beleuchtungsstärke des Collimatorspaltes, wie dieselbe ohne Concentrationslinse erreicht wird,

$$B = \sigma \frac{\pi \varrho^2 \cdot \pi R^2}{a^2}.$$

In diesem Ausdruck sind σ , ϱ , R und π constant, während a variabel ist. Solange $\frac{R}{a}$ kleiner ist als die Tangente des halben Öffnungswinkels des Collimators, lässt sich durch Verkleinerung von a also durch weiteres Heranrücken der Lampe an den Spalt die Lichtmenge, welche die Collimatorlinse durchläuft, vergrössern. Wird $\frac{R}{a}$ gleich der Tangente des halben Öffnungswinkels des Collimators, erscheinen also Lampe und Collimatorlinse vom Spalt aus gesehen gleich gross, so ist das Maximum der Beleuchtung erreicht, nämlich

$$B = \sigma \cdot \pi^2 \cdot \varrho^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Denn ein weiteres Heranrücken an den Spalt würde zur Folge haben, dass nur ein Theil des von der ganzen Fläche πR^2 ausgesandten Lichtes durch die Collimatorlinse zum Austritt gelangte. Würde z. B. die Entfernung der Lampe noch m mal kleiner werden, so könnte die Collimatorlinse nur von einem solchen Stück der Leuchtfäche bestrahlt werden, welches einen m mal kleineren Durchmesser hätte. In diesem Fall wäre

$$B = \sigma \frac{\pi \varrho^2 \cdot \pi \left(\frac{R}{m}\right)^2}{\left(\frac{a}{m}\right)^2} = \sigma \cdot \pi^2 \varrho^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}.$$

¹ Hier ist unter Punkt eigentlich ein kleines Flächenstück gemeint. cf. CLAUSIUS, Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie. 1. Braunschweig 1864. p. 327; oder Pogg. Ann. 121. 1864. p. 6—7, Anm.

Die Lichtmenge, welche den Collimator durchläuft, wird also nicht kleiner und nicht grösser, als sie durch das obige Maximum dargestellt ist.

Bei der Beleuchtung des Collimatorspaltes mit einer Linse möge angenommen werden, dass Leuchtfläche und Spalt in Bezug auf diese Linse in conjugirten Ebenen liegen, dass also immer ein scharfes Bild der Flamme auf dem Spalt entworfen werde. Ferner soll der Durchmesser der Linse sich zu ihrem Abstand vom Spalt verhalten, wie der Durchmesser der Collimatorlinse zu ihrer Brennweite. Wenn dann a_1 die Entfernung der Linse vom Spalt und R_1 der Radius ihrer Öffnung ist, dann soll also immer sein

$$\frac{R_1}{a_1} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Ich will nun bei drei verschiedenen Linsen die Beleuchtungsstärke berechnen.

1. Die Brennweite der Linse sei $\frac{a_1}{2}$, dann befindet sich unter der obigen Voraussetzung die Lampe in der Entfernung a_1 von der Linse und diese wieder in der Entfernung a_1 vom Spalt, und von dem Licht ihrer ganzen Fläche πR^2 gelangt eine der Spaltgrösse $\pi \varrho^2$ entsprechende Menge zur Collimatorlinse. Dieses kleine Stück der Leuchtfläche sendet auf die Beleuchtungslinse die Lichtmenge

$$B = \sigma \cdot \pi \varrho^2 \frac{\pi R_1^2}{a_1^2} = \sigma \cdot \pi^2 \cdot \varrho^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}.$$

2. Die Brennweite der Linse sei derart gewählt, dass die Lampe n mal weiter von der Linse als diese vom Spalt abstehe. Das auf der Ebene des Spaltes entworfene Bild der Flamme ist n mal linear verkleinert und von dem Licht ihrer ganzen Fläche πR^2 gelangt eine $\pi (n \cdot \varrho)^2$ grosse Menge zur Collimatorlinse, und diese Fläche sendet nun wieder auf die Beleuchtungs- und infolge dessen auf die Collimatorlinse die Lichtmenge

$$B = \sigma \frac{\pi n^2 \cdot \varrho^2 \cdot \pi \cdot R_1^2}{n^2 \cdot a_1^2} = \sigma \cdot \pi^2 \cdot \varrho^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}.$$

3. Die Brennweite der Linse sei schliesslich derart gewählt, dass der Abstand der Lampe von der Linse n mal kleiner ist, als der Abstand der letzteren vom Spalt, dann

erhält man für die den Collimator verlassende Lichtmenge den Werth

$$B = \sigma \frac{\pi \frac{\rho^2}{m^2} \cdot \pi R_1^2}{\frac{a_1^2}{m^2}} = \sigma \cdot \pi^2 \cdot \rho^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}.$$

In allen drei Fällen ergibt sich also, wenn man von der durch Reflexion und Absorption erfolgenden Lichtschwächung absieht, dass die den Collimator durchlaufende Lichtmenge die gleiche bleibt, wenn auch die Lampe in sehr verschiedenen Stellungen vom Spalt aufgestellt ist. Eine Steigerung der Beleuchtungsstärke gegenüber derjenigen einer Lampe in der Entfernung a lässt sich also niemals erreichen und da diese Beleuchtungsstärke durch ein und dieselbe Lampe bei einem Collimator von vorgeschriebener Apertur auch schon ihr Maximum erlangt hat¹, so bringt also eine Beleuchtungslinse nur den Vortheil mit sich, die Lampe weiter vom Spalt entfernt aufstellen zu können, ohne doch — trotz dieser grösseren Entfernung — an Intensität der Beleuchtung wesentlich zu verlieren².

Die Entfernung, bis zu welcher die Lampe hinausgeschoben werden kann, findet ihre Grenze in dem ersten Fall

¹ Wenigstens lässt sich dieses Maximum auf dioptrischem Wege nicht überschreiten. Dagegen kann man auf katoptrischem Wege, also durch Anwendung von Spiegeln, eine weitere Steigerung der Beleuchtung eines Collimators z. B. auf folgende Weise erreichen. Die Lampe werde von zwei Hohlspiegeln eingeschlossen, von denen der eine ebensoweit von der Lampe, wie diese letztere vom Spalt entfernt ist, während der andere nahe am Spalt liegt und in der Mitte eine der Spaltgrösse entsprechende Durchbohrung trägt. Der Krümmungsradius des ersten Spiegels ist so bemessen, dass Lampe und Spalt in conjugirten Ebenen liegen. Der Krümmungsradius des zweiten Spiegels ist gleich dem Abstand von der Lampe. Wenn die Lichtstrahlen durch Reflexion an den Spiegeln nicht geschwächt würden und wenn diese Strahlen bei dem Durchgang durch die eigene Lampe keine Absorption erführen, so liesse sich durch die obige Spiegelcombination eine vierfach grössere Beleuchtung als durch die Lampe allein erreichen. Wegen jener beiden schwächenden Momente mag sich die Beleuchtung nur etwa verdoppeln lassen.

² Auch TUTTON spricht sich in seiner Abhandlung *Philosoph. Transact.* 185. 1894. p. 934 oder *Zeitschr. f. Kryst.* 24. 1895. p. 471 in ähnlichem Sinne aus.

im Durchmesser der Beleuchtungslinse, im zweiten Fall in der Grösse der Lampe und im dritten Fall in der Linsenapertur.

Hätte diese Beleuchtungslinse z. B. einen Durchmesser von 250 mm und eine Brennweite von 500 mm, so würde man bei einem Collimator von der Apertur $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{8}$ die Lampe in 2 m Entfernung aufstellen können, um die gleiche Intensität der Beleuchtung wie in 10 cm zu erhalten. Es wäre also schon bei der Aufstellung der Lampe in 2 m Entfernung eine sehr grosse Beleuchtungslinse erforderlich. Die Distanz könnte aber bei ein und derselben Lampe auch noch weiter vergrössert werden, eine theoretische Grenze giebt es hier nicht, nur würden bald gewaltig grosse Linsen nothwendig sein.

Im zweiten Fall ist die Grenze, bis zu welcher man die Lampe hinausrücken darf ohne an Intensität der Beleuchtung zu verlieren, erreicht, wenn n so gross wird, dass $n \cdot \rho$ kleiner als R ist. Angenommen, die Lampe habe einen Durchmesser von 25 mm, dann kann ein etwa 8mal verkleinertes Bild derselben auf den Spalt geworfen werden, um diesen bei 3 mm grösster Ausdehnung zu bedecken. Welche Linse ist erforderlich, um bei 2 m Abstand der Lampe die gleiche Intensität wie bei 10 cm Abstand ohne Linse zu erhalten? Es ist

$$a + 8a = 200, \text{ also } a = 22,22 \text{ cm.}$$

Die Linse muss alsdann eine Brennweite von $19\frac{3}{4}$ cm und eine Öffnung von mindestens $5\frac{1}{2}$ cm haben, darf also wesentlich kleiner als im ersten Fall sein und auch ein viel günstigeres Verhältniss zwischen Öffnung und Brennweite besitzen. Wollte man die Lampe in noch grösserer Entfernung aufstellen und eine Beleuchtungslinse von der gleichen Apertur anwenden, so müsste der Durchmesser der Lampe bald sehr gross werden.

Im dritten Fall werde das Bild der Flamme 4mal vergrössert auf den Spalt geworfen, dann ist also, wenn wir wieder die Lampe in 2 m Entfernung aufstellen wollen,

$$a + \frac{1}{4}a = 200, \text{ also } a = 160.$$

Diese Linse müsste eine Brennweite von 32 cm und eine Öffnung von 40 cm haben. Abgesehen davon, dass eine solche

Linse, wenn sie nicht aus mehreren getrennten Linsensätzen besteht, nicht construirt werden kann, bedarf man hier also schon bei 2 m Entfernung gegenüber Fall 1 und 2 sehr grosser Linsen mit ganz enorm grosser Apertur.

Um noch einmal das Resultat hervorzuheben, so würde eine Lampe von 25 mm Breite in 100 mm Entfernung vor dem Spalt aufgestellt, eine Beleuchtung geben, welche durch keine Linsencombination verstärkt werden kann. Im Gegentheil würde die Beleuchtung mittelst einer Linse wegen des durch Absorption und Reflexion erfolgenden Lichtverlustes ein wenig schwächer ausfallen. In den meisten Fällen hat es keine Schwierigkeit, eine gewöhnliche Lampe bis auf diesen Abstand von 100 mm dem Spalt zu nähern, und daher sollte man glauben, dass die Beleuchtungslinse keinen Vortheil bringe. Hierbei ist aber immer vorausgesetzt, dass die Lichtquelle, soweit dieselbe Licht auf die Collimatorlinse sendet, überall die gleiche Lichtspannung habe. Das ist nun bei den meisten Flammen keineswegs der Fall. Besonders haben die ARGAND-Brenner von einem Punkt aus betrachtet am Rande eine höhere Lichtspannung als in der Mitte und daher wird, wenn die Beleuchtungslinse gerade vom Rande ein Bild auf dem Spalt entwirft, eine stärkere Beleuchtung entstehen, als wenn dieses von einem mittleren Flammentheil geschieht; sehr gross ist der Unterschied hier aber nicht. Etwas deutlicher tritt er bei den Flachbrennern hervor, wie ich mich auch durch einen Versuch mit der bereits oben (p. 396) erwähnten Acetylenlampe überzeugen konnte. Die Beleuchtungslinse wird hauptsächlich dort mit Vortheil verwendet werden können, wo man eine sehr kleine Leuchtfläche von hoher Lichtspannung zur Verfügung hat und diese wegen zu grosser Wärmeausstrahlung dem Collimators spalt nicht genügend nähern kann. Sie sollte also an erster Stelle beim Gebrauch von elektrischem Bogenlicht zur Verwendung kommen¹.

¹ Die Beleuchtungslampen, welche im Handel vorkommen, tragen zur Verstärkung der Beleuchtung eines Collimators häufig eine Linse, welche um ihre Brennweite von der Flamme absteht. Mit einer solchen Linse kann man allerdings in keiner Weise den gewünschten Zweck erreichen.

7. Schluss.

Der Hauptvorteil des Spectralapparates zur Erzeugung von monochromatischem Licht besteht darin, dass während einer ganzen Beobachtungsreihe weder dieses Instrument noch der eigentliche Beobachtungsapparat seine Stellung ändert. Es soll also während der Bestimmung der Auslöschungsschiefe oder der Dispersion der optischen Axen oder der Brechungsexponenten für die verschiedensten Farben weder das Mikroskop, der Axenwinkelapparat und das Goniometer, noch der Spectralapparat in seiner einmal richtig hergestellten Lage verschoben werden. Wenn man dies erreichen will, so muss man im Stande sein, die verschiedenfarbigen, nach einander austretenden monochromatischen Lichtbüschel zur Deckung zu bringen. Da nun der Heliostat oder eine künstliche Lichtquelle nicht leicht ihre Lage im Raum ändern können, ohne die Sicherheit der ganzen Messungsreihe zu gefährden, so ist die Aufgabe auf die Weise zu lösen versucht worden, dass man die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen nicht durch Bewegung des Ein- oder Austrittsrohres und der Prismen des Spectralapparates, sondern durch Bewegung der letzteren allein in einer constanten Richtung zum Austritt kommen lässt. Allerdings können hierbei nur die äussersten violetten Strahlen die Prismen mit den Winkeln der Minimalablenkung durchlaufen und eine ganz scharfe Abbildung des Spectrums geben; indessen ist bei passender Bewegung der Prismen die Verzerrung des Spectrums so gering, dass eine in praktischer Hinsicht genügend scharfe wenn auch theoretisch nicht ganz correcte Abbildung des Spectrums erfolgt.

Die Dimensionen des Apparates sind derart getroffen, dass man allenfalls noch auf den Unterschied der beiden D-Linien einstellen kann, auch ist dafür gesorgt, dass diese Einstellung bei mangelndem Sonnenlicht, bei welchem die FRAUNHOFER'schen Linien als Leitlinien dienen, durch einen ausgewertheten Mechanismus mit hinreichender Genauigkeit erfolgt.

Für die Lichtstärke, welche das Instrument bei einer bestimmten Leuchtquelle zu geben vermag, ist es von Bedeutung, dass die Apertur des Collimators, also das Verhält-

niss von Öffnung zu Brennweite der Collimatorlinse möglichst gross gewählt werde. Ferner ist bei der Verwendung von Sonnenlicht, wenn man eine sehr grosse Intensität des ausstrahlenden Lichtbüschels erhalten will, eine vor dem Eintrittsspalt stehende sphärische Beleuchtungslinse (nicht Cylinderlinse) von einer dem Collimator gleichkommenden Apertur anzubringen. Diese Beleuchtungslinse kann auch bei allen künstlichen Lichtquellen, welche wegen zu grosser Wärme nicht so nahe an den Spalt herangerückt werden können, um die ganze Collimatorlinse mit Licht zu erfüllen, mit Vortheil verwendet werden. Die Beleuchtungsstärke des austretenden Lichtbüschels ergiebt sich bei den verschiedenen Lichtquellen im Verhältniss zur einfachen durch keine Linse concentrirten Sonnenbeleuchtung aus der folgenden Tabelle:

Concentrirtes Sonnenlicht	700
Einfaches Sonnenlicht	1
Elektrisches Bogenlicht	27
Elektrisches Glühlicht vor dem Spalt	$\frac{1}{3} - \frac{1}{4}$
Elektrisches Glühlicht im Spalt oder durch eine Linse auf den Spalt concentrirt	1
Glühender Platindraht im Spalt	$\frac{1}{2} - \frac{1}{6}$
Acetylen-Licht	$\frac{1}{6} - \frac{1}{12}$
DRUMMOND'sches Kalklicht (Leuchtgas und Sauerstoff)	3
AUER-Licht	$\frac{1}{2} - \frac{1}{6}$
ARGAND-Brenner, Petroleumlicht, Öllampe	$\frac{1}{27} - \frac{1}{66}$

Tübingen, den 8. August 1898.

