5. *Ueber ein Photometer*¹⁾; von *E. W. Lehmann*.

(Mitgetheilt aus dem physikal. Laborat. der Univ. Erlangen.)

(Hierzu Taf. IV, Fig. 1–12.)

I. Einleitung.

Bei jedem Photometer, das auf der Vergleichung der Erleuchtung zweier Felder durch die beiden zu vergleichenden Lichtquellen beruht, sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

1. Jedes der zu vergleichenden Felder darf nur Licht von einer der beiden Lichtquellen erhalten.

2. Die Grenze, in der die beiden Felder zusammenstossen, muss scharf sein und im Moment der Gleichheit möglichst verschwinden.

3. Die optischen Theile sollen unveränderlich sein, was z. B. bei einem Fettfleck nicht der Fall ist.

4. Die den beiden zu vergleichenden Lichtquellen zugekehrten Theile des Photometers müssen möglichst identisch, symmetrisch angeordnet und leicht vertauschbar sein.

5. Die Ablesungen müssen so geschehen können, dass sie selbst bei einer grossen Zahl von Einzeleinstellungen nicht viel Zeit beanspruchen und den Beobachter nicht ermüden.

Vergleicht man die Construction von Photometern bei denen zwei aneinander stossende Flächen ihr Licht in der einen oder anderen Weise von den beiden gegebenen Lichtquellen erhalten, so ergibt sich folgendes:

Bei dem Bunsen'schen Photometer werden Flächen benutzt, die das Licht diffus reflectiren und durchlassen, bei dem von Lummer und Brodhun solche, die das Licht diffus und total reflectiren.

Bei dem Joly'schen Photometer²⁾ kommt nur diffus zerstreutes Licht in Betracht. Die beiden letzteren Photometer genügen den obigen Bedingungen, welche von verschiedenen Seiten für die Genauigkeit der Messung mit diesen Instru-

1) Auszug aus einer Inauguraldissertation.

2) Eine Beschreibung des Apparates findet sich in E. Wiedemann u. H. Ebert, *Physikalisches Praktikum* 1. Aufl. p. 232.

menten aufgestellt worden sind. — Das in Fig. 1 beschriebene Photometer ist nach demselben Princip, wie dasjenige von Joly construirt. — Ich untersuchte dasselbe auf Anregung von Hrn. Dr. Ebert, von dem ich auch während der Untersuchung mannigfache Hülfe und Unterstützung erfahren habe.

Das Photometer genügt den zu Anfang erwähnten Bedingungen und hat neben dem relativer Wohlfeilheit noch eine Reihe von Vortheilen, auf die ich nach der Beschreibung des Apparates zurückkommen werde.

A. Beschreibung.

1. Photometer.¹⁾

In Fig. 1 bedeuten A und A_1 zwei rechtwinklig gleichschenklige Prismen; an denselben ist je eine Kathetenfläche ee' und e_1e_1' matt geschliffen; mit ihren anderen Kathetenflächen ei und e_1i_1 werden sie auf eine planparallele Glasplatte so gekittet, dass die Kathetenflächen in einer Ebene liegen. Besonders ist darauf zu achten, dass die Prismenkanten ii_1 der Flächen ei und e_1i_1 möglichst scharf zusammenstossen. Die Hypotenusenflächen dd_1 der Prismen sind unter einem Winkel von 45° gegen die Platte b geneigt. — Die ganze Combination ist in einen Messingring eingepasst, welcher an der Seite der matten Prismenflächen bei c und c_1 je eine rechteckige Oeffnung besitzt. Dieser Ring ist von einem zweiten umschlossen, welcher in fester Verbindung mit dem Knopf B steht. Das Ganze ist von einem rechteckigen Kasten umgeben, welcher vor den Prismenflächen ei und e_1i_1 eine und seitlich bei k und k_1 je eine Oeffnung besitzt. In den seitlichen Oeffnungen befindet sich je eine Glasplatte, die aus demselben Stücke herausgeschnitten ist; vor den Prismenstücken ei und e_1i_1 ist ein Fernrohr mit einer Lupe w zur scharfen Einstellung angebracht. Der Knopf B dient dazu, eine Drehung der ganzen Prismencombination um die Horizontalaxe zu bewirken; dieselbe muss genau 180° betragen; dieses wird dadurch erreicht, dass zwei Messingstifte, fest verbunden mit dem rechteckigen Gehäuse, als Anschlag für

1) Dasselbe wird von Hrn. Böhner, Mechanikus des hiesigen physikalischen Institutes zum Preise von ca. 80 M. ausgeführt.

die Drehung der Prismencombination dienen. Das ganze Photometergehäuse ruht auf einer Säule, die senkrecht zur Photometerbank steht und die man heben und senken kann. Die Höhe derselben wird so gewählt, dass die durch die Mittelpunkte von c und c_1 gelegte Linie, welche wir kurzweg die Axe des Photometers nennen wollen, die zu vergleichenden Lichtquellen n und n_1 schneidet.

Zur Einstellung des Photometers wird folgendermaassen verfahren:

Man stellt das Photometer durch Heben oder Senken in einer für die Ablesung passenden Höhe ein und richtet die Axe des Photometers parallel zur Axe der Photometerbank. Die in geeigneter Weise befestigten Lichtquellen werden so über der Photometerbank aufgestellt, dass die Axe des Photometers durch die Mitte der Lichtquellen geht; hierauf verschiebt man das Photometer bis gleiche Helligkeit der beiden Prismenflächen erzielt ist.

Diese Construction des Joly'schen Photometers besitzt folgende Vortheile:

1. Bei *Drehung* der Prismen um die Horizontalaxe wird gleichzeitig die Lage der zusammenstossenden Kanten umgekehrt, sodass ein Fehler, hervorgerufen durch die Verschiedenheit derselben, eliminirt wird.

2. Die Diaphragmen und Prismen befinden sich in gleicher Sehweite (d. h. in gleicher Entfernung vom Beobachtungsort). Es werden hierdurch störende Irradiationserscheinungen vermieden. Bei Erfüllung dieser Bedingungen ist es relativ leicht zu beurtheilen, ob die beiden nebeneinander liegenden Flächen gleich hell erleuchtet sind. Es gelang mir mit diesem Instrument eine so grosse Empfindlichkeit zu erzielen, dass der mittlere Fehler der Messungen bei 40 Einzeleinstellungen und einer Leuchtkraft von 8 Amylacetatlampen im Abstand von 1200 mm unter 0,4 Proc. blieb.

2. Registrirvorrichtung.

Die Registrirvorrichtung (Fig. 2) gestattet die Lagen des Photometers zu verzeichnen, ohne dabei das Auge von dem Photometer selbst zu entfernen. Das Auge erhält also keine störenden Eindrücke und man erzielt die grösste Genauigkeit

der Einstellung, die überhaupt mit dem Apparat zu erreichen ist.

Mit dem Schlitten, an dem sich das Photometer befindet, ist unten ein viereckiges Holzbrett (15 cm. 10 cm) fest verbunden. In der Mitte desselben befindet sich ein kleines 15 mm weites, rundes verticales Loch (*b*), durch das ein Bleistift geschoben werden kann; unterhalb dieses Holzbrettes liegt eine mit der Photometerbank fest verbundene horizontale Platte vom Querschnitt (10 cm. 12 cm) in deren Mitte eine Nuth eingehobelt ist; in dieser Nuth gleitet eine Holzplatte *k*. Auf der oberen Fläche derselben ist ein Papierstreifen *p* aufgeklebt; vorne an derselben ist eine Schnur *i* befestigt, welche mit der Hand (oder mittelst Räderübersetzung) nach jeder Einstellung um einen bestimmten Betrag vorwärts bewegt werden kann.

Bei den Messungen wird das Photometer nach rechts oder links verschoben, bis die Prismenflächen gleiche Helligkeit zeigen; dann drückt man auf den Bleistift *b*, welcher die jeweilige Einstellung auf dem Papier *p* verzeichnet; hierauf wird das Prismensystem mittels des Knopfes *B* um die horizontale Axe gedreht, von neuem auf gleiche Helligkeit eingestellt und wieder auf den Bleistift *b* gedrückt, wodurch die neue Einstellung gegeben ist. Nach je zwei Einstellungen entsprechend der Drehung des Prismensystems um 180° wird durch Ziehen an der Schnur *i* das Holzbrett *k* ein wenig verschoben, damit die einzelnen Einstellungspunkte sich nicht überdecken. Fig. 3 gibt die Skizze eines Papieres mit einer Reihe von Einstellungen und zwar entsprechend den durch das Loch *b* gelegenen Punkten einer Anzahl von Ablesungen; sie lässt erkennen, wie die Abweichungen der Einstellungen von einander im Laufe der Beobachtungsreihe immer geringer werden und sich asymptotisch einem Grenzwert nähern.

Aus den Entfernungen der einzelnen Punkte von der Mitte der Registrirvorrichtung findet man die mittlere absolute Einstellung des Photometers. Die Abstände der einzelnen Punkte werden mittels eines aufgelegten Maassstabes in Millimetern von der Mittellage abgelesen und notirt.

Bei dieser Art der Registrirung kann eine grosse Anzahl von Ablesungen in sehr kurzer Zeit ausgeführt werden. Man

braucht dann nur noch die Stellung der Lichtquellen abzulesen, während sich die jeweiligen Photometereinstellungen durch die Lage der Registrirvorrichtung und die Entfernungen der einzelnen Punkte von der Mitte derselben ergeben.

3. Anordnung der Versuche.

Zu den Versuchen dienten als Lichtquellen Glühlampen mit einer Normalspannung von 50 Volt; dieselben wurden mittels einer Serienmaschine gespeist, deren Schwankungen durch parallelgeschaltete Accumulatoren ausgeglichen wurden. Die nähere Anordnung zeigt Fig. 4.

In derselben bedeutet: D die Dynamomaschine, W und R Regulirwiderstände, E die Accumulatorenatterie; das Ampèremeter a dient zur Messung des Hauptstromes. cc_1 sind Gefäße mit Quecksilber; an ihnen liegen an, einerseits der Kreis, welcher ein Wiedemann'sches Galvanometer (G) nebst Vorschaltwiderstand rr enthält, andererseits ein Voltmeter von Hummel V_1 zur schnellen Ablesung der Spannung und ein solches von Kohlrausch (V_2). Das Galvanometer G wurde durch entsprechende Schaltung der Rollen und Compensation sehr empfindlich gemacht und zwar so weit, dass jede Stromschwankung erkannt wurde, welche die Leuchtkraft der Glühlampen um mehr als 0,3 Proc. änderte. Diese Grenze entsprach einer Veränderlichkeit der Stromstärke von 0,03 Proc., die sich mit technischen Messinstrumenten nicht hätte beobachten lassen. Bei den definitiven Versuchen war die Stromstärke constant. Die Lampen A und A_1 waren parallel zu einander geschaltet; die zu ihnen führenden Drähte zweigen bei cc_1 ab. Durch Einschalten eines Widerstandes x resp. x_1 konnte die Helligkeit der einen oder der anderen Lampe beliebig abgeschwächt werden; dadurch war ein Mittel gegeben unter den verschiedensten Umständen Helligkeitsvergleichen auszuführen; dabei ging ich bis zu den Grenzen zwischen denen noch photometirt werden kann. Auf die Lampen waren Diaphragmen mit einer Oeffnung von $12,2 \text{ cm}^2$ aufgesetzt, durch die, die vom unteren Theil der Lampen ausgesandten Strahlen abgeblendet wurden.

Bei späteren Versuchen wurde auch eine Schaltung (vgl. Fig. 5) verwandt, in welcher die beiden Lampen hintereinander lagen;

dann machten sich etwaige Schwankungen des Stromes in beiden Lampen gleichmässiger geltend. Trotz dieses Vorzuges würde meist die erstere Schaltung verwandt, da sie die Regulirung der einzelnen Lampen für sich gestattete und somit für meine Zwecke geeigneter war.

B. Theoretischer Theil.

1. Photometer.

Um ein Urtheil über die Vertheilung der Lichtmenge im Photometer (vgl. Fig. 6) zu gewinnen, diene folgende theoretische Betrachtung. Die Lichtquelle links, etwa eine Glühlampe A , indicire auf der Glasplatte G pro Flächeneinheit eine Lichtmenge: J_1 und auf der Kathetenfläche a pro Flächeneinheit eine Lichtmenge: $\eta_1 \cdot J_1 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot J_1$; hierin bedeutet:

ε_1 den Reflexionsfactor und ε_2 den Extinctionsfactor der Glasplatte.

Von dieser letzteren Lichtmenge wird wiederum ein Theil von a und c reflectirt, ein anderer im Prisma absorbirt. Die Fläche b reflectirt total, sodass durch c nur die diffus eindringende Lichtmenge:

$$\eta_1 \cdot \alpha_1 \cdot J_1 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \alpha_1 J_1 = J_{a_1}$$

ins Fernrohr und somit ins Auge gesandt wird, wo α_1 der Diffusionscoefficient des einen Prismas bedeutet. Analog ergibt sich für die rechte Lichtquelle A_1 :

$$J_{a_2} = \eta_1' \cdot \alpha_1' \cdot J_2 = \varepsilon_1' \cdot \varepsilon_2' \cdot \alpha_1' \cdot J_2,$$

wo α_1' der Diffusionscoefficient des anderen Prismas ist. Nach der Einstellung auf gleiche Helligkeit ist somit:

$$J_{a_1} = J_{a_2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \alpha_1 \cdot J_1 = \varepsilon_1' \cdot \varepsilon_2' \cdot \alpha_1' \cdot J_2.$$

Durch directe Vergleiche der Helligkeitsverhältnisse vor und nach Einschaltung der Glasplatten und Prismen, hat sich ergeben, dass $\varepsilon_1 = \varepsilon_1'$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_2'$ und α_1 nahezu α_1' ist, innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler. Bei meinem Apparat war:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1' = 0,923. \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2' = 1$$

und

$$\alpha_1 = 0,21, \quad \alpha_1' = 0,20.$$

Es besteht somit die Relation:

$$J_{d_1} = 0,21 \cdot 0,923 \cdot J_1,$$

wo

$$J_1 = 8,38 \text{ Am.}$$

(wo Am. die indirecte Helligkeit der Amylacetatlampe bedeutet), also

$$J_{d_1} = 1,59 \text{ Am.}$$

Es gehen daher 81 Proc. der Lichtmenge durch den Apparat.

2. Empfindlichkeit des Apparates.

Es sei wieder J_1 die Intensität der linken Lichtquelle und J_2 diejenige der rechten, so besteht für die Helligkeit, welche durch das Fernrohr bei o auf c_1 resp. c gesehen wird, die Beziehung:

$$(1) \quad \frac{J_1}{x^2} \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \alpha_1 = J_{d_1}$$

resp.

$$(2) \quad \frac{J_2}{(d-x)^2} \cdot \epsilon_1' \cdot \epsilon_2' \cdot \alpha_1' = J_{d_2},$$

wo d den Abstand der beiden Lichtquellen von einander und x den Abstand einer der Lichtquellen vom Photometer bezeichnet.

Das Verhältniss $J_{d_1}/J_{d_2} = A$ gibt ein Maass für den vom Auge empfundenen Helligkeitsunterschied der beiden zu vergleichenden Felder.

$$\frac{J_{d_1}}{J_{d_2}} = A = \frac{\frac{J_1}{x^2} \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \alpha_1}{\frac{J_2}{(d-x)^2} \cdot \epsilon_1' \cdot \epsilon_2' \cdot \alpha_1'}.$$

Da nun nach den Versuchen für unsere optische Vorrichtung $\epsilon_1 = \epsilon_1' = 0,923$, $\epsilon_2 = \epsilon_2' = 1$ und nehmen wir α_1 rund α_1' zu 0,205 an, so besteht für die Berechnung der Empfindlichkeit die Relation:

$$\delta = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \alpha_1}{\epsilon_1' \cdot \epsilon_2' \cdot \alpha_1'} = 1.$$

Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass $J_1 = J_2$, und

bedeutet δ die Verschiebung von der Stelle, wo $A = 1$ ist, so folgt bei Vernachlässigung von $(\delta/d)^2$ gegen δ/d

$$A_\delta = 1 - 8 \cdot \frac{\delta}{d}.$$

Bei Einsetzung der Werthe für diesen Fall resultirt

$$A_\delta = 1,003 \text{ resp. } 1,006;$$

für Werthe von $d = 2200$ resp. 1200 mm, innerhalb deren die meisten meiner Beobachtungen lagen.

Um aus dem jeweiligen Fehler δ der Einstellung den Fehler der Intensitätsbestimmung zu berechnen, dient die gewöhnliche Formel:

$$J_1 = J_2 \cdot \frac{\left(\frac{d}{2} - \delta\right)^2}{\left(\frac{d}{2} + \delta\right)^2} = J_2 \cdot \left(1 - 8 \frac{\delta}{d}\right)$$

für $\delta = 1$ und $d = 1800$ wird:

$$J_1 = 1,016 \cdot J_2.$$

Dieses entsprach meinen Versuchen nicht genau, da $x > d/2$ war und sich J_1/J_2 zu 1,06 ergab; für $\delta = 2$ ergibt sich $J_1 = 1,022 J_2$.

Nach Leonhard Weber¹⁾ ist der Empfindlichkeitscoefficient beim Bunsen-Photometer 2,2 bis 3,5, während an unserem Apparate derselbe 1 wird. Das hier beschriebene Photometer hat also eine etwa 3 mal grössere Empfindlichkeit als das Bunsen-Photometer.

3. Princip der Messung.

Sind H_l und H_r die im Fernrohr beobachteten Helligkeiten; ferner J_1 und J_2 die entsprechenden links und rechts vom Photometer befindlichen Lichtintensitäten, so bestehen folgende Relationen:

1) L. Weber, Wied. Ann. **31**. p. 676. 1887.

$$H_l = \frac{J_1}{a^2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \alpha_1$$

und

$$H_r = \frac{J_1}{a_1^2} \cdot \varepsilon_1' \cdot \varepsilon_2' \cdot \alpha_1'.$$

Für eine Einstellung auf gleiche Helligkeit, für welche $H_l = H_r$ wird, ist:

$$(1) \quad J_1 = J_2 \cdot \frac{a^2}{a_1^2},$$

wo $a < a_1$ ist. Nach Drehung des Prismenpaares um seine Horizontalaxe (d. h. nach Vertauschung der Prismen) gilt für die Einstellung auf gleiche Helligkeit die Beziehung:

$$(2) \quad J_1 = J_2 \cdot \frac{a'^2}{a_1'^2},$$

wo $a' < a_1'$ ist. Bezeichnen wir die Verhältnisse

$$\frac{a^2}{a_1^2}, \quad \frac{a'^2}{a_1'^2}, \quad \dots \quad \frac{a^{n^2}}{a_1^{n^2}}$$

mit $V_1, V_2 \dots V_n$, so erhält man durch Bildung der Producte der einzelnen Beziehungen 1, 2 . . . n folgende Formel:

$$(n) \quad J_1 = \sqrt[n]{V_1 \cdot V_2 \dots V_n} \cdot J_2.$$

Durch Vertauschung der Prismen und der aneinanderstossenden Kanten ergibt sich durch obige Formel (n) eine von der Beschaffenheit der Prismen unabhängige Beziehung zwischen den Lichtintensitäten J_1 und J_2 . Je grösser die Anzahl der Einstellungen ist, um so genauer wird das Verhältniss $J_1 : J_2$.

C. Experimenteller Theil.

1. Das Verhältniss der Leuchtkraft der Amylacetatlampe und der Siemensplatineinheit (welche sich durch Umrechnung ergab), zur Glühlampe.

Viele Angaben über photometrische Messungen, namentlich über die Empfindlichkeit von photometrischen Apparaten enthalten keine genauen Daten über die absoluten Helligkeitswerthe bei denen gearbeitet wurde. In diesen Fällen ist es aber nicht möglich sich ein Urtheil über die Genauigkeit der

Apparate und Messungen zu bilden, da ja bekanntlich dieselbe von dem Helligkeitsgrade abhängt.

Ich habe daher das Verhältniss der Lichtstärke der Glühlampe zur Amylacetatlampe festzustellen gesucht; dazu habe ich die Lichtstärken der Glühlampen bei den von mir zu den definitiven Versuchen benutzten Spannungen bestimmt. Hierbei blieb das Photometer und die Glühlampe, welche vermittelt einer Stange fest verbunden waren, in constanter Entfernung; es wurde nur die Entfernung zwischen dem Photometer und der feststehenden Amylacetatlampe geändert; dazu verschob man das Photometer nebst der Glühlampe, welche man auf der Bank hin- und herbewegte bis gleiche Helligkeit der beiden Felder erreicht war. Wäre man bei der Messung einfach so verfahren, dass man die zu messenden Lichtquellen unbeweglich gelassen und mit dem Photometer die Stelle gleicher Helligkeit aufgesucht hätte, so wäre es nöthig gewesen für die Glühlampe das Entfernungsgesetz der Helligkeitsabnahme anzuwenden, was wegen der inneren Reflexe an den Glashüllen derselben nicht gestattet ist. Ferner hat man bei unseren Verfahren nur eine Entfernung zwischen Photometer und Glühlampe bei der ganzen Vergleichung zu messen. Ein weiterer Vortheil besteht darin, dass während derselben Beobachtungsreihe die Helligkeit der einen Photometerseite gleich bleibt. Dies bringt nicht nur eine grössere Sicherheit und Gleichmässigkeit beim Messen mit sich, da sich das Auge an eine andere Helligkeit stets von neuem gewöhnen muss, sondern bietet auch zugleich den Vortheil, dass die Einstellungsempfindlichkeit, die sich bekanntlich mit der Helligkeit ändert, immer dieselbe ist; dadurch wird die Discussion der Resultate sehr vereinfacht.

Es bleiben dann nur noch drei Ursachen, welche Veranlassung zu Fehlerquellen geben können.

1. Die stets unvermeidliche, wenn auch geringe Unsicherheit der Einstellung. Ueber diesen Fehler erhielt man ein Urtheil durch Ermittlung des mittleren Fehlers einer grossen Anzahl (50) Einstellungen, die schnell hinter einander ausgeführt wurden. Ich lasse dieselben hier folgen:

(Es bezeichnen: a die Einstellung auf der Bank, gerechnet von einem beliebigen Punkt, x die Differenz der jeweiligen (a) von der mittleren Einstellung.)

a	x	x^2	a	x	x^2	a	x	x^2
6	1	1	8	1	1	7	0	0
8	1	1	9	2	4	7	0	0
7	0	0	7	0	0	8	1	1
8	1	1	8	1	1	8	1	1
7	0	0	7	0	0	7	0	0
8	1	1	8	1	1	8	1	1
6	1	1	7	0	0	7	0	0
8	1	1	8	1	1	8	1	1
7	0	0	8	1	1	8	1	1
8	1	1	7	0	0	8	1	1
7	0	0	8	1	1	9	2	4
8	1	1	7	0	0	8	1	1
6	1	1	8	1	1	7	0	0
6	1	1	6	1	1	8	1	1
6	1	1	8	1	1	7	0	0
6	1	1	7	0	0	6	1	1
7	0	0	8	1	1			

Der mittlere Fehler ergab sich zu:

$$\sqrt{\sum \frac{x^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{40}{49}} = 0,9^1),$$

oder in Procenten 0,07 Proc. Die grösste Abweichung vom Mittel war 0,16 Proc.

2. Die Inconstanz der Glühlampe und der Amylacetatlampe. Erstere war Null, da die Stromstärke ganz constant blieb; letztere sehr unbedeutend. Aus den Versuchen von E. Lieben-thal folgt, dass bei sonst gleichen äusseren Bedingungen die von der Lampe gelieferte Lichtmenge wesentlich nur von der Flammenhöhe abhängt. Die zur Vergleichung benutzte Amylacetatlampe ändert während einer Versuchsreihe — einer halben Stunde — ihre Höhe im Maximum um 0,4 mm.

3. Die unrichtige Messung der Entfernung zwischen Lichtquelle-Amylacetatlampe und Photometer. Dass man nicht einen Lichtpunkt, sondern einen gebogenen Kohlenfaden als Lichtquelle benutzt, hat bei den in Betracht kommenden Entfernungen keinen wesentlichen Einfluss, wovon man sich durch eine einfache Rechnung überzeugt.

Dieser Fehler kann durch genaue Ablesung auf ein Minimum reducirt werden.

1) n bedeutet die Anzahl der Einstellungen.

Man ersieht hieraus, dass die Fehlerquellen sehr klein sind.

Die folgende Tabelle enthält die Lichtintensitäten einer Glühlichtlampe ausgedrückt in Amylacetatlampen und Siemens-Platineinheiten, bei den jeweilig benutzten Spannungen.

Volt	Amylacetat- lampe	Siemens- Platineinheiten
50	8,4	14,8
47,5	6,15	10,8
45	5,84	10,26
42,5	4,18	7,24
40	2,98	5,23
35	1,70	2,98

Fig. 7 gibt die graphische Darstellung der Abhängigkeit der Lichtintensität von den jeweilig benutzten Spannungen; in derselben sind als Abscissen die Spannungen und als Ordinaten die Lichtintensitäten aufgetragen. Bei den späteren Messungen ging ich durch Abschwächen der rechten Lampe durch Einschalten von Widerständen mit der Leuchtkraft sehr herunter. Die Tabelle und Fig. 8 geben einen klaren Ueberblick über die Abhängigkeit der Leuchtkraft von dem jeweilig eingeschalteten Widerstände.

Ohm eingeschaltet	entspr.	Amylacetat- lampe	Siemens- Platineinheit
12,5		4,05	7,11
31,5		2,64	4,63
62,5		1,8	2,28
82,5		0,66	1,15

Bei den letzten Bestimmungen war das Helligkeitsverhältniss 1:13. Es ist dieses die äusserste Grenze bei der überhaupt noch sichere Vergleiche am Photometer möglich sind.

2. Vorversuche.

Bei den Vorversuchen wurde zuerst eine Hintereinanderschaltung der Accumulatoren im Parallelbetrieb zu der Maschine benutzt. Die Lampenspannung betrug 100 Volt, da die Lampen hintereinander geschaltet waren. Die Stromschwankungen waren sehr minimal etwa 0,09 Proc. Bei den späteren Messungen schaltete ich aber je 25 Accumulatoren hintereinander und beide Lampen parallel zu denselben und regulirte die Maschine so, dass sich eine Lampenspannung von 50 Volt ergab. Stromstärke und Spannung blieben voll-

ständig constant. Diese Schaltung behielt ich bei den späteren definitiven Versuchen bei, weil mir hierbei auch die Möglichkeit gegeben war, eine Lampe für sich durch Widerstände abzuschwächen.

Eine Aenderung der Helligkeit von 0,6 Proc. war ohne weiteres wahrnehmbar und der mittlere Fehler einer Einstellung blieb unter 0,3 Proc.

3. Versuche.

Die Vorsichtsmassregel, Photometer und Glühlampe in fester constanter Entfernung zu erhalten wandte ich überall da an, wo es sich um grosse Verschiedenheit der Farbentönung handelte, weil dann die Empfindlichkeit des Auges sehr unterstützt wurde, da die Helligkeit auf derselben Seite immer dieselbe blieb.

Die Versuche erstrecken sich auf eine Anzahl Messungen mit Lichtquellen in den verschiedensten Bereichen der Helligkeit.

Tabelle A gibt die Messungsergebnisse.

Tabelle A.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>J</i>	$M - J = x$	x^2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>J</i>	$M - J = x$	x^2
915	885	1,069	0,0 ₂ 5	0,0 ₄ 25	917	883	1,078	0,0 ₃ 4	0,0 ₉ 16
6	4	73	1	01	8	2	83	9	81
5	5	69	5	25	8	2	83	9	81
5	5	69	5	25	7	3	78	4	16
5	5	69	5	25	7	3	78	4	16
6	4	73	1	01	7	3	78	4	16
5	5	69	5	25	6	4	73	9	81
6	4	73	1	01	7	3	78	4	16
5	5	69	5	25	7	3	78	4	16
6	4	73	1	01	8	2	83	9	81
5	5	69	5	25	6	4	73	1	01
5	5	69	5	25	8	2	83	9	81
5	5	69	5	25	6	4	73	1	01
6	5	69	5	25	8	4	73	1	01
5	5	69	5	25	6	4	73	1	01
6	4	73	1	01	6	4	73	1	01
5	5	69	5	25	6	4	73	1	01
5	5	69	5	25	7	3	78	4	16
6	4	73	1	01	7	3	78	4	16
7	3	78	4	16	7	3	78	4	16

Mittel $M = 1,074$

Die Fig. 9 lässt erkennen, um wie viel die Einzelwerthe um das Mittel schwanken.

Stromstärke und Spannung blieben während des Versuches constant. Die Lichtquellen wurden mit 50 Volt betrieben. Die Abhängigkeit des mittleren resp. grössten Fehlers bei Vergrösserung des Abstandes der Lichtquelle (50 Volt) vom Photometer gibt folgende Tabelle und die graphische Darstellung (Fig. 10), in welcher als Abscissen die Abstände der Lichtquellen vom Photometer und als Ordinaten die jeweiligen mittleren resp. grössten Fehler aufgetragen sind.

Einzel-einstellung	Licht-stärke	Abstand des Ph. v. Lichtquell.	Mittlerer resp. grösster Fehler	Intensitäts-verhältniss	m (mittlerer Fehler)
40	8,38	200 mm	1,5 resp. 1,9 ‰	1,077	± 0,0072
40	8,38	400 „	1,3 „ 1,8 ‰	1,076	± 0,0076
40	8,38	600 „	1,0 „ 1,3 ‰	1,074	± 0,0045
40	8,38	900 „	0,95 „ 1,2 ‰	1,072	± 0,006
40	8,38	1100 „	0,7 „ 0,9 ‰	1,070	± 0,005
40	8,38	1200 „	0,35 „ 0,8 ‰	1,067	± 0,003
40	8,38	1300 „	0,30 „ 0,56 ‰	1,066	± 0,0027

Man ersieht aus Fig. 10, dass bei kleiner Entfernung zwischen Photometer und Lichtquelle sich die Curve asymptotisch der *B*-Axe nähert, d. h. der mittlere Fehler erreicht sein Maximum bei sehr kleiner Entfernung des Photometers von der Lichtquelle; entfernt man das Photometer allmählich von der Lichtquelle, so verringert sich der mittlere Fehler bis derselbe bei einer bestimmten Entfernung, die dem Punkt μ resp. μ_1 entspricht ein Minimum (bei einem Abstand von 1300 mm zwischen Photometer und Lichtquelle) erreicht.

Gehen wir jetzt über zu den Beobachtungen, welche bei verschiedenen Helligkeiten angestellt wurden. Analog dem Vorhergehenden lasse ich die Resultate tabellarisch folgen und füge eine graphische Darstellung bei, welche am besten einen Ueberblick über die Abhängigkeit des Fehlers von den Lichtstärken gestattet. In Fig. 11 seien als Abscissen die Lichtstärken in Amylacetatlampen und als Ordinaten die dazu gehörigen Fehler resp. die grössten Abweichungen aufgetragen. Die Entfernung des Photometers von der Lichtquelle betrug 900 mm.

Spannung in Volt	Lichtstärke in Amyl- acetatlampen	mittl. grösster Fehler in Proc.	Intensitäts- verhältniss	Zahl der Einzel- einstellungen
35	1,7	1,26 1,9	1,21 $\pm$ 0,0153	50
40	2,98	2 2,8	1,12 $\pm$ 0,024	50
42,5	4,18	1,7 2,7	1,11 $\pm$ 0,018	50
45	5,84	1,4 1,9	1,11 $\pm$ 0,014	50
47,5	6,15	1,24 1,7	1,10 $\pm$ 0,013	50
50,0	8,09	0,3 0,55	1,10 $\pm$ 0,0027	50

Aus den Curven geht hervor, dass der Fehler der Messung bei geringen Lichtstärken nicht bedeutend ist; er erreicht etwa bei zwei Amylacetatlampen sein Maximum, fällt dann schnell und erreicht ein Minimum bei etwa 8,3 Amylacetatlampen (entsprechend 50 Volt Spannung an der Glühlampe).

Um zu prüfen, welche Genauigkeit selbst unter den ungünstigsten Bedingungen mit dem Photometer zu erreichen ist, wurden die folgenden Messungen bei starken Abschwächungen einer Lichtquelle durch entsprechende Widerstände in dem Stromkreise derselben angestellt. Folgende Tabelle gibt die Versuchsergebnisse:

Eingeschal- teter Widerstand in Ohm	Mittlerer und grösster Fehler in Proc.	Intensitäts- verhältniss	Lichtstärke der abge- schwächten Lampe	Mittlerer Fehler m	Einzel- einstel- lungen
12,5	0,99 1,6%	1 : 2,15	4,05	0,0215	50
31,5	1,58 2,2%	1 : 3,24	2,64	0,0515	—
62,5	1,5 3 %	1 : 6,66	1,3	0,1	—
82,5	1,7 3,1%	1 : 13,04	0,66	0,221	—

Weitere Versuche wurden durch Abschwächen des Lichtes mit Absorptionsgläsern angestellt. Die Glühlampen hatten die normale Spannung von 50 Volt; das Absorptionsglas wurde auf der linken Seite eingeschaltet.

Die Messung ergab folgendes:

	Extinct. Vermögen	Absorpt. V.
Absorpt.-Gl. I	$\epsilon = \frac{0,155}{1,07} = 0,145$	0,855
Absorpt.-Gl. II	$\epsilon = 0,60$	0,40

Die folgenden Zahlen Tab. B geben die Versuchsreihen mit Absorptionsglas II.

Tabelle B.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>J</i>	<i>M - J = x</i>	<i>x</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>J</i>	<i>M - J = x</i>	<i>x</i> ²
723	907	1,574	0,018	0,0 ₃ 324	724	906	1,566	0,910	0,0 ₃ 100
30	0	20	36	0,0 ₂ 1269	9	1	28	28	784
23	7	74	18	0,0 ₃ 324	2	8	82	26	676
8	2	35	21	440	9	1	28	28	784
3	7	74	18	324	2	8	82	26	676
8	2	35	21	441	9	1	28	28	784
2	8	82	26	676	3	7	74	18	324
4	6	43	13	169	8	2	35	21	441
3	7	74	18	224	2	8	82	26	676
4	6	43	13	169	3	7	74	18	324
3	7	74	18	324	30	0	20	36	0,0 ₂ 1296
7	6	43	13	169	24	6	43	13	0,0 ₃ 169
2	8	82	26	676	1	9	89	33	0,0 ₂ 1089
8	2	35	21	441	6	4	51	05	0,0 ₄ 25
2	8	82	26	676	8	2	82	26	0,0 ₃ 676
8	2	35	21	441	6	4	57	05	0,0 ₄ 25
4	6	66	10	100	1	9	89	33	0,0 ₃ 1089
4	6	43	13	169	9	1	28	28	0,0 ₃ 784
4	6	66	10	100	2	8	82	26	0,0 ₃ 676
9	1	28	25	784	7	3	48	13	0,0 ₂ 169
5	5	58	02	007	1	9	89	33	0,0 ₃ 1089
8	2	35	21	441	6	4	51	05	0,0 ₄ 25

Mittel $M = 1,556$

Die folgende Tabelle gibt das Resultat der Messungen mit Absorptionsgläsern :

	Mittl. Fehler	Mittl. resp. grösst. Fehler in Proc.	Intensitätsverhältniss	Einzel-einstellung	Spannung der Glühlampe
Absorpt.-Gl. I	0,026	1,7 2,5	1 : 6,42	50	50 Volt entspr. 8,2 Amylacetat-lampen
Absorpt.-Gl. II	0,022	1,43 1,90	1 : 1,55	—	

Die vorhergehenden Resultate zeigen, dass selbst bei starkem Abschwächen einer Lichtquelle, sei es durch Absorptionsgläser, sei es durch Einschaltung von Widerständen, der procentuale Fehler immer klein bleibt.

Fig. 12 lässt erkennen, bei welchem Intensitätsverhältniss der procentuale Fehler ein Minimum oder ein Maximum erreicht. In Fig. 12 sind als Ordinaten die jeweiligen mitt-

leren resp. maximalen Fehler aufgetragen. Aus den Curven geht hervor, dass der mittlere und maximale Fehler bei grosser Verschiedenheit ($\frac{1}{13}$) der Intensität der Lichtquellen am grössten ist, dann langsam abnimmt bis er bei einem Intensitätsverhältniss von 1:2 sein Minimum erreicht und von hier an wieder langsam steigt, jedoch nicht wieder den vorhergehenden maximalen Werth erreicht. Der verhältnissmässig grössere Fehler bei grosser Verschiedenheit der Helligkeit der Lichtquellen ist durch die Verschiedenheit in der Farbentönung bedingt. Dieser Fehler wird jedoch bei einiger Gewöhnung des Auges an solche Farbendifferenzen auf ein Minimum beschränkt, denn wie das Resultat der Versuche zeigt, resultirt sogar bei einem Verhältniss von 1:13 nur ein Fehler von 1,7 Proc. im Mittel.

II. Resultate.

Aus den vorstehenden Versuchen geht hervor:

1. Innerhalb der Grenzen der gewöhnlich in der Praxis zur Verwendung kommenden Entfernungen ergibt sich der mittlere Fehler einer Ablesung bei 50 Einzeleinstellungen und einer Lichtstärke von 8,4 Amylacetatlampen zu 0,3 Proc.; die grösste Abweichung geht nicht über 0,56 Proc. hinaus; bei anderen Entfernungen der Lichtquellen vom Photometer, welche man in der Praxis unter besondern Umständen noch verwenden muss, ergaben sich Fehler der mittleren Einstellung (bei 50 Einzeleinstellungen) von 0,4, 0,7, 0,95 Proc. resp. 0,8, 0,9, 1,3 Proc. für die maximale Abweichung; hier bleibt der mittlere Fehler unter 1 Proc.

2. Beim Abschwächen der Helligkeit der Glühlampen durch Einschalten von Widerständen, d. h. bei Herabminde- rung der Spannung auf 47,5 bis 45,35 etc. entsprechend einer Lichtstärke von 6,15, 5,9, 4,0 und 1,8 Amylacetatlampen ergab sich der mittlere Fehler zu: 1,24, 1,4, 1,7, 2 Proc. und der grösste Fehler zu: 1,7, 1,9, 2,4, 2,6 Proc.

3. Weitere Versuche mit sehr verschiedenen Helligkeitsunterschieden ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3,5}$, $\frac{1}{6}$) — und zwar dadurch, dass in den Kreis einer Glühlampe Widerstände eingeschaltet wurden — ergaben im Mittel einen Fehler von 0,99 Proc.; selbst bei einem Helligkeitscontrast der Lampen von 1:13 — wo

also die Färbungsunterschiede sehr beträchtlich waren, erreichte der Fehler schon sein Maximum bei 1,7 Proc.

4. Bei den Helligkeitsunterschieden der Lampen ($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$), welche durch Absorptionsgläser, die auf der einen Seite eingeschaltet wurden, hervorgerufen waren, ergab sich im Mittel ein Fehler von nur 1,4 Proc.; bei einem Intensitätsverhältniss von 1:6,4 betrug der maximale Fehler nur 1,5 Proc.

Man sieht daraus, dass das Photometer allen Anforderungen entspricht. Dasselbe ist einfach und wohlfeil und leistet sowohl den technischen, wie auch den physikalischen Anforderungen Genüge.

Neben der Art der Registrirung besitzt das Photometer noch die Vortheile leichter Herstellbarkeit, geringer Dimensionen, der Möglichkeit der Drehung des ganzen Apparates (um 180°) um die Horizontalaxe, wodurch die Fehler durch Verschiedenheit der Prismen und Kanten eliminirt werden, bequemer Einstellung und Brauchbarkeit innerhalb weiter Grenzen, sowohl für feine Messungen, als auch für solche in der Praxis.

Es sei mir an dieser Stelle noch gestattet, sowohl meinem hochverehrten Lehrer Hrn. Prof. Dr. E. Wiedemann als auch den Hrn. Privatdocenten Dr. Ebert und Dr. Knoblauch für freundliche Unterstützung meinen wärmsten Dank auszusprechen.