

# ANNALEN DER PHYSIK.

## VIERTE FOLGE. BAND 62.

### 1. *Die Versuche von F. Harreß über die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern;* von O. Knopf.

Inhaltsverzeichnis. § 1. Das Ziel der Harreßschen Versuche. — § 2. Das Prismenpolygon. — § 3. Der Weg der Strahlenbündel. Versuche zur Sichtbarmachung der Interferenzstreifen. — § 4. Die definitive Form des Interferometers. — § 5. Der Rotationsapparat. — § 6. Versuche zur Erzeugung monochromatischer Interferenzstreifen. — § 7. Das endgültige Meß- und Aufnahmeverfahren. — § 8. Anpassung der Formel für die Streifenverschiebung auf den Fall eines rotierenden Körpers. — § 9. Zusammenstellung der Messungsergebnisse.

#### § 1. Das Ziel der Harreßschen Versuche.

In den Jahren 1909—11 machte mein damaliger Assistent, der leider ein Opfer des Krieges gewordene F. Harreß, für seine Promotionsarbeit „*Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern*“ im Keller der Jenaer Universitätssternwarte Versuche zur Bestimmung des Mitführungskoeffizienten des Äthers im Glase. Er hatte hierbei namentlich die Absicht, eine Entscheidung darüber herbeizuführen, welcher der beiden Formeln für den Mitführungskoeffizienten,

$$\text{ob der Fresnelschen, } \frac{n^2 - 1}{n^2},$$

$$\text{oder der Lorentzschen, } \frac{n^2 - 1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda},$$

der Anspruch auf Richtigkeit zukomme.<sup>1)</sup>

1) Nach Hrn. Einsteins Bemerkungen in den *Astr. Nachr.* 199. S. 7 und 47 würde in dem bei den Harreßschen Versuchen vorliegendem Fall die Relativitätstheorie für den Mitführungskoeffizienten den Wert  $\frac{n^2 - 1}{n^2}$  verlangen, während Harreß den Lorentzschen Wert ganz allgemein für den aus der Relativitätstheorie sich ergebenden ansah. Dagegen ist  $\frac{n^2 - 1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}$  nach Hrn. Einstein die bei der Fizeauschen Versuchsanordnung in Betracht kommende Formel.

Sein Resultat ist jedoch durch ein Versehen entstellt worden, indem er in seiner Formel für die vom Licht zum Durchlaufen des Körpers gebrauchte Zeit an Stelle von  $1 - x$  den Mitführungskoeffizienten  $x$  selbst gesetzt hat. Auch finden sich in der Abhandlung einige Rechenfehler und einige, wenn auch ziemlich geringfügige Vernachlässigungen.

Hr. Harzer hat in den *Astronomischen Nachrichten*, Bd. 198, S. 377 die Berichtigung der Harreßschen Arbeit vorgenommen und hierbei zugleich die Behandlung der Beobachtungen auf eine theoretisch sicherere Grundlage gestellt. Er findet als Wert des Mitführungskoeffizienten

	für grünes Licht	für rotes Licht
	0,5802 ± 0,0020 (w. F.)	0,5964 ± 0,0015 (w. F.)
während die Formel		
$\frac{n^2 - 1}{n^2}$ liefert	0,5977	0,5952
und die Formel		
$\frac{n^2 - 1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}$ liefert	0,6210	0,6120

Infolge ihrer Veröffentlichung als Inauguraldissertation sind die Harreßschen Versuche nicht so in weiteren Kreisen bekannt geworden, wie sie es wohl verdient hätten, zumal bei einer etwaigen Wiederholung der Versuche die Erfahrungen, die Harreß gemacht hat, mit Nutzen verwendet werden können. Ich folge daher gerne einer Anregung von Hrn. v. Laue und gebe im Nachstehenden einen Auszug besonders des experimentellen Teiles der Inauguraldissertation des so früh ums Leben gekommenen, viel versprechenden jungen Gelehrten.

Frühere erfolgreiche Versuche zur Bestimmung des Mitführungskoeffizienten rühren von Fizeau<sup>1)</sup> und von Michelson<sup>2)</sup> und Morley<sup>3)</sup> her. Als bewegten Körper benutzten sie Wasser, welches bei ersterem durch eine Röhre von 1,49 m Länge und und 5,3 mm lichter Weite mit 7,069 m/sec Geschwindigkeit und bei den letzteren zwei durch eine Röhre von 3—6 m Länge

1) H. Fizeau, Compt. rend. 33. S. 349. 1851. Pogg. Ann. Erg. 3. S. 457. 1853. Ann. Chim. Phys. (3) 57. S. 385. 1859.

2) A. A. Michelson, Am. Journ. of Sc. (3) 22. S. 120. 1881.

3) A. A. Michelson u. E. W. Morley, Am. Journ. of Sc. (3) 31. S. 377. 1886.

und 28 mm Weite mit 8,72 m/sec Geschwindigkeit floß. Aus Fizeaus Versuchen ergibt sich der Mitführungskoeffizient zu 0,46, Michelson und Morley fanden 0,434, während die theoretischen Werte für Wasser sind

$$1 - \frac{1}{n^2} = 0,438$$

und

$$1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} = 0,451.$$

In neuerer Zeit sind auch von Hrn. Zeeman Versuche angestellt worden, welche ein befriedigendes Resultat ergeben haben sollen.

Da die Werte des Mitführungskoeffizienten nach der Fresnelschen und der Lorentzschen Formel für Wasser etwas zu nahe beieinander liegen, als daß mit Sicherheit durch den Versuch entschieden werden könnte, welcher Formel der Vorzug einzuräumen sei, verwandte Harreß als bewegten Körper Glas und zwar ein schweres Barium-Silikat-Kron, Typ O 211 der Firma Schott und Genossen, für welches folgende Werte galten:

$$n_D = 1,57335$$

$$\Delta = \text{Dispersion von } C \text{ bis } F = 0,00998$$

$$\text{Dispersion von } D \text{ bis } F = 0,00705$$

$$v = \frac{n-1}{\Delta} = 57,5$$

$$\text{spez. Gewicht} = 3,21.$$

Für das von Harreß benutzte grüne Licht betrug nach Hrn. Harzers Rechnung, wie schon angegeben,

$$1 - \frac{1}{n^2} = 0,5977. \text{ und } 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} = 0,6210,$$

während für rotes Licht sich die beiden Werte 0,5952 und 0,6120 ergaben.

Bei den Versuchen zur Bestimmung des Mitführungskoeffizienten wird der letztere aus der Verschiebung eines Interferenzbildes erhalten und zwar lautet die Formel, welche den Zusammenhang zwischen der zu beobachtenden, in Streifenbreiten ausgedrückten Verschiebung  $\Delta$  der Interferenzstreifen und dem Mitführungskoeffizienten  $x$  angibt,

$$\Delta = \frac{2 l q n^2 (1 - x)}{\lambda c},$$

wo  $c$  die Geschwindigkeit des Lichtes im leeren Raum,  $q$  die Geschwindigkeit des bewegten Körpers,  $n$  der Brechungsindex der Substanz,  $l$  die Länge des im bewegten Körper vom Lichtstrahl zurückgelegten Weges und  $\lambda$  die für den leeren Raum geltende Wellenlänge des bei dem Versuch angewandten Lichtes ist.

Setzt man der Fresnelschen Theorie gemäß  $x = 1 - 1/n^2$ , so ergibt sich

$$\Delta = \frac{2 l q}{\lambda c}.$$

Nach der Fresnelschen Theorie ist daher die Streifenverschiebung von der Substanz des bewegten Körpers ganz unabhängig, während die Einführung des Lorentzschen Wertes des Mitführungskoeffizienten in die Formel für  $\Delta$  die Streifenverschiebung von der Substanz des bewegten Körpers in wenn auch nur geringem Maße abhängig zeigt.

Sollte die Streifenverschiebung einen nicht zu geringen Betrag erhalten, so mußte schon die Länge des vom Lichtstrahl durchlaufenen Weges zu etwa 1 m und die Geschwindigkeit  $q$  des bewegten Körpers zu etwa 10 m genommen werden; dann wird  $\Delta = \frac{r l q}{\lambda c} = 0,11$  Streifenbreiten.

## § 2. Das Prismenpolygon.

Die Form, welche Harreß, von Hrn. Straubels Rat unterstützt, für den Glaskörper wählte, war die eines aus Prismen zusammengesetzten Polygons, wie sie Fig. 1 zeigt. Das Licht wird von der Achse aus in den rotierenden Prismenkranz geworfen, durchläuft ihn unter Reflexion an den äußeren Prismenflächen, das eine Bündel in dieser, das andere in der entgegengesetzten Richtung, und tritt nach der Achse zu aus dem Prismenkranz wieder aus. Wird den beiden Bündeln vor ihrem Eintritt in das Polygon eine Phasendifferenz erteilt, so liefern sie nach ihrem Austritt ein Interferenzbild, welches bei Rotation des Polygons eine Verschiebung erleidet.

Die unentgeltliche Herstellung des kostspieligen optischen und mechanischen Apparates übernahm auf Hrn. Straubels Veranlassung bereitwilligst die Firma Carl Zeiss.

Auf Grund einer Durchrechnung von Polygonen mit 6—16 Seiten fand Harreß, daß sich bei 10 Reflexionen das günstigste Verhältnis zwischen der Länge des Lichtweges, der

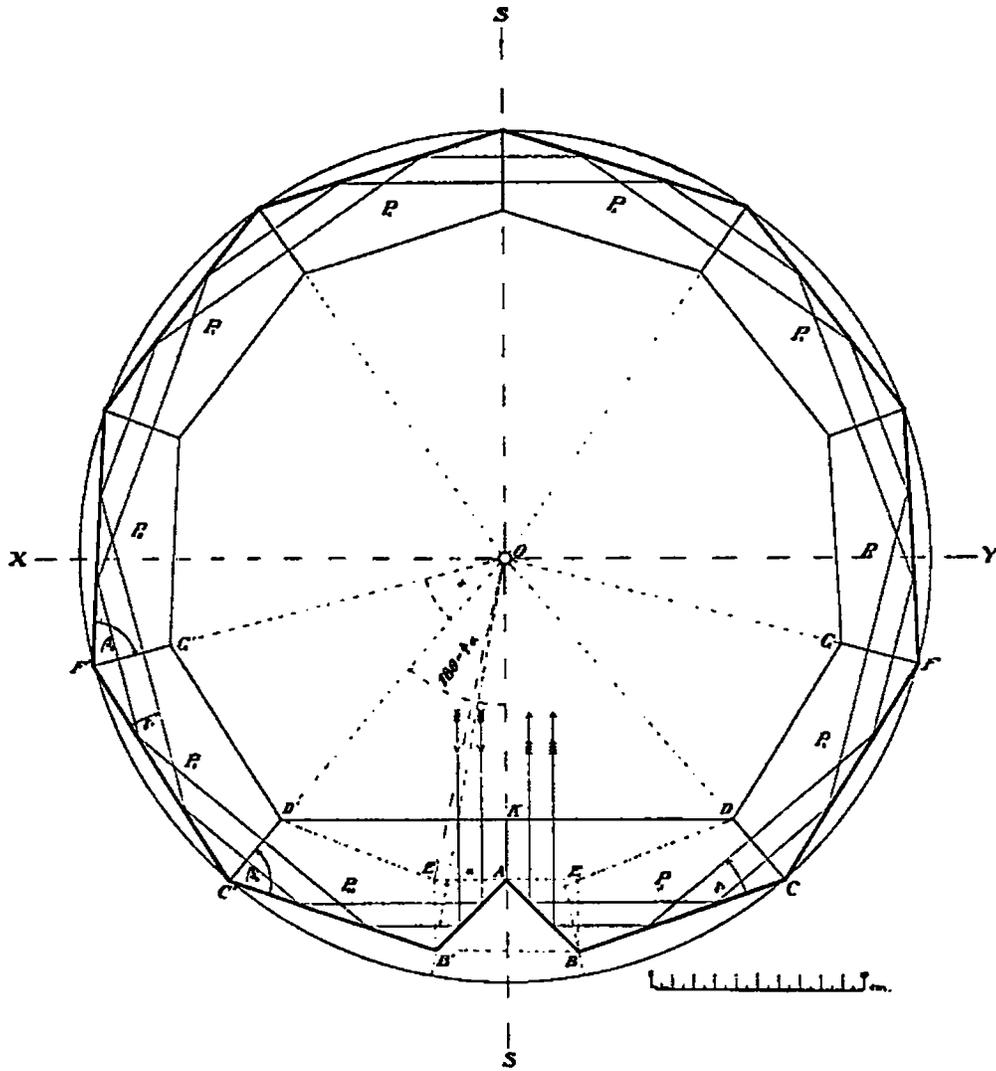


Fig. 1.

Zahl der Reflexionen und der Größe der Reflexionswinkel erreichen ließ, weshalb denn ein 10-seitiges Polygon für den Prismenkranz festgesetzt wurde.

Von den 10 hierzu benötigten Prismen konnten 8 ( $P_2$  bis  $P_9$ ) von vornherein als gleich angenommen werden, während zwei Körper,  $P_1$  und  $P_{10}$ , eine andere Form erhalten mußten, um den Ein- und Austritt des Lichtes zu ermöglichen.

Mit dieser Festsetzung war die Gestalt der Prismen, abgesehen von ihrer Höhe, vollständig bestimmt.

In Fig. 1 mögen folgende Bezeichnungen gelten:

- (1) Winkel  $COF = C'OF' = \alpha$  (Zentriwinkel eines der 8 gleichen Prismen  $P_2$  bis  $P_9$ ).
- (2)  $AE = AE' = EB = DC = \dots = a$ .
- (3)  $EC = E'C' = b$ .
- (4)  $OC = r$  (Radius des dem Polygon umschriebenen Kreises).
- (5)  $CF = s_1$  (Länge der Seite eines der 8 gleichen Prismen).
- (6)  $CB = s_2$  (Länge der Seiten der beiden Prismen  $P_1$  und  $P_{10}$ ).

Dann ist:

$$(7) \quad \sphericalangle SOC = SOC' = 180^\circ - 4\alpha.$$

Für die Größen  $a$ ,  $b$  und  $r$  lassen sich sehr einfach folgende Beziehungen finden:

$$(8) \quad \begin{cases} a = b \cdot \cotg 2\alpha, \\ b = r \cdot \sin 4\alpha - a, \\ r = \frac{a}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}. \end{cases}$$

Aus diesen drei Gleichungen ergibt sich  $\alpha$  durch die Formel:

$$(9) \quad \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2} (1 + \operatorname{tg} 2\alpha)}{\sin 4\alpha} - \frac{1}{2} = 0.$$

Diese Beziehung ist vollkommen unabhängig vom Radius des umschriebenen Kreises und stellt die Bedingungsgleichung für das gesuchte Polygon dar. Ist aus dieser Gleichung der Winkel  $\alpha$  gefunden, so lassen sich dann bei gegebenem Radius  $r$  alle Bestimmungsstücke der Prismen berechnen nach den einfachen Formeln:

$$(10) \quad \begin{cases} a = 2r \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \\ s_1 = 2r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \\ s_2 = \frac{a}{\cos 2\alpha}. \end{cases}$$

Die numerische Auswertung der Bedingungsgleichung (9) ergibt als einzig mögliche Lösung für  $\alpha$  den Wert:

$$\alpha = 34^\circ 45' 17''.5.$$

Der Radius des umschriebenen Kreises wurde zu

$$r = 200 \text{ mm festgesetzt.}$$

Werden die Dicken der Prismen  $P_2$  bis  $P_9$  mit  $d$ , die von  $P_1$  und  $P_{10}$  mit  $d_2$  bezeichnet, und nennt man die Winkel, unter welchen die Seitenflächen gegen die Reflexionsflächen geneigt sind,  $\beta_1$  und  $\beta_2$ , so ergeben sich folgende Größenverhältnisse für die Glaskörper:

In allen Prismen ist:  $a = 35,68$  mm.

$$\begin{array}{l|l} 8 \text{ Prismen:} & s_1 = 119,47 \text{ mm} \\ & d_1 = 34,05 \text{ mm} \\ & \beta_1 = 72^\circ 37' 21,2'' \\ \hline 2 \text{ Prismen:} & s_2 = 101,93 \text{ mm} \\ & d_2 = 33,42 \text{ mm} \\ & \beta_2 = 69^\circ 30' 35'' \end{array}$$

Die Austrittsflächen wurden quadratisch gewählt, so daß die Prismenhöhe in allen Fällen

$$h = 35,68 \text{ mm betrug.}$$

Die beiden Glaskörper  $ABE$  und  $AB'E'$  sind rechtwinklige Reflexionsprismen mit der Kantenlänge  $a$ . Sie wurden mit den beiden Prismen  $P_1$  und  $P_{10}$  zu je einem Stück vereinigt. Um aber dabei die schwer zu bearbeitenden, einspringenden Ecken bei  $E$  und  $E'$  zu vermeiden, erhielten die beiden Körper die Form  $ABCDK$  bezüglich  $AB'C'D'K'$ . Der dadurch entstehende Massenüberschuß auf einer Seite der Rotationsachse wurde später durch ein entsprechendes Stahlstück auf der entgegengesetzten Seite der Achse ausgeglichen.

Die Reflexionswinkel für symmetrisch durchgehende Strahlen betragen:

$$\begin{array}{ll} \text{in } P_2 \text{ bis } P_9 & \gamma_1 = 17^\circ 22' 38,8'' \\ \text{und in } P_1 \text{ und } P_{10} & \gamma_2 = 20^\circ 29' 25'' \end{array}$$

Alle Reflexionen im Glaskörper sind also Totalreflexionen und alle Eintrittsflächen der Prismen werden vom Licht senkrecht durchsetzt. Der Prismenkranz ist symmetrisch zur Geraden  $PS$ , aber nicht zu der dazu Senkrechten  $XY$ .

Die Länge des Lichtweges im Glase ist gegeben durch die Formel:

$$(11) \quad \begin{cases} l = 8 s_1 \sin \beta_1 + 2 s_2 \sin \beta_2 + 2 a + 2 a \cos (180^\circ - 4 \alpha) \\ l = 1228,4 \text{ mm.} \end{cases}$$

Dieser Weg ist für alle Strahlen, welche dem Mittelstrahl parallel verlaufen, genau gleich lang.

Über den zu erwartenden Lichtverlust kann folgende Überschlagsrechnung einen Anhalt geben.

In dem Prismenpolygon findet ein zehnmaliger Eintritt und ein zehnmaliger Austritt von Luft in Glas und umgekehrt statt. Der infolge der Reflexion auftretende Lichtverlust ist in beiden Fällen gleich groß und zwar bei senkrechter Inzidenz in alle Flächen nach Fresnel gleich

$$\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

so daß beim ersten Übergang von einem Mittel ins andere der Strahl geschwächt wird von der Intensität 1 auf

$$R_1 = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = 0,955.$$

Beim Austritt aus dem Polygon, nach 20 Übergängen von einem Mittel ins andere, ist die Intensität des Strahles durch die Reflexion geschwächt auf

$$R_{20} = R_1^{20} = 0,399.$$

Zur Bestimmung des Lichtverlustes in der Glasmasse durch Absorption sei das diesbezügliche Resultat H. C. Vogels<sup>1)</sup> für das Jenaer Kron O 202 benutzt, der Schmelze, aus welcher das Objektiv des großen Refraktors des Potsdamer Astrophysikalischen Observatoriums hergestellt wurde. Vogel fand für eine Glasdicke von 10 cm und die Wellenlänge  $\lambda = 580 \mu\mu$  den Durchlässigkeitsfaktor dieses sehr durchlässigen Glases zu

$$A = 0,872.$$

Unter Annahme dieses Wertes ist die Intensität des Lichtes nach Zurücklegung eines Weges von 1228 mm gleich

$$A_{12,28} = 0,872^{12,28} = 0,186.$$

Demnach würde die Intensität des aus dem Prismenpolygon austretenden Lichtes, wenn man diejenige des eintretenden gleich Eins setzt, betragen

$$J_a = A_{12,28} \cdot R_{20} = 0,074.$$

Nimmt man jedoch an, daß die Ausführung und Justierung der Prismen vollkommen exakt wäre, so würde durch Reflexions-

1) H. C. Vogel, Sitz.-Ber. d. Berl. Akad. 1896. S. 1219.

verlust die Intensität nur auf  $R_2 = 0,912$  erniedrigt werden, weil zwischen den einzelnen Prismen keine Luftkeile vorhanden wären, und es würde

$$J_a = 0,17.$$

Über die wirkliche Lagerung der Einzelprismen konnte aber natürlich keine genaue Angabe gemacht werden, so daß man sich mit einer Schätzung von  $J_a$  zu etwa 12 Proz. der ursprünglichen Lichtintensität begnügen muß.

### § 3. Der Weg der Strahlenbündel.

#### Versuche zur Sichtbarmachung der Interferenzstreifen.

Für alle Interferenzanordnungen, bei denen zwei kohärente Lichtbündel einen beliebig langen Weg entgegengesetzt durchlaufen sollen, hat sich das Prinzip des Michelsonschen Interferometers<sup>1)</sup> als sehr geeignet erwiesen, und es wurde daher auch für die vorliegende Untersuchung in etwas modifizierter Weise verwandt. An Stelle einer Planparallelplatte zur Trennung des einfallenden Lichtbündels in zwei gleich helle, kohärente Teile wurde ein zerschnittener Würfel  $ACBD$ , dessen Schnittfläche  $AB$  halbdurchlässig versilbert war, benutzt. In Fig. 2 ist das Prismenpolygon der Einfachheit halber fortgelassen und durch zwei rechtwinklig zueinander stehende Spiegel  $S_1$  und  $S_2$  ersetzt, welche in ähnlicher Weise wirken. Darin bedeutet  $L$  die punktförmige Lichtquelle, deren Strahlen, durch das Collimatorobjektiv  $O_1$  parallel gemacht, senkrecht in die Würfelfläche  $AD$  eintreten. In der Schnittebene wird das einfallende Licht in zwei gleich helle Teilbündel zerlegt, von denen das eine den Würfel durchdringt, während das andere senkrecht nach unten reflektiert wird. Durch das Spiegelpaar wird dieses Bündel zweimal geknickt und tritt hierauf in das Prisma  $R$ , welches es in den Würfel zurückwirft. Die Fläche  $AB$  läßt sodann das Licht durch die Würfelfläche  $AC$  nach oben austreten, wobei infolge der Halbdurchlässigkeit von  $AB$  wieder die Hälfte der Intensität verloren geht. Das zweite Lichtbündel nimmt den entgegengesetzten Weg und wird bei seinen zwei

1) A. A. Michelson: Phil. Mag. (5) 13. S. 237. 1882. Am. Journ. of Sc. (3) 39. S. 115. 1890; s. auch: Light waves and their uses. Chicago 1903. Détermination expérimentale de la valeur du mètre etc. Mém. du Bureau internat. des poids et mesures, t. XI. Paris 1894.

Durchgängen durch  $AB$  entsprechend geschwächt. Während Michelson zur Justierung seines Interferometers die Fläche  $AB$  beweglich angeordnet hat, wurde hier aus technischen Gründen

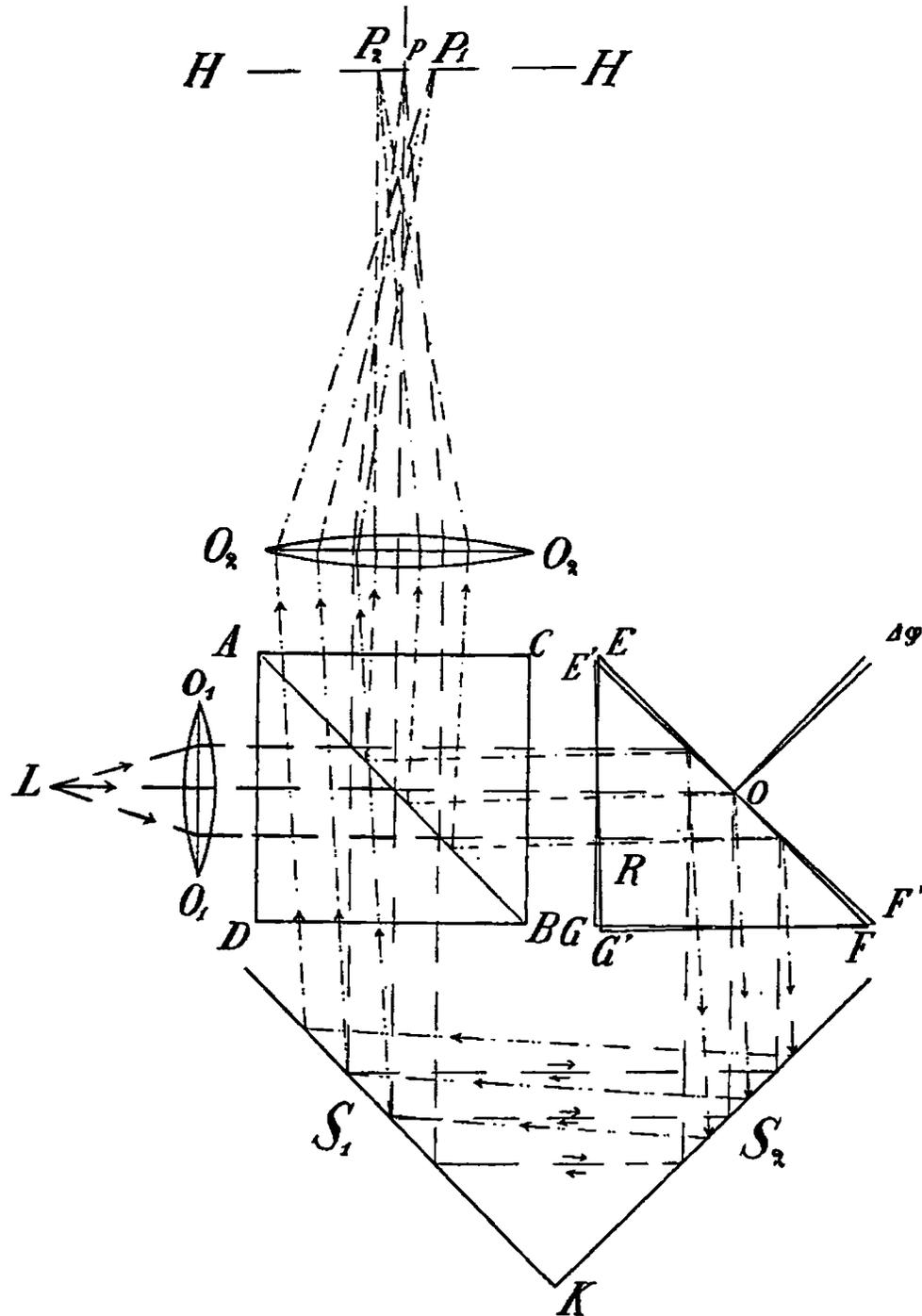


Fig. 2.

das Reflexionsprisma  $R$  um den Punkt  $O$  nach allen Seiten drehbar gemacht. In der Figur liegt  $O$  in der Reflexionsfläche, in Wirklichkeit lag der Punkt ca. 10 mm dahinter. Durch eine Drehung von  $R$  werden gleichzeitig beide Strahlenbündel

beeinflußt, während eine Bewegung der Fläche  $AB$  nur die Richtung des daran reflektierten Bündels ändert.

Sind nun die optischen Teile so justiert, daß die Flächen  $AB$  und  $EF$  einander und auch der Schnittkante  $K$  der Spiegel  $S_1$  und  $S_2$  parallel sind, so durchlaufen beide Teilbündel vollkommen gleich lange und entgegengesetzte Lichtwege und treten einander parallel nach oben aus dem Würfel aus. In der Brennebene  $HH$  des darüber stehenden Objectives  $O_2$  entsteht dann von der Lichtquelle  $L$  der Bildpunkt  $P$ . Die beiden Strahlenbündel kommen jedoch hier nicht mit der gleichen Phase an, da der eine Teil die durchlässige Silberschicht zweimal durchdringen muß, während der andere ebenso oft an ihr reflektiert wird. Es entsteht so ein konstanter, von der Dicke der Silberschicht allein abhängiger Phasenunterschied zwischen beiden Bündeln. Dreht man nun das Prisma  $R$  aus seiner Lage  $EFG$  um den Winkel  $\Delta\varphi$  in die Lage  $E'F'G'$ , so werden dadurch beide Teilbündel um  $2\Delta\varphi$  nach entgegengesetzten Seiten von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Der Bildpunkt  $P$  teilt sich daher in zwei schwächere Punkte  $P_1$  und  $P_2$ , welche nach verschiedenen Seiten von  $P$  wandern.<sup>1)</sup> Die Lichtwege beider Strahlenbündel werden mit der Drehung von  $R$  verschieden lang. Die zwei Bilder  $P_1$  und  $P_2$  von  $L$  schwingen aber ständig mit konstanter Phasendifferenz, so daß sie zur Entstehung von Interferenzen Veranlassung geben können.

Bei der ersten Versuchsanordnung waren der Glaswürfel  $W$  und das Reflexionsprisma  $R$  (Fig. 3) senkrecht über dem horizontal rotierenden Prismenkranz so aufgestellt, daß sie symmetrisch zur Rotationsachse standen und an der Rotation nicht mitteilnahmen. Beide Glaskörper hatten eine gemeinsame Fassung erhalten, welche gestattete, das Prisma  $R$  in einem gewissen Bereiche nach allen Seiten mikrometrisch zu verdrehen. Bei horizontalem Lichteinfall wurden also durch diese Vorrichtung zwei kohärente Lichtbündel senkrecht nach unten reflektiert, wobei der gegenseitige Abstand je zweier sich entsprechender Strahlen gleich einer Würfelkante war. Die beiden

1) Der Punkt  $P_1$ , in welchem die Strahlen konvergieren, die die Schnittfläche  $AB$  zweimal durchdrungen haben, müßte in Fig. 2 auf der linken Seite von  $P$ , dagegen  $P_2$  auf der rechten Seite liegen.

Reflexionsprismen  $R_1$  und  $R_2$ , welche symmetrisch zur Rotationsachse fest mit dem beweglichen Apparat verbunden waren, hatten eine solche Lage, daß die beiden Lichtbündel um  $90^\circ$  geknickt wurden, worauf sie das Prismenpolygon in entgegengesetzter Richtung durchliefen. In der durch Fig. 3 dargestellten Lage des rotierenden Teiles war der Lichtweg beider Bündel folgender:

1. reflektiertes Bündel:  $L, W$  (Reflexion),  $R_1, P_1, P_2 \dots P_9, P_{10}, R_2, R, W$  (Reflexion),  $L'$ ;
2. durchgehendes Bündel:  $L, W, R, R_2, P_{10}, P_9, \dots P_2, P_1, R_1, W, L'$ .

Die zwei Bündel durchliefen also denselben Weg, aber in entgegengesetzter Richtung. Aus Fig. 1 ist ersichtlich, daß bei parallelem Einfall der beiden Bündel in den Prismenkranz die beiden Lichtwege wohl immer parallel und gleich lang, aber nicht miteinander identisch sind. Dadurch werden allerdings die entstehenden Interferenzstreifen gegen Temperaturschwankungen und Dichteänderungen im Glaskörper empfindlich. Vollkommene Identität der Lichtwege hätte wohl theoretisch erzielt werden können durch die Wahl einer ungeraden Anzahl von Reflexionen im Prismenkranz. Da aber auch hier dieser Vorzug bei einer kleinen Abweichung der Prismen von ihrer berechneten Form oder einem Justierfehler im Polygon verloren gegangen wäre, so wurde von vornherein darauf verzichtet. Setzt man selbst theoretisch fehlerfreie Einzelprismen voraus, so wäre eine etwaige exakte Justierung des ganzen Polygons bei den starken Zugkräften, welche bei schneller Rotation auftreten mußten, auf längere Zeit nie aufrecht zu erhalten gewesen.

Nach dem Einsetzen der Prismen in ihre gemeinsame Fassung wurde das ganze Polygon mit Hilfe eines Autokollimationsfernrohres so justiert, daß ein auf der einen Seite senkrecht eintretendes Bündel wieder parallel zu sich austrat. Hiernach wurde der Prismenbehälter mit einer Stahlscheibe fest verschraubt, womit eine starke Pressung der Prismen auf ihre Unterlage verbunden war. War das Einlegen der Glaskörper und deren Justierung genügend sorgfältig vorgenommen worden, so trat mit der Verschraubung des Stahlstückes keine Änderung in der Justierung ein. Ließ man jedoch jetzt die

Maschine längere Zeit mit etwa 1500—2000 Touren pro Minute laufen, so zeigte sich, daß zunächst eine geringe Verlagerung der Prismen eintrat, die aber später völlig konstant blieb. Der hierdurch entstandene Fehler im Polygon wurde dann durch eine Nachjustierung des Prismas  $R$  kompensiert.

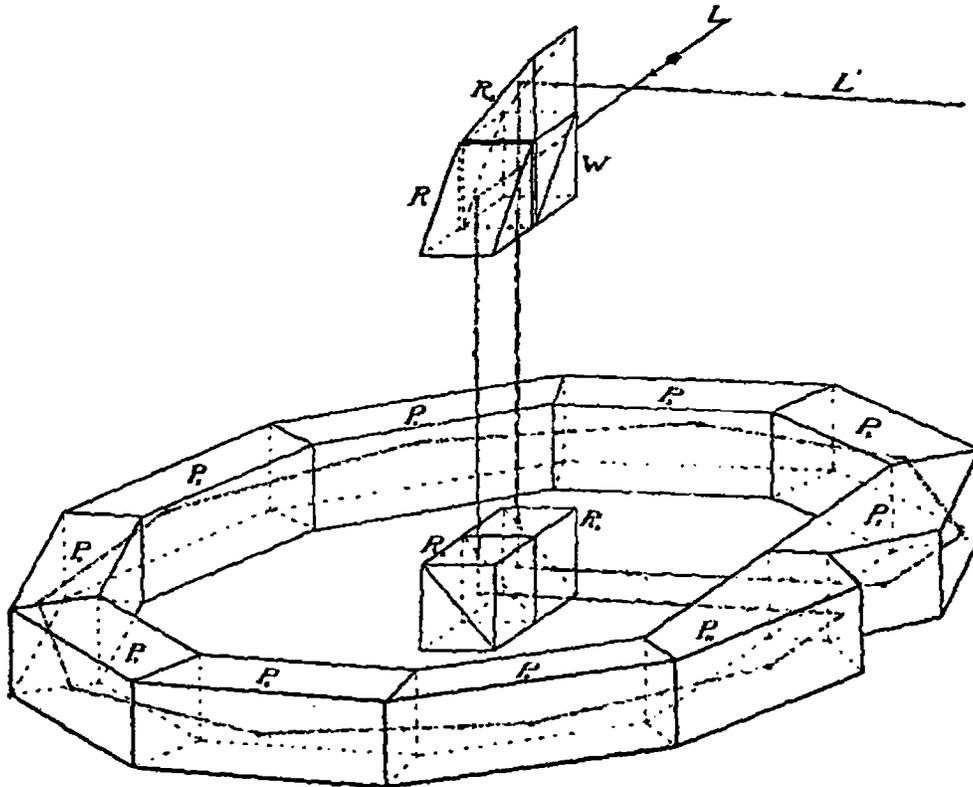


Fig. 3.

Bei den ersten Versuchen diente eine Siedentopfsche Quecksilberbogenlampe<sup>1)</sup> als Lichtquelle, welche bei Verwendung von Kaliumbichromatlösung in einer Didymglasküvette als Filter sehr gut monochromatisches Licht lieferte. Eine an der Lampe befestigte Beleuchtungslinse gab schon hinreichend paralleles Licht, so daß ein Kollimator entbehrt werden konnte.

Die Justierung des optischen Apparates wurde zunächst bei Beobachtung mit bloßem Auge so weit gebracht, daß die beiden Lichtbündel annähernd parallel austraten. In dem Fernrohr bei  $L'$  (in der Figur fortgelassen) sah man dann zwei gleichhelle, grüne Lichtscheibchen, die beiden Kraterbilder der Hg-Lampe. Bei langsamer Drehung des Prismas  $R$  be-

1) Zeitschr. f. Instrumentenkunde 24. S. 22. 1904.

wegten sich die Bilder entgegengesetzt zueinander und verschwanden wegen der kleinen Öffnung des ganzen Apparates schon bei kleinen Verschiebungen von  $R$  aus dem Gesichtsfeld. Der Parallelismus der austretenden Bündel war erreicht, wenn die Kraterbildchen genau koinzidierten. In diesem Falle traten in dem auf unendlich eingestellten Fernrohr sofort scharfe Interferenzstreifen auf. Kurz vor und nach dem Eintreten der Koinzidenz beider Kraterbildchen konnten noch Systeme von Interferenzstreifen beobachtet werden, welche aber nicht in der Brennebene des Fernrohrobjektives entstanden, sondern wesentlich dahinter lagen. Diese Streifen wurden bei den späteren Untersuchungen fast ausschließlich benutzt, da sie schärfer als das erste System erschienen und auch leichter zu erhalten und in Form und Lage zu ändern waren. Richtung und Breite der Streifen konnte beliebig variiert werden durch Verdrehung des Prismas  $R$ . Waren sie ziemlich eng, so erschienen sie völlig geradlinig, bei großer Streifenbreite jedoch trat eine ausgeprägt hyperbolische Form der Streifen auf. Außer diesen beschriebenen Interferenzbildern konnte noch eine ganze Anzahl von Streifensystemen gesehen werden, wenn der Okularauszug des Fernrohres langsam vor und zurück geschoben wurde. Bei diesen Interferenzen waren die Breite und Richtung der Streifen ganz verschieden und unabhängig von der Justierung des Prismas  $R$ . Ihr Ursprung war in den kleinen Luftkeilen zwischen den einzelnen Prismen des Polygons zu suchen.

Die besprochene Justierung gelang nur dann, wenn der rotierende Teil die in der Fig. 3 gezeichnete Lage genau inne hatte oder um  $180^\circ$  dazu verdreht war. Drehte man den Prismenkranz auch nur um Bruchteile eines Grades aus dieser Lage heraus, so änderte sich die gegenseitige Lage der beiden Kraterbildchen und das Streifensystem drehte sich um fast  $90^\circ$ . Aus diesem Grunde war also die Versuchseinrichtung so zu treffen, daß bei Rotation der Maschine nur ganz kurze Lichtblitze den Apparat in dem Augenblick durchlaufen mußten, in welchem der rotierende Teil sich genau in einer der beiden angegebenen Stellungen befand. Daher wurde zuerst eine Stahlscheibe von ca. 55 cm Durchmesser auf die Rotationsachse aufgesetzt und exakt zentriert. An zwei diametral gegenüber-

liegenden Stellen dieser Scheibe, die zugleich als Deckel für den Prismenbehälter diente, wurde sie mit zwei ganz engen Blenden versehen, welche in einem kleinen Bereiche verschiebbar angeordnet waren, um sie genau in die richtige Lage bringen zu können. Das Licht, durch eine Sammellinse zu einem Punkte in der Blendenebene konzentriert, wurde von unten durch die Blendenöffnungen senkrecht nach oben gesandt, dann wieder parallel gemacht und horizontal in den Apparat reflektiert. Die Versuche zeigten aber, daß hierbei die Öffnungen der Blenden sehr klein sein mußten, um eine genügende Bildruhe bei rotierendem Apparat zu erzielen. Damit war aber eine sehr erhebliche Lichtschwächung verbunden, so daß schon bei ganz niedrigen Tourenzahlen (ca. 100 pro Minute) die Bildhelligkeit so gering wurde, daß die Interferenzstreifen nicht mehr erkannt werden konnten. Da das Interferenzbild auch in weißem Licht sichtbar blieb, wurde die Hg-Lampe durch eine Gleichstrombogenlampe ersetzt, jedoch mit demselben negativen Resultat.

Um nun diese Blenden ganz entbehren zu können und eine größere Lichthelligkeit zu erzielen, kam bei derselben Anordnung die Beleuchtung mit Hilfe elektrischer Entladungsfunken in Frage. Wenn es gelang, starke elektrische Funken so zu erzeugen, daß sie entweder synchron mit der Tourenzahl der Maschine oder auch in einem rationalen Verhältnis dazu auftraten, so mußte immer bei einer ganz bestimmten Stellung des Prismenkränzes nach einem oder mehreren Umläufen ein Funke auftreten. Da bei der sehr kurzen Dauer der elektrischen Entladungen die Eigenbewegung der Maschine während dieser nicht in Frage kam, so mußten dann die Interferenzen in gleichen Zeitintervallen aufblitzen und völlig unbeweglich erscheinen.

Für diese Versuche wurde ein 40 cm Funkeninduktor benutzt, welcher mit Elektroden aus Kadmium oder Zink äußerst helles und auch für den vorliegenden Zweck sehr geeignetes Licht lieferte. Zunächst wurde mit einem gewöhnlichen Hammer- und Quecksilberunterbrecher versucht, ein rationales Verhältnis zwischen Funkenfolge und Tourenzahl herzustellen. Das Experiment lehrte jedoch, daß ein derartiges Zusammenarbeiten beider Apparate nur für sehr kurze Zeit aufrecht erhalten

werden konnte. Das Streifensystem blitzte dann in regelmäßigen Zwischenräumen auf und erschien unbeweglich. Aber schon bei der kleinsten Störung im Gang eines Apparates begannen die Streifen unruhig zu werden und zuckten schließlich ganz unregelmäßig hin und her. Deshalb wurde direkt auf die Achse des rotierenden Teiles eine Unterbrecherscheibe aufgesetzt, um Synchronismus zwischen der Zahl der Funken und den Umdrehungen zu erhalten. Das Eintreten dieses Zustandes war schon äußerlich dadurch zu erkennen, daß dann die laufende Maschine vollkommen still zu stehen schien, wenn sie bei verdunkeltem Zimmer mit dem Funkenlicht beleuchtet wurde, während sie bei irgendeiner Unregelmäßigkeit in der Unterbrechung scheinbar den Sinn ihrer Drehung ständig wechselte. Die Bildunruhe war jetzt sehr stark verringert, so daß zeitweise die Streifen fast eine halbe Minute lang unbeweglich erschienen. Dann aber trat auch hier das oben beschriebene Zucken der Streifen auf und war bei Schwankungen in der Tourenzahl des Antriebsmotors besonders stark. Ein absolut sicheres Arbeiten des Unterbrechers war auch bei dessen sorgfältigster Reinhaltung nie zu erzielen, so daß auch diese Versuche ohne nennenswerten Erfolg blieben.

#### § 4. Die definitive Form des Interferometers.

Um die bei der ersten Anordnung des optischen Apparates aufgetretene Bildunruhe unschädlich zu machen, wurde jetzt der Glaswürfel  $W$  samt dem Reflexionsprisma  $R$  mit dem rotierenden Teile fest verbunden, so daß sie an der Rotation desselben teilnahmen. (Fig. 4.) Da bei großen Umlaufgeschwindigkeiten zu befürchten war, daß sich infolge der auftretenden sehr starken radialen Zugkräfte die empfindliche Justierung dieser Prismen ändern würde, so wurden die vier Glaskörper  $W$ ,  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  zu einem einzigen, soliden Stück vereinigt und in einer sehr starken Rotgußfassung auf die Rotationsachse der Maschine verschraubt. Zur Justierung dieses Mittelstückes war vorgesehen, daß es etwas gedreht und nach allen Seiten gekippt werden konnte.

Bei den vorausgegangenen Versuchen hatten sich ferner die Reflexionsbilder, welche von den Ein- und Austrittsflächen der einzelnen Prismen herrührten, als sehr störend erwiesen,

weshalb bei der neuen Anordnung alle in Frage kommenden Flächen so abgeschrägt wurden, daß die Reflexionsbilder aus dem Gesichtsfeld des Beobachtungsfernrohres herausfallen mußten. Das Mittelstück bekam deshalb die in Fig. 4 gezeichnete Form, wobei der Deutlichkeit halber alle mechanischen Teile fortgelassen sind. Der Winkel, um welchen alle Flächen abgeschrägt wurden, betrug ca.  $6^\circ$ . Der ganze Glaskörper bestand also aus den Einzelteilen  $ABC$ ,  $ACDE$ ,  $CDFG$  und  $LMN$ , welche Trennung zur möglichst leichten technischen

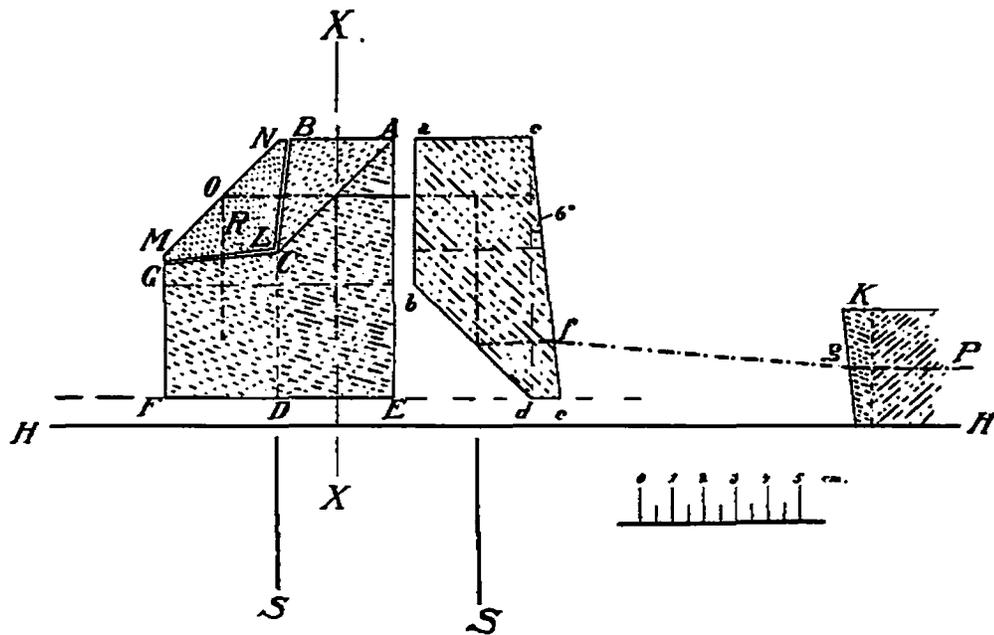


Fig. 4.

Herstellung der Stücke gewählt worden war. Die drei ersten Glaskörper wurden durch Zusammenkitten zu einem einzigen Stück vereinigt, welches die halbdurchlässige Silberschicht bei  $AC$  enthielt. Der einzige bewegliche Teil war das Reflexionsprisma  $R$ , dessen Winkel bei  $M$  und  $N$   $39^\circ$  betragen.  $R$  war drehbar um einen Punkt, der ca. 10 mm hinter der reflektierenden Fläche bei  $O$  lag, angeordnet, wobei die Justierung und Klemmung durch fünf Mikrometerschrauben erfolgen konnte.

Um den Strahlengang zwischen Mittelstück und Prismenpolygon sichtbar zu machen, ist in Fig. 4 rechts noch ein Schnitt durch den Körper bei  $XX$  um  $90^\circ$  gedreht gezeichnet.

Durch die Brechung in dem Glaskeile  $cde$  mit der Kante in  $c$  verlief das Licht auf dem Luftwege  $fg$  schräg nach unten und wurde dann durch die entsprechenden Keile  $K$ , welche

mit den Kanten nach unten auf die Eintrittsstelle des Prismenpolygons gekittet waren, wieder horizontal gemacht. Um die volle Öffnung des Apparates ausnützen zu können, mußte das Mittelstück um einige Millimeter über der Fläche  $II \bar{H}$ , auf welcher der Prismenkranz ruhte, erhöht angeordnet werden. Die Richtung und Lage der Rotationsachse des Apparates ist in Fig. 4 durch die Striche  $S$  bezeichnet.

Der Justiervorgang war bei dieser Anordnung naturgemäß genau derselbe wie vorher. Schon die ersten Versuche zeigten,

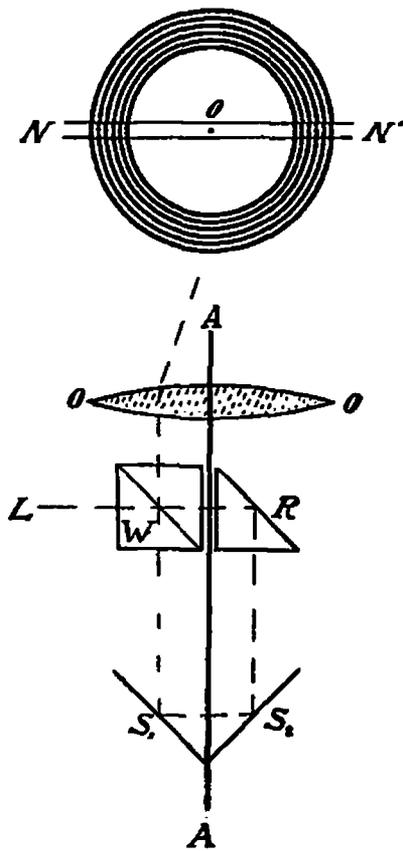


Fig. 5.

daß jetzt die Verdrehung des Streifen-systems in der oben beschriebenen Art verschwunden war. Die Interferenzen waren jetzt auch bei kontinuierlichem Lichte selbst bei Tourenzahlen von 1500 und mehr Umdrehungen pro Minute sichtbar. Als Lichtquelle wurde von nun ab ausschließlich eine 20 Amp. Gleichstrombogenlampe angewandt. Für Justierzwecke war die Siedentopfsche Hg-Lampe wohl noch sehr gut zu verwenden, bei rotierendem Apparat erwies sie sich jedoch auch bei voller Öffnung der Prismen als viel zu lichtschwach.

Zum Verständnis der Lagenänderung des Streifen-systems bei einer Drehung des Prismenpolygons diene Fig. 5, in welcher das Prismenpolygon wieder durch die beiden rechtwinklig zueinander stehenden Spiegel  $S_1$  und  $S_2$  ersetzt ist. Die Rotationsachse des Apparates sei  $AA$ . Zunächst soll angenommen werden, daß der ganze optische Apparat nebst Bogenlampe und Objektiv  $O$  sich als Ganzes drehe. Dann ist ohne weiteres klar, daß sich für einen ruhenden Beobachter das von  $O$  entworfene reelle Streifen-system synchron mit der Maschine um die Achse  $AA$  in einem Kreise drehen muß. Der Radius dieses Kreises ist bestimmt durch den scheinbaren Abstand der Interferenzstreifen von der Achse und durch die Lage und Brennweite des Objektivs  $O$ . Sieht man jetzt das Objektiv

als ruhend an, so wird an der Erscheinung nichts geändert, denn die Strahlen durchdringen dann bei einer Umdrehung des Apparates verschiedene Teile desselben, was aber bei richtiger Justierung für den Bildort keine Änderung bedingt. Stehen die Interferenzstreifen senkrecht auf dem Radius des Kreises und sind sie genügend kurz, so muß also der Beobachter im ruhenden Fernrohr ein System von konzentrischen Kreisen bei Rotation der Maschine sehen (in der Fig. 5 um  $90^\circ$  gekippt gezeichnet). Große Streifenlänge und eine andere Orientierung derselben wird die Erscheinung verwaschen oder gar nicht erkennen lassen.

Nimmt man jetzt auch die Lichtquelle als ruhend an, so wird nur dann Licht zum Beobachter gelangen können, wenn der Prismenkranz die in der Figur gezeichnete Lage inne hat. Dreht man nun den Apparat um einen ganz kleinen Winkel aus dieser theoretischen Stellung heraus, so wird das einfallende Lichtbündel sehr stark zur Seite abgelenkt und damit bei der geringen Öffnung der Prismen ein großer Teil abgeblendet. Gleichzeitig bewegt sich aber auch das Bild der Interferenzen um eine kleine Strecke, welche von der Drehung des ganzen Apparates und von der damit verbundenen Änderung des Einfallswinkels des Lichtes abhängt. Die Bewegung erfolgt aber relativ langsam und ist sehr gering, denn schon eine Verdrehung der Maschine um  $10-15'$  nach beiden Seiten von der theoretisch richtigen Lage genügte, um das Bild verschwinden zu lassen, wobei die Bildhelligkeit von Null bis zu einem Maximum anwuchs und wieder auf Null zurücksank. Die Bewegung des Lichtmaximums erfolgte gleichsinnig mit derjenigen des Interferenzbildes, aber sehr viele Male schneller. Dem Beobachter erschien daher bei Rotation der Maschine das Interferenzbild scheinbar still zu stehen, während bei jeder Umdrehung ein Lichtblitz darüber hinweghuschte. (Stroboskop.) Diese Erscheinung ähnelt derjenigen, welche man bei einem fahrenden Eisenbahnzuge beobachten kann. Bei ruhendem Auge sind Einzelheiten der vorüberfahrenden Lokomotive nicht zu erkennen, folgt jedoch das Auge sehr schnell der Bewegung einzelner Teile, so scheinen diese stillzustehen.

Bei dieser Beobachtung der Streifen hängt deren Sichtbarkeit nicht von ihrer Orientierung, Form und Breite ab wie

vorher. Man sieht allerdings das gesamte Streifensystem nicht momentan als Ganzes aufleuchten, wie dies bei der Beobachtung mit Funkenlicht der Fall ist, sondern es werden verschiedene Teile des Interferenzbildes nacheinander sichtbar, wobei diese etwas verschiedene Lagen zueinander einnehmen. Wenn jedoch die Beleuchtungsdauer kurz genug ist, wird die hieraus folgende Unschärfe des Bildes unmerklich werden. Bei folgende kleine Tabelle zeigt, daß die Meßgenauigkeit von Photogrammen, welche bei ruhendem und bewegtem Apparat aufgenommen sind, nur wenig voneinander abweichen. Die angegebenen Streifenbreiten sind abgeleitet aus fünf Messungen von je fünf Interferenzstreifen nach der Formel  $b = \frac{(l_1 + l_2) - (l_4 + l_5)}{6}$ , wo  $l_1, l_2 \dots$  die Einstellungen auf die Streifen bedeuten.<sup>1)</sup>

Apparat in Ruhe (Exposit.-Zeit ca. 1 Sek.)			Apparat in Bewegung (Exposit.-Zeit ca. 5 Min.)		
Platte	Aufnahme	Streifenbreite in mm	Aufnahme	Touren pro Min.	Streifenbreite in mm
70	2	0,1874	1	567	0,1869
	4	0,1878	3	527	0,1880
	6	0,1849	5	546	0,1877
	8	0,1875	7	525	0,1903
	10	0,1865	9	527	0,1885
	12	0,1865	11	485	0,1895
	14	0,1880	13	510	0,1890
	16	0,1874	15	278	0,1884
71	2	0,1876	1	300	0,1856
	4	0,1865	3	297	0,1879
	6	0,1861	5	441	0,1919
	8	0,1859	7	600	0,1845
Mittel:		0,1868	Mittel:		0,1882
		$\pm 0,0003$ (m. F.)			$\pm 0,0019$ (m. F.)
		( $\pm 0,2\%$ )			( $\pm 1\%$ )
Gesamtmittel:		$0,1875 \pm 0,0007$ (m. F.)			
		( $\pm 0,4\%$ )			

Der größere mittlere Fehler bei den in Bewegung erhaltenen Aufnahmen rührt zum Teil von der besprochenen Unschärfe des Bildes her, außerdem wirken aber noch Ungleich-

1) Besser wäre die auf den Regeln der Ausgleichsrechnung beruhende Formel  $b = \frac{2(l_5 - l_1) + (l_4 - l_2)}{10}$  zur Anwendung gekommen.

förmigkeit in der Tourenzahl, Luftunruhe und Erschütterungen des Apparates verschlechternd auf die Bilder. Die Meßgenauigkeit ist jedenfalls noch genügend und es kann durch mehrfaches Ausmessen eine noch größere Sicherheit des Resultates erhalten werden. Die Verbreiterung der Streifen bei rotierendem Apparat liegt noch innerhalb des mittleren Fehlers.

Das diskontinuierliche Aufblitzen des Streifensystems bei geringen Umlaufzahlen der Maschine war für die visuelle Messung der Interferenzen äußerst störend, es verschwand aber schon bei 400—600 Touren pro Minute, so daß dann das Bild einen vollkommen kontinuierlichen Eindruck machte. Wie aus Fig. 5 ersichtlich ist, müssen sich Verschiebungen des Streifensystems durch Weiter- oder Engerwerden der konzentrischen Kreise kenntlich machen. Durch geeignete Prismenkombinationen wurden nun zur Beobachtung dieser Erscheinung zwei diametral gegenüberliegende Teile dieser Kreise herausgeschnitten und so übereinander projiziert, daß sie nur durch eine feine, ganz scharfe Grenzlinie getrennt erschienen. Auf diese Weise konnten einmal direkt die doppelten Streifenverschiebungen gemessen, ferner aber auch die Einzelverschiebungen der beiden Gesichtsfeldhälften an geeigneten Meßmarken kontrolliert werden. Die Meßmethode ähnelt derjenigen, wie sie bei den Koinzidenz-Telemetern<sup>1)</sup> der Firma Zeiss Anwendung gefunden hat. Die Anordnung der optischen Teile ist aus Fig. 6 zu ersehen, worin aber die Größenverhältnisse der Deutlichkeit halber nicht richtig zur Darstellung gekommen sind.

*L* bedeutet die Lichtquelle, eine 20 Amp-Gleichstrombogenlampe, deren Strahlen durch den Kondensator *C* parallel gemacht und durch die viereckige Blende *B* auf die nutzbare Größe abgegrenzt wurden. Das parallele Lichtbündel wurde nun durch die beiden Pentagonalprismen *M* in zwei gleiche Teile zerlegt, welche nach entgegengesetzten Seiten um je 90° abgelenkt wurden. Je zwei weitere Prismen derselben Form waren so angeordnet, daß die beiden Lichtbündel aus zwei um 180° voneinander abstehenden Richtungen in den Prismenkranz eintreten konnten. Bei dieser Anordnung waren Pentagonal-

---

1) Eingetragenes Pat. Nr. 16 283, Kl. 42. 1903. D. R. P. Nr. 175 900, Kl. 42. 1905. Dtsch. Mechan.-Zeitung S. 61. 1907.

prismen gewöhnlichen rechtwinkligen Prismen vorzuziehen, da bei jenen die Ablenkung um  $90^\circ$  von ihrer Orientierung völlig unabhängig ist und so die Justierung außerordentlich erleichtert wurde. In der in Fig. 6 dargestellten Lage der Maschine trat also das Licht von  $M$  kommend in das Mittelstück  $G$  des rotierenden Teiles ein, wurde hier in zwei kohärente Bündel zerlegt, welche das Polygon  $J, H$  in entgegengesetztem Sinne durchliefen, und trat dann durch das Mittelstück wieder nach oben aus, nachdem beide Bündel wieder vereinigt waren. Das über der Maschine befestigte, ruhende Prisma  $R$  warf dann das Licht horizontal nach vorn in den Beobachtungsapparat. Bei einer Drehung der Maschine um  $180^\circ$  konnte das Licht von der entgegengesetzten Seite eintreten und durchlief denselben Weg. So konnten also die Interferenzstreifen in zwei um  $180^\circ$  voneinander abstehenden Lagen der Maschine beobachtet werden. Diese beiden Bilder, welche also im Abstand von je einer halben Umdrehung des Prismenkranzes nacheinander aufblitzten, waren nun so übereinander zu bringen, daß sie möglichst genau ausgemessen werden konnten. Zu diesem Zweck bestand der optische Apparat von  $R$  an aus zwei völlig gleichen, symmetrisch angeordneten Teilen, durch welche die Interferenzbilder durch zwei getrennte Objektive entworfen wurden. In der gezeichneten Stellung des Prismenkranzes mußte also hinter dem Brennpunkte des astronomischen Fernrohrobjektives  $O$  (relat. Öffnung 1:10,  $f = 607$  mm) ein reelles Interferenzbild entstehen. In das konvergente Strahlenbündel hinter dem Objektiv waren noch die Irisblende  $A$  und das Aufrichtepisma  $D$  eingeschaltet. Die Irisblende diente zum Abfangen von Reflexionsbildern und des störenden Nebenlichtes. Das Dovesche Prisma  $D$ , welches drehbar angeordnet war, wurde benutzt, um den Interferenzstreifen ein beliebiges Azimut geben zu können. Wegen der in diesen Prismen auftretenden starken Lichtbrechung liefern sie eigentlich nur scharfe Bilder, wenn sie sich im parallelen Strahlengang befinden. Dies war jedoch wegen der schwierigen Justierung des letzten Teiles der Anordnung nicht angängig, auch zeigte sich kaum eine merkliche Bildverschlechterung, wenn das Prisma erst vor das Objektiv, dann dahinter in das schwach konvergente Bündel gesetzt wurde. Das Reflexionsprisma  $E$  warf dann das Licht-

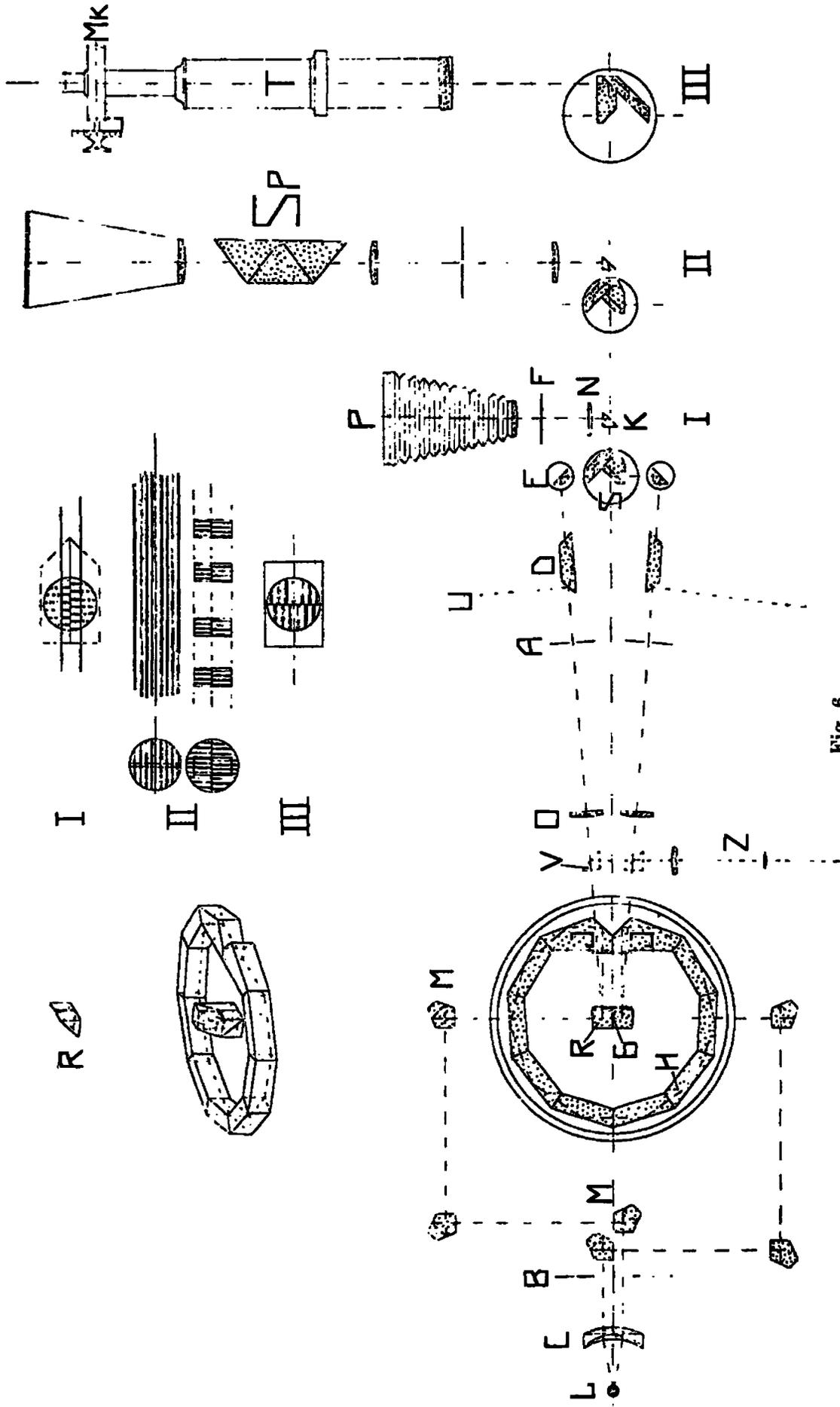


Fig. 6.

bündel so in das Koinzidenzprisma  $S$ , daß das reelle Interferenzbild in die Einstellebene derselben zu liegen kam. Dieses Prisma hatte die Form der Okularprismen, wie sie in Koinzidenz telemetern Verwendung finden. Im Prinzip entsprechen sie zwei übereinander stehenden, gekreuzten Spiegeln, durch welche zwei aus entgegengesetzten Richtungen kommende Lichtbündel so abgelenkt werden, daß sie parallel austreten. Die bei derartigen Spiegelkonstruktionen störend auftretende, sehr starke Trennungslinie zwischen den beiden Gesichtsfeldhälften ist bei den Koinzidenzprismen dadurch vermieden, daß die Spiegel durch zwei miteinander verkittete Prismen ersetzt sind, welche den Lichtbündeln nach einer oder mehreren Reflexionen die gewünschte Richtung erteilen. Die Kittfläche ist zur Hälfte versilbert und trennt so das Gesichtsfeld in zwei Teile. Die Trennungslinie wird von der sehr scharfen Grenze der Silberschicht gebildet. In geeigneter Weise an den Prismen angebrachte Dächer können noch zur Umkehrung der einzelnen Bilder dienen.

Auf diese Weise war es also möglich, beliebige Stellen der beiden Interferenzbilder zur Koinzidenz zu bringen und zwar so, daß die beiden Bildfeldhälften durch eine feine, scharfe Linie getrennt erschienen, auf welcher die Interferenzstreifen senkrecht standen. Bei irgendeiner Verschiebung der Streifen-systeme mußten sich dann die beiden Bildhälften entgegengesetzt bewegen, so daß mit Hilfe einer geeigneten Meßvorrichtung (Kompensationseinrichtung oder Meßmikroskop) direkt der doppelte Betrag der Streifenverschiebung bestimmt werden konnte. In dem in Anordnung I und II gezeichneten Koinzidenzprisma lag die Trennungslinie der Bilder horizontal, aber gegen den Beobachter schräg nach hinten geneigt, so daß es nicht möglich war, sie gleichzeitig in ihrer ganzen Länge scharf zu sehen. Da diese Neigung jedoch nicht allzu stark war, konnten noch drei bis vier Interferenzstreifen links und rechts von der senkrecht zur Trennungslinie eingerissenen Meßmarke gleichzeitig mit dieser scharf eingestellt werden. Die dritte Beobachtungsanordnung bringt ein anderes Koinzidenzprisma mit vertikaler Trennungslinie zur Darstellung. Hierbei konnte man wohl auf die Linie in ihrer ganzen Ausdehnung gleichzeitig fokussieren, die Interferenzfransen erschienen aber nur

ganz in ihrer Nähe links und rechts scharf. Beide Methoden ließen die gleiche Meßgenauigkeit zu.

Die einzelnen Teile des ganzen Beobachtungsapparates waren justierbar auf optische Bänke montiert, welche auf einem in Höhe verstellbaren, eisernen Projektionstisch festgeklemmt wurden. Die drei Prismen *E* und *S* befanden sich zur leichteren Justierung auf kleinen, dreh- und verstellbaren Tischchen. Zum Schutz gegen Nebenlicht wurde diese ganze Einrichtung mit einem lichtdichten Kasten bedeckt. Davon ganz unabhängig waren die beiden Prismen *R* auf einem sehr festen, eisernen Dreifußgestell mit langem, horizontalem Arme befestigt, welches neben der Maschine auf dem Fußboden stand.

#### Justierung.

Bei der Justierung der ganzen Einrichtung wurde stets mit den der Lichtquelle zunächst liegenden Teilen begonnen und im Sinne der Lichtbewegung fortgeschritten. Ein ausgespannter Faden, welcher die Rotationsachse der Maschine in ihrer Verlängerung genau schnitt, markierte die Mittellinie der ganzen optischen Anordnung, so daß jetzt die einzelnen Teile roh eingestellt werden konnten. Dann nahm man das Mittelstück *G* des rotierenden Teiles aus dem Prismenbehälter heraus und stellte die Beleuchtungsprismen *M* so ein, daß die beiden Lichtbündel, aus entgegengesetzten Seiten kommend, zentral die Rotationsachse schnitten. Die richtige Lage der Prismen war leicht zu prüfen, wenn zwischen Kondensor *C* und der Blende *B* eine gute plane Glasplatte so aufgestellt wurde, daß sie die beiden Lichtbündel, nachdem jedes derselben alle sechs Pentagonalprismen in entgegengesetztem Sinne durchlaufen hatte, in ein Fernrohr reflektierte. In diesem waren zwei Kraterbildchen der Bogenlampe sichtbar, wenn beide Lichtbündel nicht genau parallel einfielen; koinzidierten beide Kraterbildchen, so war dies als Zeichen für die richtige Justierung der Beleuchtungsprismen anzusehen. Die nun folgende Justierung des rotierenden Teiles erfolgte nach Einschrauben von *G* in der schon beschriebenen Weise. Dazu wurde mit Vorteil das Fernrohr *Z* mit dem vorklappbaren Prisma *V* angewandt, so daß durch diese Justierung keine Änderung im übrigen optischen Apparat getroffen zu werden

brauchte. Mit Hilfe eines Theodoliten legte man dann die Symmetrielinie der beiden Hälften des Apparates optisch genau fest, horizontierte die beiden Prismen  $R$  und drehte sie um gleiche Winkel nach beiden Seiten von der Symmetrielinie unter Benutzung eines senkrecht dazu stehenden Millimetermaßstabes (Poggendorfsche Spiegelablesung). Bei richtiger Stellung der Maschine mußten dann die beiden von  $R$  kommenden Strahlenbündel horizontal verlaufen. Durch deren Richtungen waren ohne weiteres die Lagen der beiden optischen Bänke  $O E$  gegeben. Die zwei Objektive  $O$  wurden gleichweit von  $R$  entfernt festgeklemmt und die Irisblenden in deren Brennebenen befestigt.

Der schwierigste Teil der ganzen Justierung bestand nun in der Aufstellung der Prismen  $D$ ,  $E$  und  $S$ . Die drei Prismen  $E$  und  $S$  wurden zunächst so eingestellt, daß die Austrittspupillen der beiden Hälften des optischen Apparates zusammenfielen. Dann verschob man diese Prismen gleichzeitig, bis die beiden reellen Interferenzbilder in die Ebene der Meßmarke des Koinzidenzprismas zu liegen kamen, was eventuell durch seitliches Verschieben derselben erreicht werden konnte. Dabei war es praktisch, die Maschine schnell laufen zu lassen, so daß zwei, scheinbar kontinuierliche Bilder beobachtet werden konnten. Erschienen nun Interferenzen und Trennungslinie gleichzeitig scharf, so wurden jene mit Hilfe der Prismen  $D$  soweit gedreht, daß sie genau senkrecht zur Trennungslinie der beiden Gesichtsfeldhälften standen. Bei richtiger Justierung aller Teile sah man also dann im Beobachtungsinstrument abwechselnd zu beiden Seiten der Trennungslinie zwei halbkreisförmige Bilder aufblitzen, in denen die Interferenzen erschienen. Bei größeren Umlaufgeschwindigkeiten des Apparates bot das Gesichtsfeld einen Anblick, wie er in Fig. 6 III dargestellt ist.

Ogleich diese Anordnung derjenigen eines Koinzidenz-telemeters ähnelt, kam bei diesen Messungen nicht das Koinzidenz-, sondern das Invertprinzip<sup>1)</sup> in Anwendung. Bei einer Drehung der Maschine um  $180^\circ$  erschien nämlich das zweite Interferenzbild ebenfalls um  $180^\circ$  zum ersten verdreht; da nun beide Bilder in den zwei Teilen des Beobachtungsapparates

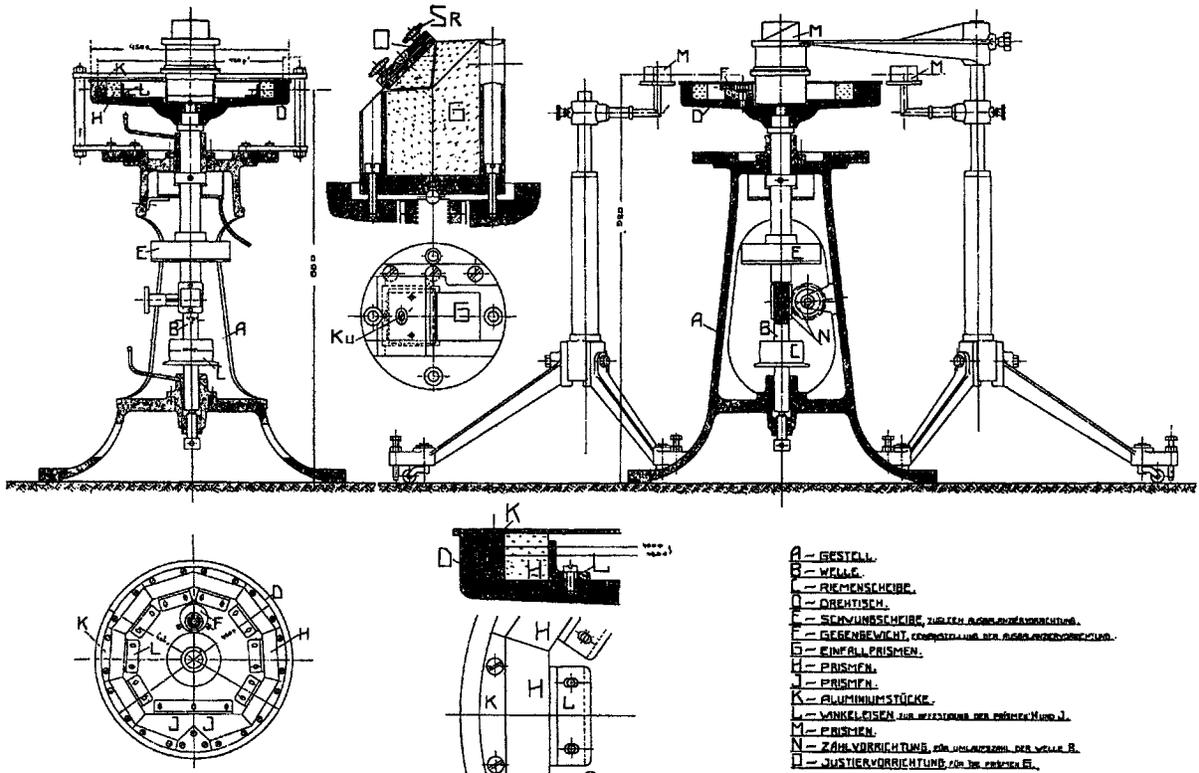
1) Eingetragenes Pat. Nr. 1462, Kl. 42. 1903.

je die gleiche Anzahl von Drehungen erfuhren, mußten sie sich schließlich im Koinzidenzprisma die gleichen Seiten zuwenden. Waren die Interferenzstreifen einander nicht parallel, so erschien demnach die eine Gesichtsfeldhälfte als Spiegelbild der andern, während bei parallelen Streifen auf den Unterschied zwischen Koinzidenz- und Invertanordnung nur aus den Bewegungen beider Hälften zu schließen war. Da man mit Hilfe der beiden Doveschen Prismen *D* beide Bilder getrennt beliebig verdrehen konnte, waren die Messungen der Streifenverschiebungen in verschiedenen Variationen möglich (beide Hälften sich gleichzeitig oder entgegengesetzt bewegend). Bei der Beobachtung der Interferenzen war noch darauf zu achten, daß der positive Kohlekrater der Bogenlampe stets in gleicher Höhe blieb, so daß die Siemens-Schuckertlampe, obgleich sie eigentlich mit festem Lichtpunkt brennen sollte, von Zeit zu Zeit etwas nachreguliert werden mußte. Etwaige Änderungen in der Beleuchtung konnten auch während photographischer Aufnahmen mit langer Expositionszeit (8—12 Min.) leicht kontrolliert werden, ohne daß am Apparat selbst etwas zu ändern war. Denn einmal waren durch Vorschlagen des Prismas *V* die Interferenzen zu beobachten, wodurch aber die Exposition unterbrochen werden mußte, dann aber boten die an den schrägen Flächen der Prismen *D* reflektierten Lichtbündel *U* ein bequemes Mittel, die Streifen auch während photographischer Aufnahmen zu sehen. Passend aufgestellte Lupen ließen also stets die richtige Stellung der Bogenlampe erkennen oder eventuell korrigieren.

§ 5. Der Rotationsapparat.  
(Tafel I und II.)

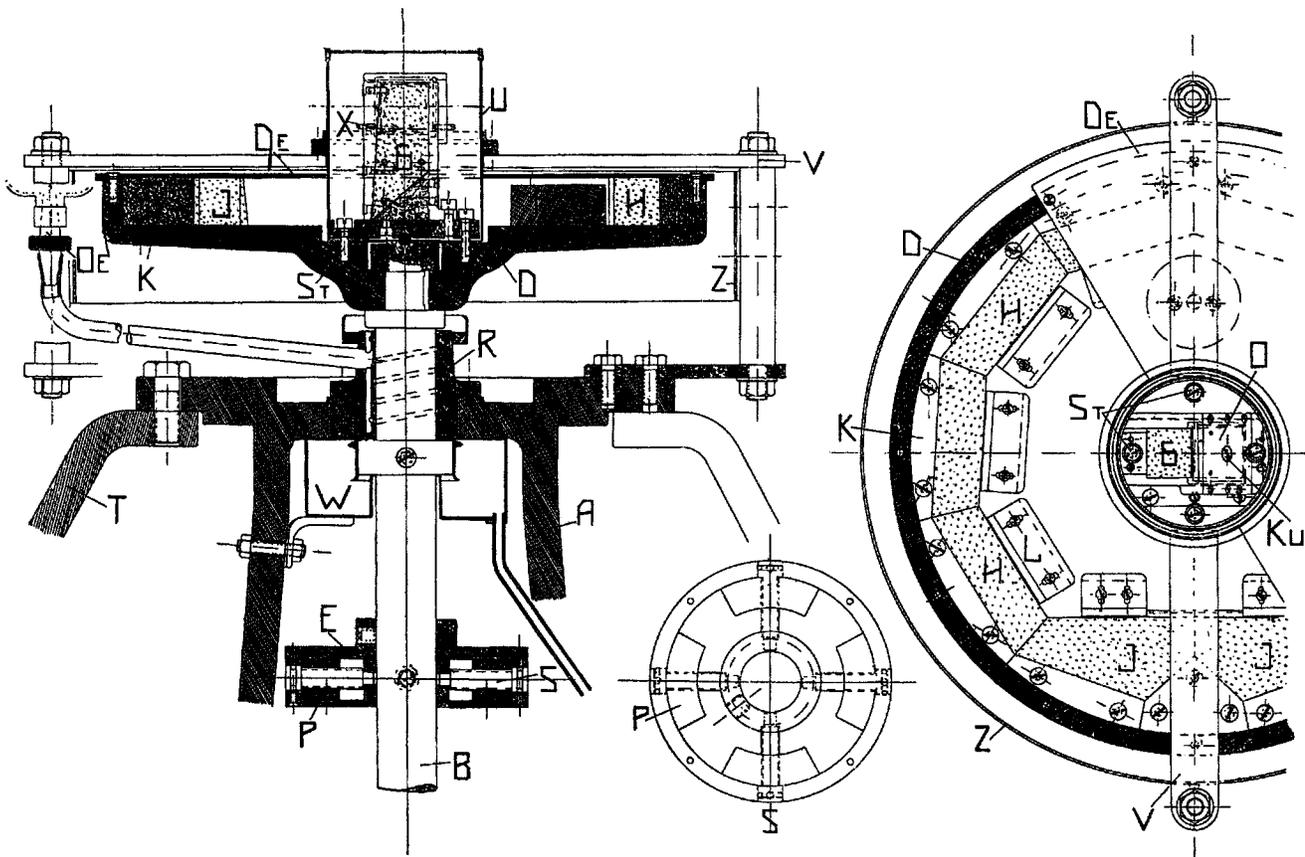
Alle mechanischen Teile des Apparates wurden ebenso wie die gesamte Optik in den Zeisswerken zu Jena ausgeführt. Die sachgemäße Konstruktion und Berechnung der Maschine hatte Herr M. Berger übernommen, dessen technische Ratschläge und ständige freundliche Unterstützung auch sonst der Untersuchung sehr zustatten kamen.

Bei der Konstruktion der Maschine war zunächst maßgebend, daß sie mit Sicherheit noch 3000 Touren pro Minute in beiden Umdrehungsrichtungen laufen sollte. Wegen des großen Gewichtes der rotierenden Teile und der damit verbundenen



- A - GESTELL.
- B - WELLE.
- C - RUMPSCHKEIBE.
- D - OBERFLÄCHE.
- E - SCHWUNGSCHIBE, ZURICH AUSGEGLEICHUNG.
- F - GEGENGEWICHT, COMPLETT UND MIT AUSGEGLEICHUNG.
- G - EINFALLPRISMEN.
- H - PRISMA.
- I - PRISMA.
- J - ALUMINIUMSTÜCKE.
- K - WINKELGLAS, AUS VERZICHTEN MIT PRISMA (Nur J).
- L - PRISMA.
- M - PRISMA.
- N - ZAHNVORRICHTUNG, ZUM VERSTÄRKEN DER WELLE B.
- O - JUSTIERVORRICHTUNG, ZUM BEARBEITEN E.

Tafel I. (Maßstab 1:16.)



Tafel II. (Maßstab 1:5.)

Gefahr ihres Zerspringens bei hohen Geschwindigkeiten wurde nur das beste Material verwandt und alle Teile völlig präzise gearbeitet. Die Achse wurde als vertikal laufend festgesetzt, weil einmal ein passendes Gußgestell für die Maschine vorhanden war, dann aber schien eine solche Anordnung auch noch Vorteile in bezug auf Stabilität der Achse während des Betriebs zu gewähren. Als Antrieb kam nur Riemenübertragung in Frage, da die direkte Kupplung der Maschine mit einem Vertikalmotor kompliziert geworden wäre und sich auch ein Motor mit genügender Regulierfähigkeit nicht in passender Form beschaffen ließ. Konstruktionseinzelheiten sind bei der Beschreibung der betreffenden Maschinenteile erwähnt oder aus den beiden Tafeln zu ersehen.

#### 1. Das Gestell A.

Dasselbe bestand aus Gußeisen und hatte eine Höhe von ca. 750 mm. Die obere und untere Seite waren plan gefräst. Der runde, breite Fuß (Durchmesser ca. 70 cm) besaß vier Löcher zum Befestigen der Maschine am Aufstellungsort. Da sich im Lauf der Versuche das Gestell als etwas zu schwach erwiesen hatte, wurde es nachträglich durch die beiden starken, schmiedeeisernen Stützen *T* versteift.

#### 2. Der Prismenbehälter D.

Als Material für diesen Behälter wurde Siemens-Martin-Stahl wegen der starken Zugbeanspruchung, welcher dieser Teil im Betrieb ausgesetzt war, gewählt. Aus einem Stahlblock wurde zunächst die rohe Form geschmiedet, um möglichsie Homogenität des Materials zu sichern, diese dann auf die Achse aufgesetzt und mit ihr gleichzeitig zwischen Spitzen abgedreht. Das fertige Stück hatte die Form eines Tellers mit überhöhtem Rande. Der äußere Durchmesser betrug 450 mm, die Wandstärke, welche außen zu 15 mm bemessen war, nahm nach innen allmählich zu. Der fertig abgedrehte Block wurde, ohne mit den nötigen Bohrungen für das Einsetzen der Optik versehen zu sein, zunächst allein in die Maschine eingesetzt und bei sehr hohen Tourenzahlen (ca. 3000 pro Minute) längere Zeit in Betrieb gehalten. Dabei zeigte sich, daß das Material außerordentlich homogen war, denn auch bei den größten Geschwindigkeiten waren am Gestell kaum merk-

liche Vibrationen zu verspüren. Wie eine leichte Überschlagsrechnung ergibt, müßte bei 3000 Touren pro Minute (70 m/s Umfangsgeschwindigkeit) ein Übergewicht von 1 g am Rand der Scheibe ( $r = 22,5$  cm) einen radialen Zug von 2,26 kg erzeugen. Nach diesen Vorversuchen erhielt der Behälter die nötigen Bohrungen für den Stahldeckel  $D_e$  (gleichmäßig auf dem Umfang verteilt) und für die Befestigung der Aluminiumstücke  $K$ , welche als Anlageflächen für die Glasprismen dienten. Der sehr genau passende Deckel besaß einen außen übergreifenden Rand und wurde zuerst aus 3 mm-Stahlblech hergestellt, welches sich aber schon bei den ersten Versuchen stark verwarf. Ein zweiter Deckel von 5 mm Stärke wurde dann aus einem starken Stahlstück durch sorgfältiges Abdrehen gewonnen, und ließ erst nach langem Gebrauche schwache Verziehungen erkennen.

Die Innenfläche des Stahlkörpers, welche als Auflagefläche für das Prismenpolygon dienen sollte, wurde zunächst sehr genau plan gedreht und dann die Aluminiumteile eingepaßt und verschraubt. Diese Stücke, deren Innenflächen ganz genau der äußeren Form des Prismenkranzes entsprechen mußten, waren ganz exakt hergestellt. Die Flächen, an welchen die Prismen angelegt werden sollten, wurden plan geschliffen, um ein Kippen einzelner Prismen unmöglich zu machen. Nach dem mühsamen Aufprobieren aller Einzelteile und dem Einsetzen des Glases zeigte es sich, daß die Prismen völlig unbeweglich saßen. Um jedes Verlagern des Polygons zu verhüten, wurden die Teilprismen  $J$  etwas nach innen gepreßt, indem zwischen die entsprechenden Aluminiumteile und den äußeren Rand dünne ( $\frac{1}{10}$  mm) Stahlbleche geschoben wurden. Der aufgeschraubte Deckel  $D_e$  verhütete ein Herausfliegen der Prismen nach oben. Da aber eine direkte Pressung der Prismen durch den Stahl gefährlich erschien, wurde der Prismenkranz mit mehreren Lagen Gummituch bedeckt und dann der Deckel so verschraubt, daß am Rande Metall auf Metall zu liegen kam. Einige Versuche bewiesen jedoch, daß diese Befestigung der Prismen noch nicht genügte. Deshalb wurden im Behälter noch die verschiebbar angeordneten Winkeleisenstücke  $L$  angebracht, welche gestatteten, die Glasprismen stark nach außen gegen ihre Anliegeflächen zu pressen. Als Zwischenlage zwischen

Glas und Eisen dienten dünne Filzscheiben. Jedes Prisma wurde mit Hilfe einer Schraubenzwinde stark gegen das Aluminium gepreßt und dann das Winkelstück festgeschraubt. Nach dieser Vorsichtsmaßregel zeigte das Polygon selbst bei hohen Tourenzahlen keine plötzlichen Verlagerungen mehr. Bei etwaigen starken Temperaturänderungen des Prismenbehälters war ein gefährlicher Druck auf das Polygon nicht zu befürchten, da die Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Stahl wenig verschieden sind (Stahl: 0,0000100, Glas: 0,0000090). Die stärkere Ausdehnung des Aluminiums (Ausd.-Koeff.: 0,0000216) kam wegen der Kleinheit der Stücke nicht in Frage. Eine Lockerung einzelner Teile trat im Laufe der Untersuchung nicht ein.

### 3. Das Mittelstück $G$ .

Die Fassung des Glaskörpers  $G$  bestand aus starken Rotgußteilen, welche auf eine 15 mm dicke Platte aus Siemens-Martinstahl geschraubt waren. Die Stahlplatte wurde durch vier versenkte Schrauben  $St$  mit dem rotierenden Teil verbunden, wobei aber das ganze Stück noch nach allen Seiten gekippt werden konnte, da es auf einer Stahlkugel zentrisch zur Rotationsachse ruhte. Um außer der Kippung auch eine kleine Drehung des Mittelstückes zu ermöglichen, waren die Schrauben  $St$  in kleine, halbkugelförmige Stahlschalen eingelassen. Das bewegliche Reflexionsprisma dieser Anordnung ließ sich in einer Art Kugelgelenk um die Schraube  $Ku$  drehen, welche das Prisma an dem starken Deckel  $D$  festhielt. Die Neigung des Prismas erfolgte von oben durch die drei klemmbaren Mikrometerschrauben  $Sr$ , die seitliche Verschiebung und Klemmung war durch die beiden Schrauben  $X$  ermöglicht. Da bei der Rotation der Maschine wegen der unrunder Form dieses Teiles ein starker Luftwirbel erzeugt wurde, überdeckte man das ganze Mittelstück mit einem ruhenden Zylinder aus Messingblech. Diese Haube reichte bis auf den Boden des Prismenbehälters und war für den Lichtdurchtritt mit den nötigen Fensteröffnungen versehen, die mit planen Glasscheiben verschlossen waren, damit die Luft im Apparat als Ganzes mit diesem rotierte. Die beiden rechteckigen Eisenstangen  $V$  hielten diesen Zylinder und waren selbst mit zwei starken Haltern am Gestell verschraubt. Die Halter dienten gleichzeitig zur Befestigung des Schutzringes  $Z$  aus Eisenblech,

welcher den Beobachter gegen das umherspritzende Öl und etwaige abfliegende Teilchen schützen sollte. Die Messinghaube bewährte sich übrigens bei großen Tourenzahlen nicht; denn durch die starke Luftbewegung und Vibrationen der Maschine kam sie bald in solche Schwingungen, daß sie am rotierenden Teil anstieß und ihre Zertrümmerung befürchtet werden mußte. Sie wurde daher bei späteren Versuchen weggelassen und das Mittelstück durch aufgesteckte Papphülsen möglichst abgerundet. Dabei zeigte sich keinerlei Zunahme der Bildunruhe, eher eine Besserung.

#### 4. Welle und Lager.

Die Achse *B* des Apparates war ihrer starken Beanspruchung wegen aus Siemens-Martinstahl hergestellt und von oben nach unten etwas verjüngt. Die Lager *R* bestanden aus Rotguß und waren in einem Abstand von 45 cm in das Gestell eingelassen. Das ganze Gewicht des rotierenden Teiles ruhte auf einer in der Welle versenkten, polierten Stahlkugel, welche im unteren Lager auf einer glasharten Stahlplatte rotieren konnte. Da die Maschine nach beiden Richtungen laufen sollte, waren in beide Lager doppelte Spiralwindungen zur Ölung eingeschnitten. Infolge des starken Ölverbrauchs mußten Ölfänger und der Abspritzungsring *W* angebracht werden, um ein Umherspritzen des Öles im Beobachtungsraume zu verhüten. Trotz ihrer sehr starken Beanspruchung bei hohen Tourenzahlen blieben beide Lager stets ziemlich kühl, wie das folgende Täfelchen zeigt. Die hier angeführten Temperaturen wurden während eines fast zwölfstündigen, ununterbrochenen Betriebs der Maschine in Abständen von ungefähr einer Stunde gemessen, wobei als Lagertemperatur die Temperatur des Öles angesehen wurde, welches sich auf dem Lager im Ölfänger sammelte. Die vorliegenden Messungen sind am oberen Lager ausgeführt worden.

Zeit (vorm.)	Temperatur	Zeit (nachm.)	Temperatur
7 Uhr — Min.	Anfang	1 Uhr 15 Min.	24,9°
7 " 43 "	23,5°	2 " 40 "	24,7°
8 " 50 "	23,2°	3 " 4 " "	26,3°
9 " 43 "	26,6°	4 " 25 "	26,3°
10 " 44 "	24,2°	5 " 8 "	29,0°
11 " 37 "	25,1°	6 " 6 "	26,0°
— " — "	—	6 " 55 "	26,1°

Die Zimmertemperatur am Lager betrug durchschnittlich  $20,0^{\circ}$ , Bewegungsrichtung und Tourenzahl (bis ca. 1000) variierten. Die Tabelle ist ein Zeichen für den tadellosen Zustand der Welle und der Lager.

Auf der Achse saßen noch zwischen den Lagern die Riemenscheibe *C* und das Balanciergewicht *E*. Die Riemenscheibe war möglichst nahe am unteren Lager befestigt worden, damit Stöße im Antrieb hauptsächlich vom Gestell aufgenommen wurden.

#### 5. Balanciersversuche (Balanciergewicht *E*).

Die Hauptbedingung für ruhiges Laufen der Maschine war in der Vollkommenheit der Ausbalancierung des rotierenden Teiles gegeben, denn wie schon gezeigt wurde, erzeugten selbst minimale Übergewichte auf einer Seite der Achse bei einigermaßen großen Tourenzahlen ganz enorme Zugkräfte.

Zunächst wurden alle Teile für sich möglichst ausgeglichen und dann die fertig zusammengestellte Maschine als Ganzes ausbalanciert. Das schwere Mittelstück ließ man auf einer polierten, genau horizontalen Fläche rollen. Die hierbei sich zeigenden Ungleichheiten wurden durch Aufsetzen von Stahl- und Bleistücken möglichst beseitigt. Im Prismenbehälter wurde der durch die beiden schweren Prismen *J*, *J* erzeugte Massenüberschuß auf der gegenüberliegenden Seite durch das Stahlstück *F* kompensiert. Der gebrauchsfertig zusammengesetzte und roh justierte rotierende Teil wurde dann zwischen zwei Paar Friktionsräder gelegt, die ihrerseits in Kugellagern liefen, und weiter ausbalanciert. Durch Anbohren der Fassung wurde so der noch merkbare Massenüberschuß beseitigt. Diese Methode erwies sich jedoch noch als zu roh, da die Reibung der Friktionsräder wegen der großen Last des Stahlstückes zu groß war. Nach mehrfachen, verschiedenen Versuchen fand man, daß sich größere Genauigkeit erzielen ließ, wenn die Welle auf zwei gut plane, polierte Spiegelglasstücke gelegt wurde und der Apparat pendelte. Auf diese Weise konnte noch leicht 1 g Übergewicht auf einer Seite der Achse nachgewiesen werden. Nach peinlichster Sorgfalt in der Ausbalancierung und Einsetzen der Achse in das Gestell ergab sich jedoch, daß die genannten Methoden nicht genügend genau waren. Deshalb wurde auf die Welle das Balanciergewicht *E*

aufgesetzt. Dieses bestand aus einem völlig geschlossenen Stahlkörper  $E$ , in welchen sich von außen durch die Schrauben  $S$  der Abstand der vier ca. 200 g schweren Gewichte  $P$  von der Achse um ungefähr 16 mm getrennt ändern ließ. Dadurch war es möglich, den Schwerpunkt des ganzen Systems in gewissen Grenzen zu verlegen. Jetzt wurde nun durch einfaches Probieren diejenige Stellung der Gewichte gesucht, bei welcher die Maschine am ruhigsten lief. Einen gewissen Anhalt, nach welcher Seite der Prismenbehälter schlug, gewährte dabei die Benutzung eines feinen Fühlhebels. Auf diese Weise war es möglich, selbst bei 1500—2000 Touren p. Min. noch ein gutes Bild der Interferenzen zu erhalten, bei höherer Tourenzahl verschwanden die Bilder wegen Verziehung des Apparates. Die Maximalgrenze, bis zu welcher man in der Geschwindigkeit der Maschine gehen konnte, sank allerdings im Laufe der Untersuchung immer tiefer, so daß schließlich die Interferenzen schon bei 1000 Touren unscharf wurden.

#### 6. Das Zählwerk $N$ .

Zur Messung der Tourenzahl der Maschine war in die Welle  $B$  ein starkes Gewinde von 5 mm Steighöhe eingeschnitten, in welches ein Schneckenrad mit horizontaler Achse eingriff. Auf dieser saß ein Kontaktrad aus Hartgummi, welches bei jeder Umdrehung des Zahnrades einen Stromkreis schloß. Das Übersetzungsverhältnis zwischen Welle und Kontaktrad betrug 1:50 und war so gewählt, daß die Tourenzahl der Maschine bis auf höchstens 1% Fehler bestimmt werden konnte. Diese Kontakte ließ man auf den hinteren Hebel des Chronographen der Univ.-Sternwarte registrieren, während die Sternzeituhr auf dem vorderen Signalhebel Sekundenpunkte markierte. Bei dieser Einrichtung konnte noch 0,01 Sekunde mit Sicherheit abgelesen werden, so daß bei Zeitdifferenzen auch nur ein Fehler von 0,01 Sekunde zu befürchten war. Da bei den Versuchen eine Sternzeituhr benutzt wurde, waren alle Beobachtungen der Tourenzahlen auf mittlere Zeit zu reduzieren, was nach der bekannten Beziehung erfolgte:

$$\text{eine Sek. St. Z.} = 0,99727 \text{ Sek. M. Z.}$$

Das folgende Täfelchen läßt die bei dieser Einrichtung erreichte Genauigkeit erkennen. Dabei bedeutet  $A$  die Anzahl

Sternzeitsekunden zwischen zwei Kontakten der Schnecke (= 50 Touren der Maschine).

A in St. Z.	Max. Fehler in s. St. Z.	Max. Fehler in ‰	Touren p. Min St. Z.	Red. auf M. Z.	Abs. Fehler in Touren p. Min.
30,0	± 0,01	± 0,03	100	+ 0,27	± 0,03
6,0	1	0,17	500	1,37	0,83
3,0	1	0,33	1000	2,74	3,33
1,5	1	0,67	2000	5,48	13,33
1,0	1	1,00	3000	8,22	30,00

Wie man sieht, war die Genauigkeit für alle vorkommende Fälle völlig ausreichend. Ungleichförmigkeiten im Gange der Maschine während eines Umlaufes der Kontaktscheibe ließen sich hierbei zwar nicht erkennen, sie waren aber wegen der großen Schwungmasse überhaupt kaum zu befürchten.

#### 7. Der Antrieb.

Bei den ersten Probeversuchen mit der Maschine in der Werkstatt wurde ein  $\frac{1}{2}$  PS.-Drehstrommotor mit horizontaler Achse benutzt. Der Motor zog aber zu schnell an, was für die Justierung hätte schädlich sein können, und brachte die Tourenzahl höchstens bis 2700 Touren p. Min. Deshalb wurde er durch einen Gleichstrommotor von  $\frac{1}{4}$  PS. mit vertikaler Achse und Tourenregulier im Verhältnis 1 : 12 bei gleichbleibender Zugkraft ersetzt. Der Antrieb war jetzt sehr günstig, der Motor aber viel zu schwach. Nach mannigfachen Versuchen zeigte sich ein 5 PS.-Gleichstrommotor (110 V.) älteren Modells von Siemens-Schuckert am geeignetsten. Durch regulierbare Widerstände im Haupt- und Nebenstrom gelang es, die Tourenzahl der Maschine beliebig von ca. 70 Touren p. Min. bis über 3500 zu bringen. Der Betrieb war zwar wenig rationell, hatte aber den Vorteil, daß alle Stöße im Anlauf verschwunden waren. Der Motor lief ohne Veränderung der Bürstenstellung nach beiden Seiten gleich gut. Seine Achse lag horizontal und war ungefähr 2 m von der Maschine entfernt. Die Übertragung geschah durch einen gekreuzten und geleiteten Riemen.

### 8. Die Aufstellung.

Die ganze Einrichtung fand Aufstellung in einem Keller-  
raume der Univ.-Sternwarte zu Jena. Die Maschine wurde  
mittels vier starker Schrauben in den Zementboden des Raumes  
eingelassen und der Fuß mit Zement ausgegossen. Bei der  
Aufstellung wurde darauf geachtet, daß die Achse genau  
vertikal stand, um gyroskopische Wirkungen des rotierenden  
Teiles zu verhindern.

### § 6. Versuche zur Erzeugung monochromatischer Interferenz- streifen.

Wie schon mehrfach erwähnt, zeigte sich die Siedentopf-  
sche Hg-Lampe für diese Versuche als viel zu lichtschwach.  
Die sehr hell leuchtenden Metalldampflampen aus Quarz (Cd-  
Amalgamlampe<sup>1)</sup> wären voraussichtlich ausreichend gewesen,  
konnten aber nicht probiert werden, da keine zu beschaffen  
war. Um dafür einen Ersatz zu schaffen, wurden zunächst  
reine Metallstäbe im Lichtbogen verdampft. Die Beobachtungs-  
einrichtung (Fig. 6 II) war dabei so getroffen, daß das Licht  
erst nach seinem Durchgang durch den ganzen Apparat spek-  
troskopisch zerlegt wurde, so daß eine Reihe monochromatischer  
Interferenzbilder entstanden (Methode der Sonnenaufnahmen  
in monochromatischem Lichte mit Hilfe des Spektroheliographen).  
Das reelle Interferenzbild im Koinzidenzprisma  $S$  wurde dabei  
durch ein Objektiv von geeigneter Öffnung stark verkleinert  
auf den vertikal stehenden Spalt eines Spektralapparates  $Sp$   
so projiziert, daß zunächst die Interferenzstreifen parallel zum  
Spalt, die Trennungslinie der beiden Gesichtsfeldhälften also  
senkrecht dazu standen. Bei Benutzung des Emissionslichtes  
von glühendem Metalldampf mußte dann im Spektroskop eine  
Reihe von monochromatischen Spaltbildern entstehen, in denen  
die Interferenzstreifen sichtbar waren. Damit aber außer der  
Meßmarke des Koinzidenzprismas noch eine genügende Anzahl  
von Interferenzstreifen in die Spaltöffnung zu liegen kam,  
mußte dieser ziemlich weit geöffnet werden (ca. 0,4—0,8 mm).  
Die Dispersion des Spektrographen war deshalb sehr hoch zu  
wählen, um die einzelnen Spaltbilder nicht aufeinander fallen

1) Zeitschr. f. Instrumentenkunde 21. S. 201. 1901; 24. S. 296. 1904.

zu lassen. Dadurch wurde auch der Vorteil erreicht, daß das Nebenlicht sehr geschwächt war, so daß sich die monochromatischen Spaltbilder, welche durch die Prismen des Apparates auch etwas an Helligkeit einbüßten, ziemlich hell aus dem schwachen kontinuierlichen Spektrum hervorhoben. Zur Zerlegung des Lichtes kamen bei diesen Versuchen ein photographisches Gitter, zwei große Flintglasprismen und ein Flüssigkeitsprisma nach Königsberger einzeln oder in Kombinationen in Anwendung. Von den untersuchten Metallen gaben Eisen und Kupfer den günstigsten Lichtbogen, auch Messing brannte sehr gut. Bei einer Stromstärke von 10—15 Amp. und Stäben von 10—15 mm Durchmesser gab Fe ein sehr helles, weißes Licht, dessen Spektrum aber zu linienreich war, so daß auch bei stärkster Dispersion die einzelnen Spaltbilder nicht mehr weit genug getrennt werden konnten. Kupfer brannte bei größerem Stabdurchmesser (20 mm) ebenfalls sehr ruhig, das Spektrum war linienärmer und günstiger wie das vorige, da die hellen Linien in Grün und Rot genügend weit auseinander lagen. Zink lieferte sehr schönes helles Licht, schmolz aber bei einigermaßen großen Stromstärken sofort ab und entwickelte sehr dicke, weiße Dämpfe. Messing oder Messing und Kupfer vertrugen eine größere Stromstärke und erzeugten einen ziemlich ruhigen Lichtbogen. Die größte Ruhe des Bogens wurde jedoch erzielt, wenn als positive Elektrode das Metall verwandt wurde, während der negative Pol aus Homogenkohle bestand. In allen Fällen wurde jedoch der Bogen sofort unruhig, zischte und rotierte, sobald das Metall weißglühend war. Versuche, den Lichtbogen zur Kühlung der Elektroden unter Flüssigkeit zu erzeugen, gelangen nicht. Bei derartigen Spektralaufnahmen der Interferenzbilder waren Expositionszeiten von 5—10 Min. erforderlich, wenn die Maschine in Betrieb war. Um scharfe Bilder zu erzielen, war aber während der Exposition größtmögliche Ruhe des Lichtes unbedingt erforderlich. Diese konnte aber auch bei ständiger Regulierung der Lampe (Handregulierlampe) nie in genügender Weise erreicht werden. Mit dem ungleichmäßigen Brennen des Bogens, welches auch bei Benutzung von Magneten und Drosselspulen nicht besser wurde, waren naturgemäß starke Spannungsschwankungen an den Elektroden verknüpft, welche sich ins Leitungsnetz aus-

breiteten, so daß auch die Tourenzahl des Motors, der von derselben Leitung gespeist wurde, ständig schwankte. Die Aufnahmen mit dieser Anordnung hatten deshalb nicht den gewünschten Erfolg.

Als Ersatz für die reinen Metallelektroden dienten nun später Kohlestäbe mit Füllungen aus verschiedenen Metallsalzen, wobei nur das vom Bogen emittierte Licht benutzt und das direkte Kraterlicht durch passende Blenden zurückgehalten wurde. Die sogenannten Spektralkohlen von Siemens erwiesen sich hierbei als unzuweckmäßig, sie brannten ziemlich unruhig und zu rasch ab. Kohlestäbe mit Leuchtzusätzen, teilweise mit Metalladern, wie sie in der Beleuchtungstechnik (Effektkohlen) Verwendung finden, gaben zwar einen sehr hellen und ruhigen Bogen, besaßen aber zu viel Beimengungen, so daß die Spektren zu linienreich waren. Deshalb wurden von der Firma Gebr. Siemens auf besonderen Wunsch Kohlen mit chemisch-reinen Salzen der Metalle Cu, Zn, Cd und Ca als Füllungen hergestellt. Diese waren für den vorliegenden Zweck geeigneter als die anderen Kohlestäbe, bei ihnen trat aber das Nebenlicht neben dem Emissionslicht der Metaldämpfe sehr stark hervor. Bei größeren Stromstärken erschienen die Emissionsspektren stärker, dann aber brannte der Bogen sehr unruhig, und die Füllungen waren in kurzer Zeit verflüchtigt. Die spektrographischen Aufnahmen ließen sich jedenfalls auch hier nicht mit der nötigen Präzision ausführen. Ebenso konnte eine direkte, visuelle Ausmessung der Interferenzen wegen der Beaufsichtigung, welche Motor und Bogenlampe ständig erforderten, nicht durchgeführt werden. Die Versuche in dieser Richtung wurden daher abgebrochen und eine Anordnung gewählt, bei welcher Lichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum benutzt werden konnten.

Die Interferenzstreifen wurden nun so gedreht, daß sie parallel zur Trennungslinie im Koinzidenzprisma waren, also senkrecht zum Spalt des Spektrographen lagen. Im Spektrum erschienen die Interferenzen ebenfalls in einfarbigem Lichte, wie bei der anderen Anordnung, aber parallel zur Längsausdehnung des Spektrums. Sie zogen sich, vom roten nach dem violetten Ende schwach konvergierend, durch alle Farben, wobei die Trennungslinie der beiden Gesichtsfeldhälften als

scharfer, schwarzer Strich erschien. Als Lichtquelle fanden gewöhnliche Bogenlampenkohlen Verwendung. Um die Streifen möglichst scharf zu erhalten, war Bedingung, daß diese einmal genau senkrecht zum Spalt standen und daß dieser ziemlich eng gemacht wurde, womit allerdings eine erhebliche Lichtschwächung verbunden war. Die Unruhe der Lichtquelle war damit behoben, denn die selbstregulierende Projektionslampe konnte oft stundenlang in Betrieb sein, ohne häufiges Nachregulieren zu erfordern; jedoch war das kontinuierliche Spektrum für Ausmessung der Streifen bei rotierendem Apparat zu lichtschwach. Die photographischen Aufnahmen der Interferenzen gelangen bei ruhender Maschine recht gut, war diese jedoch im Betrieb, so mußte eine ca. 600 mal längere Expositionszeit wie in Ruhe gewählt werden, um genügende Bilder zu erhalten. Während dieser langen Zeit (8—10 Min.) konnte nun die Tourenzahl der Maschine nicht genügend konstant gehalten werden. Tagsüber wechselte die Spannung im Leitungsnetz, an welches der Motor angeschlossen war, ziemlich stark, auch mag die Bogenlampe, die in der Leitung lag, Schwankungen verursacht haben, aber auch nachts, wenn die größte Ruhe im Leitungsnetz erwartet werden konnte, zeigte sich keine genügende Konstanz in der Tourenzahl der Maschine, um ganz scharfe Aufnahmen zu erhalten. Da auch langes Einlaufen der Maschine vor den Versuchen und starke Belastung des Motors durch gleichzeitigen Antrieb eines kurzgeschlossenen, zweiten Motors nicht mit genügendem Erfolg wirkten, wurden diese Versuche aufgegeben und auf vollkommen monochromatische Interferenzstreifen verzichtet.

Hierbei mag noch erwähnt werden, daß sich bei den zahlreichen Spektralaufnahmen unter den probierten Plattensorten folgende sehr gut für den jeweils beigesetzten Spektralbereich bewährten:

1. Viridin-Inaloplaten (anti-halo orthochrom.) von Schleussner (ganzes Spektrum);
2. Prozeß Panchromatik Pl. von Wratten und Wainwright (hochempfindlich für Rot);
3. Kranzplatte I von Kranseder & Cie., München (grün);
4. Perortoplaten von Otto Perutz, München (grün).

§ 7. Das endgültige Meß- und Aufnahmeverfahren.

Da die Versuche zur Herstellung von monochromatischem Lichte an den geringen dabei erreichbaren Helligkeiten scheiterten, wurden die definitiven Messungen unter Zuhilfenahme von Filtern aus gefärbten Gläsern ausgeführt. Diese Lichtfilter ließen zwar noch ziemlich große Wellenlängenkomplexe durch, absorbierten aber doch ca. 50 Proz. der auffallenden Lichtmenge, so daß die Helligkeit der Interferenzen sowohl für photographische Aufnahmen als auch visuelle Messungen bei verdunkeltem Beobachtungsraume gerade noch ausreichte. Versuche, die durchgelassenen Wellenlängengebiete durch größere Glasdicken oder Kombinationen von Filtern einzuengen, waren bei der damit verbundenen, starken Absorption ohne Erfolge geblieben. Die Streifen erschienen aber auch bei den einfachen Filtern sehr scharf und schwarz, nur bei Benutzung von grünem Lichte zeigten sich schwach farbige Ränder, welche sich aber als nicht störend erwiesen. Da die Filter aus ausgesuchten, beiderseitig planpolierten Glasscheiben bestanden, konnten sie, ohne daß eine Bildverschlechterung eintrat, zwischen Koinzidenzprisma und Beobachtungsinstrument gesetzt werden, teilweise befanden sie sich allerdings auch direkt hinter der Bogenlampe.

Bei den Versuchen, welche für die Herleitung des Resultates Verwendung fanden, wurden folgende zwei Gläser benutzt.

Nr.	Farbe	Dicke	Durchlässig für $\lambda = \mu\mu$	Mittel $\mu\mu$	Schwach sichtbar
1	rot	1,7 mm	608—640	624	grün
2	hellgrün	2,4 „	510—560	535	rot

Die Durchlässigkeit der Filter wurde mit Hilfe eines Taschenspektroskopes mit Wellenlängenskala bestimmt.

Die photographischen Aufnahmen wurden mit einer Spektrometerkamera mit verschiebbarer Platte *P* (Fig. 6) ausgeführt, wobei zwischen Koinzidenzprisma *S* und Kameraobjektiv (relat. Öffnung: 1:5,  $f = 300$  mm) das Reflexionsprisma *K* zur Knickung der Strahlen wegen Raummangels und das Fernrohrobjektiv *N* aufgestellt waren, um bei einer Vergrößerung des Interferenzbildes auf das Sechsfache, die Balglänge nicht zu groß werden

zu lassen. Bei dieser Anordnung betragen die Expositionszeiten ca. 0,5 Sek., wenn der Apparat nicht rotierte, war aber die Maschine in Betrieb, so war die 600—800mal größere Zeit (für verschiedene Farben etwas verschieden) nötig, um brauchbare Negative zu erhalten. Nimmt man an, daß für die Exposition einer photographischen Platte nur die gesamte auftreffende Lichtmenge, ohne Rücksicht auf deren Dauer und Stärke, in Frage kommt, so ist die Belichtungsdauer bei rotierendem Apparat durch die Summe der Blitze bei jeder Umdrehung gegeben. Läuft die Maschine demnach  $m$  Touren pro Minute, so ist die Dauer eines einmaligen Aufleuchtens der Interferenzen in Sekunden:

$$t = \frac{60}{m \cdot 720},$$

wenn man den Prismenkranz um  $0,5^\circ$  bis zum völligen Verschwinden, von deren Erscheinen an gerechnet, verdrehen muß, wobei während der Drehung immer gleiche Helligkeit des Bildes angenommen wird. Damit nun die Belichtungszeiten bei rotierendem und ruhendem Apparat gleich werden, muß folgende Gleichung gelten, in welcher  $a$  (in Minuten) die Expositionszeit bei rotierendem Apparat bedeutet:

$$a m t = \frac{60 m a}{720 m} = 0,5,$$

oder  $a = 6$  Min.

Diese Betrachtung gilt selbstverständlich nur für Umlaufgeschwindigkeiten, bei denen die Dauer einer Umdrehung kleiner als 6 Min. ist, denn im andern Falle wäre es möglich, daß innerhalb 6 Min. gar kein Licht zur Platte gelangen könnte. Der berechnete Wert stimmt innerhalb gewisser Grenzen mit der experimentell bestimmten Belichtungsdauer überein, welche im Durchschnitt 5 bis 7 Min. betrug. Die zweite Folge aus obiger Überlegung, die Unabhängigkeit der Belichtungsdauer von der Tourenzahl, war aber anscheinend nicht erfüllt, denn bei hohen Umlaufgeschwindigkeiten der Maschine mußten die Platten oft mehr als 15 Min. belichtet werden, ehe sich überhaupt ein Schimmer der Interferenzen zeigte. Diese Erscheinung könnte vielleicht durch eine Art Reizschwelle für die Platten erklärt

werden, indem diese bei genügend kurzen und sehr schwachen Lichtblitzen (Dauer =  $\frac{1}{12000}$  Sek. bei 1000 Touren pro Minute) an Empfindlichkeit verlieren.

Für jede Farbe wurde Fokussierung und Expositionsdauer durch Probeaufnahmen bestimmt. Zur visuellen Beobachtung der Streifenverschiebungen kam ein sog. Kometensucher der Universitätssternwarte nach Vorsetzen eines passenden Objektivs in Verwendung. Hierbei wurde ein Koinzidenzprisma mit vertikaler Trennungslinie, des größeren Gesichtsfeldes wegen, benutzt.

Für die direkte Ausmessung der Interferenzen war der Kometensucher mit einem Schraubenmikrometer versehen, welches gestattete, das Ferrohrbild in Millimetern auszuwerten (Vergr. ca. 25). Die Aufstellung des an sich sehr schweren Instrumentes war auf dem Steinboden des Beobachtungsraumes hinreichend stabil.

Die Tourenzählvorrichtung arbeitete vollkommen selbsttätig und bedurfte keiner Überwachung. Signale, welche mit Hilfe eines besonderen Tasters gleichzeitig mit den Maschinenzeichen auf den Chronographen registriert wurden, gestatteten, neben der Tourenzahl Zeit und Dauer jeder Exposition oder Einstellung genau zu ermitteln, so daß diesbezügliche Notizen während der Beobachtung fortfielen. Ein im Beobachtungsraum angebrachtes Relais ließ stets erkennen, ob diese Vorrichtung ordnungsgemäß funktionierte.

Die Zimmertemperatur wurde mittels mehrerer im Versuchsraume verteilter Thermometer überwacht, ein Ventilator sorgte stets für möglichste Verteilung der durch die Bogenlampe und die Widerstände erzeugten Wärme. Ebenso maß man in regelmäßigen Abständen die Temperaturen der Lager und des Innern des Prismenbehälters.

Bogenlampe und Motor arbeiteten meist derart ruhig, daß ein Nachregulieren während einer Aufnahme oder Messung selten nötig war.

Zur Bestimmung der Breite und Verschiebung der Interferenzstreifen wurde sowohl bei der Ausmessung von Platten als auch bei visuellen Messungen ein Verfahren angewandt,

welches Hr. Pulfrich<sup>1)</sup> in seiner Abhandlung über das Abbe-Fizeausche Dilatometer empfiehlt.

Sind nämlich  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$  die Mikrometerablesungen bei den Einstellungen der Meßmarke auf fünf nebeneinanderliegende Streifen, so sind, äquidistante Streifen vorausgesetzt, die Streifenbreite  $b$  in Mikrometerteilen und die Lage  $l_s$  des mittelsten Streifens gegeben durch die Gleichungen:

$$b = \frac{1}{6} (l_5 + l_4 - (l_2 + l_1)), \quad 2)$$

$$l_s = \frac{1}{6} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5).$$

Zur Ausmessung der photographischen Platten wurde ein Komparator von C. Zeiß benutzt, welcher die gemessenen Längen von einer Nickelstahlskala abzulesen gestattete. Direkt konnten am Kopf der Mikrometerschraube noch 0,001 mm abgelesen werden, 0,0001 mm waren mit Sicherheit zu schätzen. Als Meßmarke diente ein Doppelfaden von passender Weite, welcher sich für Interferenzmessungen als sehr geeignet zeigte. Die Vergrößerung des Meßmikroskopes ließ sich variieren, so daß für jede Streifenbreite die günstigsten Verhältnisse leicht eingestellt werden konnten.

Für direkte, visuelle Messungen am Apparat fand ein Fernrohr mit gutem Schraubenmikrometer Verwendung.

Die Teilfehler der Nickelstahlskala des Komparators und die Fehler der Mikrometerschrauben wurden nicht näher untersucht, nachdem eine Reihe von Einstellungen auf Probeobjekte ergeben hatte, daß an allen benutzten Stellen die Teil- und Schraubenfehler sicher kleiner waren als die Einstellsicherheit. Etwaige zufällige Teilungsfehler wurden bei den definitiven Messungen dadurch eliminiert, daß bei der Repetition von Messungen immer andere Bereiche der Skala und der Schrauben in Benutzung kamen.

Bei genügend breiten und scharfen Interferenzen, wie man sie bei Benutzung von Filtern stets erhalten konnte, war es möglich, sowohl Breite als Lage der Streifen bis auf  $\frac{1}{100} b$  genau zu bestimmen. Die Streifenverschiebungen betrug aber nur 0,1 bis 0,2  $b$ , so daß bei der erwähnten Meßgenauigkeit die

1) K. Pulfrich, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 23. S. 411—413. 1893.

2) Vgl. die Bemerkung zu dieser Formel auf S. 408.

Werte der Verschiebungen bis zu 10<sup>0</sup>/<sub>0</sub> ihres Betrags gefälscht werden konnten. Durch mehrfache Wiederholungen der Messungen ließen sich diese Fehlergrenzen nur unwesentlich einengen. Auch konnte die Breite der Interferenzen nicht zu groß genommen werden, da einmal mit der Breite die Einstellsicherheit abnimmt, dann aber erschienen auch stark verbreiterte Streifen im Apparat nicht mehr gerade, sondern hyperbelartig gebogen.

Zu diesen Einstellfehlern addierten sich noch etwaige Fehler, die durch die Ungleichförmigkeit in der Tourenzahl der Maschine entstanden. Die Messung der Tourenzahlen selbst war, wie schon gezeigt wurde, genauer als für die vorliegenden Zwecke nötig war. Die Geschwindigkeit der Maschine blieb meist während einer Beobachtung hinreichend konstant, wenn sie vorher lange genug eingelaufen war (5—10 Min.). Die Schwankungen in der Tourenzahl konnten nachträglich sehr leicht aus den Chronographenregistrierungen erkannt werden. Geschwindigkeitsänderungen bis zu höchstens 1<sup>0</sup>/<sub>0</sub> der Tourenzahl wurden bei der Berechnung noch zugelassen, Messungen bei stärkeren Geschwindigkeitsänderungen wurden ausgeschlossen.

Die Lage des Streifensystems bei ruhender Maschine heiße Nullpunkts- oder Ruhelage. Um über die Bewegung dieser Nullpunktslage, hervorgerufen durch Temperaturänderungen im Glase, Verlagerung von Prismen, Nachgeben von Schrauben, elastische Verziehungen usw., stets genau orientiert zu sein, wurden nach je einigen Messungen bei bewegter Maschine zwei bis drei Nullpunktsbestimmungen ausgeführt. Ferner ließ man den Apparat nach jeder Ruhelage in der entgegengesetzten Richtung wie vorher laufen, um zu sehen, ob die Streifenverschiebungen auch entgegengesetzt gleich ausfielen, was als sicheres Kriterium dafür anzusehen war, daß im Apparat keine Verziehungen aufgetreten waren.

Die folgenden Tabellen lassen das zur Bestimmung der Breitenverschiebung angewandte Verfahren erkennen.

Nachdem bei ruhendem Apparat durch Einstellung auf fünf nebeneinander liegende Streifen die Lage des Nullpunktes und die Streifenbreite erhalten war, wurde der Apparat in

Rotation versetzt und die Einstellung jener fünf Streifen verschiedene Male, im vorliegenden Fall fünfmal, wiederholt. Für die Zeiten dieser Messungen geben in Spalte 2 die  $x$  die zu 50 Touren der Maschine nötigen Sternzeitsekunden an und hieraus lassen sich ohne weiteres die in Spalte 3 angegebenen Tourenzahlen p. Min. ableiten. Spalte 4 und 5 geben die aus jenen Einstellungen gefundenen Streifenbreiten  $b$  und Streifenlagen  $l_s$ . Unter  $l_0$  sind die für die Zeiten der Messungen bei bewegtem Apparat interpolierten Nullpunktstellungen angeführt.  $l_0 - l_s$  sind dann die in Mikrometerteilen ausgedrückten Verschiebungen  $\delta_g$  oder  $\delta_m$ , je nachdem die Rotation gegen oder mit dem Uhrzeiger erfolgt war. Die Verschiebungen  $\delta_m$  sind hierauf durch Interpolation in die Werte übergeführt worden, welche beobachtet worden wären, wenn die Messungen bei denselben Rotationsgeschwindigkeiten des Apparates angestellt worden wären wie die Messungen der  $\delta_g$ . Die hierbei sich zeigende Verschiedenheit der bei entgegengesetzt gleichen Umdrehungsgeschwindigkeiten gefundenen Werte  $\delta_g$  und  $\delta_m$  ist zum Teil den Messungsfehlern, zum andern Teil aber jedenfalls der Verziehung des Polygons infolge der Rotation zuzuschreiben. Ein systematisches Überwiegen nach einer Seite konnte jedoch nicht konstatiert werden. Wurden die Abweichungen größer als 6—7%, so wurde eine neue Justierung des Apparates vorgenommen und die Beobachtungen fanden keine Verwendung. Das Mittel  $\delta$  der ohne Rücksicht auf das Vorzeichen genommenen Verschiebungen  $\delta_g$  und  $\delta_m$  war als die der betreffenden Rotationsgeschwindigkeit des Apparates zugehörige Streifenverschiebung anzusehen.

1. Nullpunkt: 4,395<sup>P</sup>;  $b = 1,170^P$ .

2. Drehung gegen den Uhrzeiger.

Nr.	$x$	Touren p. Min.	$b$	$l_s$	$l_0$	$\delta_g$
1	6,35	472,6	1,173 <sup>P</sup>	4,501 <sup>P</sup>	4,395 <sup>P</sup>	— 0,106 <sup>P</sup>
2	5,73	524,7	1,176	4,539	4,394	0,145
3	5,28	568,4	1,170	4,547	4,393	0,154
4	5,10	588,4	1,177	4,579	4,392	0,187
5	4,71	637,2	1,171	4,589	4,392	0,197

3. Nullpunkt: 4,392<sup>P</sup>;  $b = 1,176^P$ .

4. Drehung mit dem Uhrzeiger.

Nr.	$\alpha$	Touren p. Min.	$b$	$l_1$	$l_0$	$\delta_m$
1	6,00	500,1	1,172	4,272	4,392	+ 0,120
2	5,40	555,7	1,175	4,241	4,395	0,154
3	4,95	606,2	1,170	4,207	4,397	0,190
4	4,69	639,3	1,176	4,179	4,399	0,220

5. Nullpunkt: 4,399<sup>P</sup>;  $b = 1,169^P$ .

Nr.	$\alpha$	Touren p. Min.	$\delta_m$	$\delta_0$	$\delta$	Abweichung
1	5,73	524,7	+ 0,136	- 0,145	0,141	$\pm 0,005$ (4%)
2	5,28	568,4	0,168	0,154	0,161	0,007 (4%)
3	5,10	588,4	0,185	0,187	0,186	0,001 (0,6%)
4	4,71	637,2	0,217	0,197	0,207	0,010 (5%)

$$b = 1,173^P \text{ (Mittel).}$$

Im allgemeinen erschienen die Interferenzen, wenn der Motor nicht zu rasch anzog, vollkommen ruhig. Ein merkliches Zittern war erst bei 800 bis 900 Touren pro Minute zu beobachten. Während der ersten Zeit der Untersuchung gelang es, die Interferenzen selbst bei 1800 Umdrehungen des Prismenkränzes pro Minute noch zu sehen, diese Sichtbarkeitsgrenze sank aber später immer tiefer, ohne daß neue Justierung oder starkes Anziehen der Befestigungsschrauben der Prismen sie wieder auf die frühere Höhe bringen ließ. Bei den definitiven Messungen wurde daher nicht über 750 Touren pro Minute hinausgegangen, um keine Nullpunktversetzungen während einer Beobachtung befürchten zu müssen, obgleich hierbei die Verschiebung des Streifensystems ziemlich gering war. In dieser Beziehung erwies sich überhaupt die visuelle Messung der photographischen Aufnahme trotz ihrer geringeren Meßgenauigkeit überlegen, denn letztere wies stets bedeutend größere Nullpunktsschwankungen auf als die erste, was wohl seinen Grund in der großen Länge der Belichtungszeiten hatte. Der Nullpunkt selbst änderte sich bei allen Beobachtungsserien in demselben Sinne, er stieg mit wachsender Temperatur des Prismenbehälters, ohne daß aber zwischen beiden Änderungen eine konstante Beziehung fest-

zustellen gewesen wäre. Eine Abhängigkeit der Nullpunkt-  
bewegung vom Drehungssinn der Maschine bestand nicht.

Die Streifenbreite zeigte sich bei allen Messungen sehr  
konstant, ihre Änderung blieb stets unter der Fehlergrenze der  
Beobachtung. Die während einer sehr langen Beobachtungs-  
serie von mehr als acht Stunden erfolgten Schwankungen des  
Nullpunktes und der Streifenbreite sind aus folgender Tabelle  
zu ersehen.

Zeit	Zahl der Aufnahmen	Nullpunktlage in mm	Streifenbreite in mm
10 Uhr 45 Min.	15	1,6934	0,1930
12 „ 13 „	13	1,7353	0,1916
13 „ 33 „	12	1,7639	0,1900
15 „ 0 „	13	1,7796	0,1890
16 „ 15 „	11	1,8205	0,1887
17 „ 10 „	12	1,8373	0,1873
18 „ 15 „		1,8489	0,1864

Im Laufe von 76 photographischen Aufnahmen hatte sich  
also der Nullpunkt um 0,1555 mm und die Streifenbreite um  
0,0066 mm geändert, so daß im Durchschnitt auf eine Auf-  
nahme eine Änderung von 0,002 bzw. 0,0001 mm entfällt,  
welche also noch innerhalb der Fehlergrenze der Beobachtung  
zu liegen kommt.

§ 8. Anpassung der Formel für die Streifenverschiebung auf  
den Fall eines rotierenden Körpers.

Wie bereits auf S. 392 angegeben, lautet die Formel für  
die in Streifenbreiten ausgedrückte Streifenverschiebung:

$$(1) \quad \Delta = \frac{2lqn^2(1-x)}{\lambda c}.$$

Diese Formel ist aber nicht ohne weiteres auf den bei  
den Versuchen vorliegenden Fall anwendbar, denn ein Licht-  
strahl durchläuft bei seinem Durchgang durch das Prismen-  
polygon Teile des bewegten Mediums, die ganz verschiedene  
und auch verschieden gerichtete Geschwindigkeiten besitzen.  
Um sie daher zur Anwendung auf den hier vorliegenden Fall  
geeignet zu machen, gibt Harreß folgende Ausführungen.

In einem starren, durchsichtigen Medium, welches mit der  
konstanten Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  um die Achse  $O$  rotiert,

pflanzt sich ein Lichtbündel  $LL'$  geradlinig fort (Fig. 7). Hierbei ist angenommen, daß die Richtung der Strahlen durch die Körpergeschwindigkeit nicht geändert wird, welche Annahme theoretisch nicht ganz richtig ist, da die Mitführung des Lichtes durch senkrecht zu seiner Fortpflanzungsrichtung bewegte Materie noch durch quadratische Glieder in  $v/V$  bestimmt ist. Wegen der Kleinheit dieser Glieder kommen sie aber hier nicht in Frage.

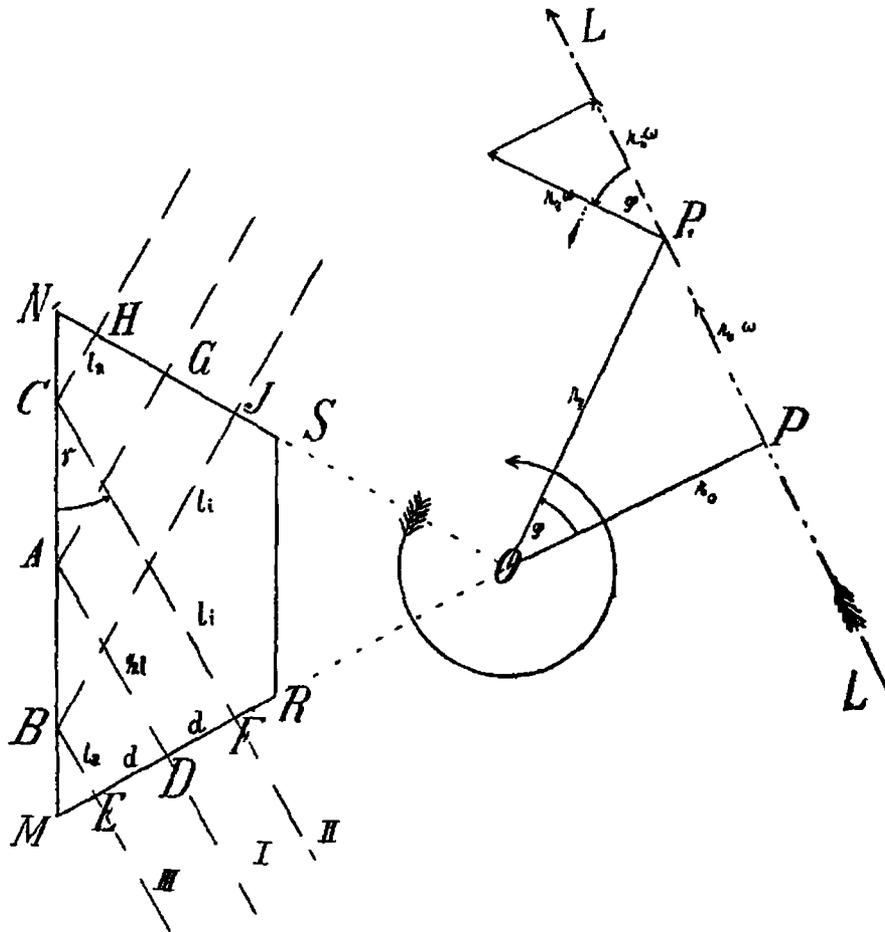


Fig. 7.

Im Punkte  $P$ , dem Treffpunkte des Lotes  $r_0$  von  $O$  auf  $LL'$ , sind die Richtungen der Ausbreitung des Lichtes und der Körpergeschwindigkeit dieselben, so daß für die Mitführung der Wert

$$r_0 \omega$$

in Frage kommt.

In einem anderen Punkte  $P_1$  des Lichtstrahles, sollen die Richtungen zwischen der Fortpflanzung des Lichtes und der Tangentialgeschwindigkeit des Mediums den Winkel  $\varphi = \angle r_0 r_1$  einschließen. Dann kommt für die Änderung der Geschwindig-

keit des Lichtes nur die Projektion von  $r_1 \omega$  auf  $LL'$  in Betracht. Diese Komponente der Körpergeschwindigkeit ist:

$$r_1 \omega \cos \varphi = r_0 \omega.$$

Da die Geschwindigkeit des vom Licht durchsetzten Körpers in der Richtung des Lichtstrahles im Punkte  $P_1$  demnach gerade so groß ist wie in  $P$ , so ist auch die Mitführung des Äthers in  $P_1$  und in  $P$  und überall auf dem Strahl  $LL'$  von gleicher Größe. Die Änderung der Lichtgeschwindigkeit in einem rotierenden Medium ist demnach so lange konstant, als sich der Lichtstrahl geradlinig fortpflanzt.

Führt man durch innere Reflexionen ein Lichtbündel ganz beliebig durch das rotierende Medium, so ist die resultierende Wirkung auf ein passend erzeugtes Interferenzsystem gleich der Summe der Einzelwirkungen während der geradlinigen Wegteile des Lichtes im Medium. Die Formel (1) läßt sich also schreiben:

$$(2) \quad \Delta = \frac{2n^2(1-x)}{\lambda c} \omega \sum lr,$$

worin  $l$  die Wege des Lichtes von einer Reflexion zur anderen und  $r$  die Lote vom Rotationszentrum auf diese bedeuten.

Nun ist aber

$$\omega = \frac{2\pi z_m}{z_m},$$

wo  $z_m$  die Zeitdifferenz zwischen zwei Kontakten der Tourenzählvorrichtung in Minuten mittlerer Zeit bedeutet, so daß man folgende Formel erhält:

$$(3) \quad \Delta = 200 \frac{n^2 \pi (1-x)}{z_m \lambda c} \sum lr.$$

Der Ausdruck  $\sum lr$  ist nun für das benutzte Polygon numerisch zu bestimmen.

In Fig. 7 sei  $MNRS$  ein Prisma des Polygons, in welches ein Strahlenbündel senkrecht zur Fläche  $MR$  eintritt, an  $MN$  reflektiert wird und senkrecht zu  $NS$  wieder austritt. Von einer eventuellen Änderung des Reflexionsgesetzes durch Rotation des Prismas um  $O$  soll hier abgesehen werden.

Betrachtet man drei Strahlen, den Mittelstrahl  $I$  und zwei im Abstände  $d$  zu ihm symmetrisch liegende, andere Strahlen  $II$

und III, so ergibt sich die Summe der beiden Produkte aus den Teilstrecken und den von  $O$  auf sie gefällten Loten

$$\text{für Strahl II zu } r_a l_a + r_i l_i = (r + d)l_a + (r - d)l_i,$$

$$\text{„ „ I „ } r \frac{l}{2} + r \frac{l}{2} = r l,$$

$$\text{„ „ III „ } r_i l_i + r_a l_a = (r - d)l_i + (r + d)l_a.$$

$$\text{Hierbei ist } l = s \cdot \cos \gamma \text{ und } l_a + l_i = l.$$

Für einen beliebigen Strahl im Abstände  $d$  vom Mittelstrahl ist also die Summe jener beiden auf ein Prisma sich beziehenden Produkte gleich

$$r l - d (l_i - l_a).$$

Dieser Ausdruck hat für  $d = 0$ , also für den Mittelstrahl, sein Maximum  $r l$  und nimmt mit wachsendem  $d$  erst langsam, dann rasch ab, wie man sofort erkennt, wenn man ihn in die Form überführt

$$r l - 2 d^2 \operatorname{ctg} \gamma.$$

Für  $d = \pm 10$  mm,  $l = 114$  mm und  $r = 18,3$  cm macht das Glied  $2 d^2 \operatorname{ctg} \gamma$  schon 3 Proz. von  $r l$  aus. Trotzdem haben Harreß und Hr. Harzer wohl mit Recht nur den Mittelstrahl bei der Summierung der Produkte berücksichtigt, denn bei den Versuchen wurde darauf geachtet, daß die Höhe der Bogenlampe, sowie sie sich etwas geändert hatte, sofort korrigiert wurde. Jedenfalls ist der durch Einführung des Maximalwertes der Produktsomme in das Resultat gekommene Fehler viel geringer als wenn man unter der Annahme gleichmäßigen Vorkommens der verschiedenen möglichen Bogenlampenstellungen alle die Fläche  $a^2$  durchdringenden parallelen Lichtstrahlen in Betracht gezogen hätte.

Nach Harreß' Schätzung könnte der Fehler höchstens 1 bis 2 Proz. betragen, das Resultat für den Mitführungskoeffizienten sich also um so viel zu hoch ergeben.

Nicht geringere Beachtung verdient, worauf Hr. v. Laue aufmerksam gemacht hat, der Umstand, daß die beobachteten Interferenzstreifen, wie Fig. 5 (S. 406) zeigt, nicht von den beiden das Prismenpolygon in entgegengesetzter Richtung durchlaufenden Mittelstrahlen selbst, sondern von etwas schief auffallenden Strahlen herrührten. In der Mitte der kreisförmigen Interferenzfigur würden die Streifen nicht von gleicher Breite ge-

wesen sein, dies fand in genügender Annäherung erst in einiger Entfernung von der Mitte statt. Von Harreß wird jedoch diese Quelle der Unsicherheit des Resultates nicht erwähnt.

In Formel (3) ist die Summe  $\sum l r$  auf die an der Rotation des Apparates teilnehmenden Wegstrecken des Lichtes auszudehnen, auch auf die Strecke zwischen Mittelkörper und der Prismenseite  $DD'$  in Fig. 1 (S. 393). Hierbei ist freilich zu beachten, daß der Mitführungskoeffizient in Luft gleich Null ist und daß Strecken, auf welchen der Lichtstrahl in entgegengesetzten Richtungen um den Mittelpunkt des Prismenkränzes herumläuft, mit entgegengesetzten Vorzeichen zu versehen sind.

Die Wege des Lichtstrahles im Mittelkörper seien, wie es auch bei Harreß und bei Hrn. Harzer geschieht, nicht berücksichtigt.

Ausführlicher geschrieben lautet Formel (3)

$$(4) \quad \Delta = \frac{200 n^2 \pi (1 - \alpha)}{\alpha_m \lambda c} \sum_{\text{Glas}} l r + \frac{200 \pi}{\alpha_m \lambda c} \sum_{\text{Luft}} l r,$$

$$\text{wo } \sum_{\text{Glas}} l r = (8 s_1 \cos \gamma_1 + s_2 \cos \gamma_2) \left( r - \frac{a}{2} \right) + (s_2 \cos \gamma_2 + a) \times \\ \left( r \cos(180^\circ - 4\alpha) + \frac{a}{2} \right) - \left( a \cos(180^\circ - 4\alpha) + \frac{a}{2} \right) a \\ = 2040,9 \text{ cm}^2$$

$$\text{und } \sum_{\text{Luft}} l r = - a (r - a) \cos(180^\circ - 4\alpha) + \frac{a^2}{2} = 18,8 \text{ cm}^2.$$

Drücken wir die Anzahl  $z_m$  Minuten mittlerer Zeit, welche zu 50 Touren der Maschine erforderlich waren, durch die direkt beobachteten  $z$  Minuten Sternzeit aus, welchen jenes Zeitintervall gleich ist, setzen wir also

$$z_m = 0,99727 z,$$

so bekommen wir

$$\text{für } \lambda = 625 \mu\mu \text{ und } n_{625} = 1,57167 \quad x_{625} = 0,99627 - 0,59004 z \cdot \Delta, \\ \text{für } \lambda = 535 \mu\mu \text{ und } n_{535} = 1,57665 \quad x_{535} = 0,99629 - 0,50188 z \cdot \Delta.$$

Die Abweichung der Harreßschen Formeln

$$x_{625} = 0,62917 z \cdot \Delta,$$

$$x_{535} = 0,49952 z \cdot \Delta$$

kommt, wie schon erwähnt, hauptsächlich daher, daß Harreß in seiner Formel für die Streifenverschiebung  $x$  fälschlich für

1 -  $x$  stehen hat, außerdem aber hat er die Wegstrecken des Lichtstrahls durch die Luft und durch den zwischen  $DD'$  und  $EE'$  liegenden Glaskörper unberücksichtigt gelassen und bei Einführung von  $z$  an Stelle von  $z_m$  einen Rechenfehler begangen.

§ 9. Zusammenstellung der Messungsergebnisse.

Die folgenden beiden Tabellen geben die Einzelresultate, welche mit den beiden farbigen Gläsern, also mit Benutzung der Wellenlängen  $\lambda = 625 \mu\mu$  und  $\lambda = 535 \mu\mu$  in je vier Messungsreihen erhalten wurden.  $z$  bedeutet wieder die Anzahl der Sternzeitsekunden, welche der Apparat zu 50 Umdrehungen brauchte,  $\delta$  die für diese Rotationsgeschwindigkeit gefundene Streifenverschiebung, ausgedrückt in Mikrometerteilen,  $\Delta$  dieselbe Streifenverschiebung, ausgedrückt in Streifenbreiten, und  $x$  den Mitführungskoeffizienten, berechnet nach den Formeln

$$x_{625} = 0,99627 - 0,59004 z \cdot \Delta,$$

$$x_{535} = 0,99629 - 0,50188 z \cdot \Delta.$$

Die letzte Spalte enthält den aus den einzelnen Messungsreihen sich ergebenden Wert von  $x$ .

Tabelle I.

$\lambda = 625 \mu\mu.$

Nr.	$z$	$\delta$	$\Delta$	$x$	Mittelwert $x$
1. Reihe. $b = 1,019^P$					
1	6,09	0,120	0,118	0,572	$x = 0,596$ Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0240$ Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0066$
2	6,04	0,108	0,106	0,618	
3	5,55	0,126	0,124	0,590	
4	5,54	0,127	0,125	0,588	
5	5,43	0,118	0,116	0,625	
6	5,37	0,120	0,118	0,622	
7	5,11	0,134	0,132	0,598	
8	4,92	0,149	0,146	0,572	
9	4,81	0,152	0,149	0,573	
10	4,62	0,134	0,132	0,636	
11	4,50	0,148	0,145	0,611	
12	4,38	0,162	0,159	0,585	
13	4,18	0,179	0,176	0,562	

Tabelle I (Fortsetzung).

Nr.	$x$	$\delta$	$\Delta$	$x$	Mittelwert $x$
2. Reihe. $b = 1,022^p$					
1	6,03	0,121	0,118	0,576	
2	5,85	0,124	0,121	0,579	
3	5,21	0,136	0,133	0,587	
4	5,09	0,141	0,137	0,585	
5	4,93	0,151	0,147	0,569	
6	4,87	0,138	0,134	0,611	$x = 0,592$
7	4,78	0,146	0,142	0,596	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0175$
8	4,70	0,153	0,149	0,583	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0050$
9	4,69	0,154	0,150	0,581	
10	4,29	0,148	0,144	0,632	
11	4,13	0,168	0,162	0,602	
12	4,12	0,167	0,163	0,600	
3. Reihe. $b = 1,111^p$					
1	5,81	0,128	0,115	0,602	
2	5,60	0,133	0,120	0,600	
3	5,28	0,149	0,135	0,576	
4	5,27	0,128	0,115	0,639	
5	5,15	0,158	0,142	0,565	
6	5,14	0,142	0,128	0,608	
7	5,12	0,145	0,131	0,601	
8	5,04	0,134	0,121	0,636	
9	4,99	0,155	0,140	0,584	
10	4,97	0,165	0,149	0,559	$x = 0,586$
11	4,90	0,168	0,151	0,560	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0232$
12	4,87	0,161	0,145	0,580	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0052$
13	4,86	0,154	0,139	0,598	
14	4,81	0,160	0,144	0,588	
15	4,81	0,165	0,149	0,573	
16	4,78	0,163	0,147	0,582	
17	4,65	0,172	0,155	0,571	
18	4,59	0,175	0,158	0,568	
19	4,54	0,182	0,163	0,560	
20	4,54	0,177	0,159	0,570	
4. Reihe. $b = 0,995$					
1	6,69	0,097	0,097	0,613	
2	6,67	0,097	0,097	0,614	
3	5,48	0,115	0,116	0,621	
4	5,48	0,119	0,120	0,608	
5	5,24	0,127	0,128	0,601	
6	5,10	0,125	0,126	0,617	
7	5,06	0,127	0,128	0,614	
8	5,05	0,127	0,128	0,615	
9	5,05	0,129	0,130	0,609	
10	5,04	0,130	0,131	0,607	
11	5,04	0,132	0,133	0,601	
12	5,03	0,139	0,140	0,581	

Tabelle I (Fortsetzung).

Nr.	$\alpha$	$\delta$	$\Delta$	$x$	Mittelwert $x$
13	5,01	0,135	0,136	0,594	
14	5,00	0,140	0,141	0,580	
15	4,97	0,136	0,137	0,594	
16	4,94	0,137	0,138	0,594	$x = 0,590$
17	4,92	0,143	0,144	0,578	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0187$
18	4,91	0,145	0,146	0,573	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0032$
19	4,88	0,136	0,137	0,602	
20	4,85	0,138	0,139	0,599	
21	4,84	0,152	0,153	0,559	
22	4,76	0,152	0,153	0,567	
23	4,73	0,142	0,143	0,597	
24	4,70	0,153	0,154	0,569	
25	4,66	0,151	0,152	0,578	
26	4,64	0,153	0,154	0,575	
27	4,60	0,155	0,156	0,573	
28	4,60	0,147	0,148	0,594	
29	4,52	0,160	0,161	0,567	
30	4,51	0,157	0,158	0,576	
31	4,49	0,161	0,162	0,567	
32	4,47	0,161	0,162	0,569	
33	4,45	0,162	0,163	0,568	
34	4,35	0,166	0,167	0,568	
35	4,21	0,156	0,157	0,606	

Tabelle II.

$$\lambda = 535 \mu\mu.$$

Nr.	$\alpha$	$\delta$	$\Delta$	$x$	Mittelwert $x$
1. Reihe. $b = 1,018^P$					
1	5,84	0,127	0,125	0,630	
2	5,78	0,135	0,133	0,610	
3	5,74	0,145	0,142	0,587	
4	5,73	0,143	0,140	0,594	
5	5,40	0,163	0,160	0,563	
6	5,31	0,147	0,144	0,613	
7	5,28	0,168	0,165	0,559	$x = 0,576$
8	5,12	0,159	0,156	0,595	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0318$
9	5,10	0,135	0,132	0,530	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0082$
10	5,10	0,158	0,155	0,600	
11	5,09	0,179	0,176	0,547	
12	5,09	0,174	0,171	0,560	
13	4,96	0,174	0,171	0,570	
14	4,95	0,195	0,192	0,519	
15	4,89	0,182	0,179	0,557	

Tabelle II (Fortsetzung).

Nr.	$x$	$\delta$	$A$	$x$	Mittelwert $x$
2. Reihe. $b = 1,158^P$					
1	8,52	0,100	0,087	0,624	
2	6,56	0,139	0,121	0,598	
3	6,48	0,144	0,125	0,590	
4	6,19	0,156	0,136	0,574	
5	6,07	0,154	0,134	0,588	
6	5,99	0,154	0,134	0,594	
7	5,92	0,157	0,137	0,589	
8	5,74	0,176	0,158	0,556	
9	5,60	0,164	0,143	0,594	
10	5,53	0,185	0,160	0,552	$x = 0,564$
11	5,50	0,194	0,168	0,532	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0292$
12	5,48	0,196	0,170	0,529	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0065$
13	5,39	0,199	0,173	0,528	
14	5,39	0,200	0,173	0,528	
15	5,36	0,198	0,167	0,547	
16	5,30	0,199	0,173	0,536	
17	5,27	0,195	0,169	0,549	
18	5,26	0,199	0,173	0,540	
19	5,12	0,202	0,175	0,547	
20	4,56	0,207	0,180	0,584	
3. Reihe. $b = 1,013^P$					
1	5,85	0,142	0,140	0,585	
2	5,60	0,149	0,147	0,583	
3	5,54	0,140	0,138	0,613	
4	5,26	0,166	0,164	0,563	$x = 0,583$
5	5,28	0,154	0,152	0,595	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0182$
6	5,21	0,158	0,156	0,588	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0061$
7	4,99	0,170	0,168	0,576	
8	4,91	0,167	0,165	0,590	
9	4,63	0,194	0,192	0,550	
4. Reihe. $b = 1,242^P$					
1	5,86	0,165	0,133	0,605	
2	5,40	0,193	0,156	0,574	
3	5,29	0,193	0,156	0,582	
4	5,17	0,204	0,164	0,571	
5	5,10	0,179	0,151	0,610	
6	4,93	0,204	0,164	0,591	$x = 0,588$
7	4,88	0,200	0,161	0,602	Mittl. F. eines Einzelresult. = $\pm 0,0166$
8	4,86	0,201	0,162	0,601	Mittl. F. des Mittels = $\pm 0,0044$
9	4,83	0,206	0,166	0,594	
10	4,83	0,213	0,172	0,579	
11	4,82	0,205	0,165	0,597	
12	4,59	0,214	0,172	0,600	
13	4,45	0,241	0,194	0,562	
14	4,37	0,248	0,200	0,558	

Als Mittelwerte der  $x$  ergeben sich aus den einzelnen Messungsreihen die folgenden Werte:

	$x_{625}$	$x_{635}$
1. Reihe	0,596 ± 0,0066 (m. F.)	0,576 ± 0,0082 (m. F.)
2. „	0,592 ± 0,0050	0,564 ± 0,0065
3. „	0,586 ± 0,0052	0,583 ± 0,0061
4. „	0,590 ± 0,0032	0,588 ± 0,0044

Bei dieser Mittelbildung sind, wie es in der Harreßschen Dissertation geschieht, die verschiedenen Resultate für  $x$  in je einer Versuchsreihe als von gleicher Zuverlässigkeit angenommen und haben daher alle das gleiche Gewicht erhalten. Nach der bei den Versuchen angewandten Methode sind aber die Messungen der Streifenverschiebung, d. h. die  $\delta$  oder, was nahezu auf dasselbe hinauskommt, die  $\Delta$  von gleicher Genauigkeit und daher mit gleichem Gewicht zu versehen, wie das in der Harzerschen Bearbeitung der Harreßschen Versuche geschehen ist.

Stellt man, um dem gleichen Gewicht der  $\Delta$  Rechnung zu tragen, die Beobachtungsgleichungen in der Form auf

$$\frac{x_{625}}{0,59004 \cdot x} - \frac{0,99627}{0,59004 \cdot x} + \Delta = 0 \quad \text{und} \quad \frac{x_{635}}{0,50188 \cdot x} - \frac{0,99623}{0,50188 \cdot x} + \Delta = 0,$$

so erhält man aus den einzelnen Messungsreihen die von den obigen nur wenig abweichenden Werte:

	$x_{625}$	$x_{635}$
1. Reihe	0,595 ± 0,0040 (m. F.)	0,573 ± 0,0050 (m. F.)
2. „	0,594 ± 0,0031	0,560 ± 0,0036
3. „	0,585 ± 0,0029	0,581 ± 0,0038
4. „	0,589 ± 0,0018	0,587 ± 0,0030

Da die Abweichungen der aus den einzelnen Reihen hervorgehenden Werte von  $x$  zum Teil größer sind als die mittleren Fehler, so ist klar, daß bei den verschiedenen Versuchsreihen nicht nur zufällige Fehler im Spiel waren. Vereinigt man trotzdem die letzt hingeschriebenen Werte nach der Methode der kleinsten Quadrate, indem man das Gewicht dem reziproken Wert des Quadrates des mittleren Fehlers proportional setzt, zu Endwerten, so findet man

$$x_{625} = 0,590 \pm 0,0013 \quad \text{und} \quad x_{635} = 0,577 \pm 0,0018,$$

wobei die angegebenen mittleren Fehler jedoch kaum Anspruch auf Beachtung erheben können.

Obwohl die für  $x_{625}$  und  $x_{635}$  gefundenen Werte ziemlich weit auseinander liegen, so ist durch die Versuche doch nicht als erwiesen anzusehen, daß der Wert der Mitführungskoeffizienten von der Wellenlänge des Lichtes abhängt; ist doch der Mitführungskoeffizient für rotes Licht in der dritten Versuchsreihe kleiner herausgekommen als der für grünes Licht in der vierten Versuchsreihe, während im allgemeinen das umgekehrte Verhältnis stattfindet. Der Theorie nach müßte aber der Mitführungskoeffizient für rotes Licht kleiner sein als der für grünes Licht, da die Formel  $x = 1 - \frac{1}{n^2}$  für  $n = 1,57167$  und  $n = 1,57665$  die Werte liefert

$$x_{625} = 0,5952 \quad \text{und} \quad x_{635} = 0,5977.$$

Es haben bei den Harreßschen Versuchen offenbar manche Umstände eine nicht gar unbedeutende Unsicherheit des Resultates veranlaßt, weshalb eine Wiederholung der Versuche sehr erwünscht wäre. Gerade mit Rücksicht auf eine spätere Wiederholung sind im Vorstehenden die Erfahrungen, welche Harreß gemacht hat, und zwar auch die ungünstigen Erfahrungen, welche mit dieser und jener Anordnung gemacht wurden, ausführlich mitgeteilt worden. Auf die Notwendigkeit einer noch exakteren Konstruktion des Rotationsapparates deutet der von Harreß erwähnte Umstand hin, daß während der ersten Zeit der Untersuchung die Interferenzstreifen noch bei 1800 Umdrehungen des Apparates pro Minute gut zu sehen waren, bei den definitiven Messungen aber nicht über 750 Umdrehungen hinausgegangen werden konnte, und daß neue Justierung und stärkere Befestigung der Prismen keine Besserung brachte. Ferner macht Hr. v. Laue darauf aufmerksam, daß die Einzelwerte von  $x$  in Tab. I, Reihe 3. und 4, und in Tab. II, Reihe 1 und 2 anfangs, d. h. bei langsamerer Rotation des Apparates, über dem Mittelwert und gegen das Ende hin, bei schnellerer Rotation, unter dem Mittelwert liegen. Man darf wohl vermuten, daß die hier wirkende Fehlerquelle auch schon die ersten Messungen beeinflußt hat und das Resultat daher hat zu niedrig herauskommen lassen. — Eine weitere Fehlerursache war die Höhenänderung der Lichtquelle, infolge deren der Weg der Lichtstrahlen in den Prismen nicht dauernd derselbe war, d. h. nicht dauernd seine mittlere Lage beibehielt. Auch

wäre die Anwendung monochromatischen Lichtes, wenn ihm die genügende Intensität hätte erteilt werden können, sicherlich dem durch Filter hindurchgegangenen Licht vorzuziehen gewesen.

All diese Mängel fallen aber kaum der Methode zur Last, dürften vielmehr bei Wiederholung der Versuche zu vermeiden sein. Die Ergebnisse der Harreßschen Untersuchung können zu einer Wiederholung der Versuche nur ermutigen.

(Eingegangen 21. Januar 1920.)

---