Physikalische Übungen

Ein Leitfaden für die Hand des Schülers

Von

Walther Masche

Professor

Dritter Teil

(Beilage zum Jahresbericht des Königlichen Kaiser-Wilhelms-Realgymnasiums in Berlin, Ostern 1915)

Druck von B. G. Teubner in Leipzig 1915

1915. Programm Nr. 118.

Inhalt.

V. Akustik.

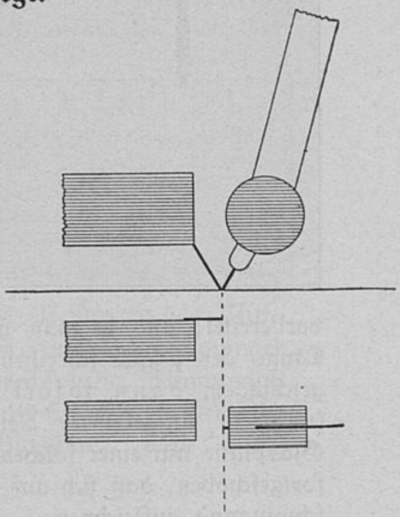
VI. Optik.

Anhang:

Fünfte Abteilung:

Akustik.

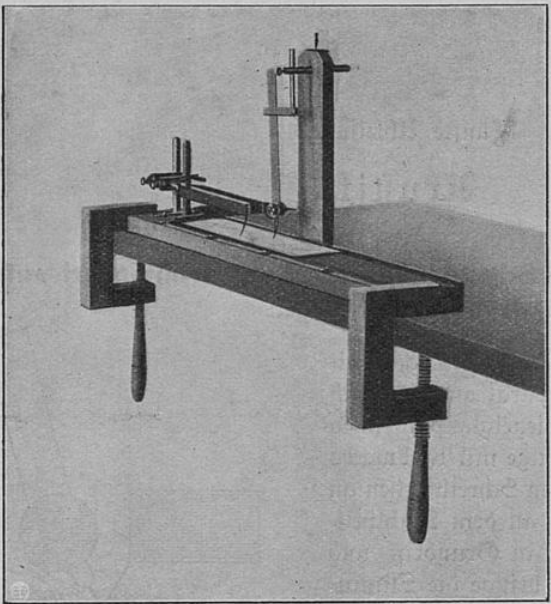
1. Bestimmung der Schwingungszahl einer Stimmgabel auf graphischem Wege.



a) Man schraube mit Hilfe der beiden Zwingen den Apparat an den Tisch an, lege eine der Spiegelglasplatten in die Schienenbahn, befestige mit Klebwachs je eine der beigegebenen Schreibspitzen an der Stimmgabel bzw. an dem Stahlpendel, wie es die Figur in Grundriß und Aufriß darstellt, und bringe die Stimmgabel und das Pendel so an dem Apparat an, daß beide Schreibspitzen die Glasplatte berühren. Die Einstellung bei der Stimmgabel bewirkt man nur an der Schreibspitze, beim Pendel dagegen dadurch, daß man seine Stellung im ganzen verändert. Die unteren Enden beider Schreibspitzen müssen auf einer Geraden liegen, die auf der Schienenrichtung senkrecht steht. Vergleiche die gestrichelte Gerade in der Figur.

b) Die Glasplatte wird herausgezogen und auf den Tisch gelegt. Die Spitze des Zeigefingers mache man mit etwas Vaseline fettig, betupfe mit ihr die Oberseite der Glasplatte an vielen Stellen und verreibe die Tupfen recht gleichmäßig, am besten mit den dicht aneinander gelegten Spitzen des Zeige- und Mittelfingers. Je weniger Vaseline man aufgetragen hat, desto besser wird der Versuch gelingen.

c) Jetzt wird die Glasplatte mit Lykopodium (aus einem Leinwandbeutel, den man ungefähr 40 cm darüber hält) vorsichtig eingestäubt. Nachdem das überschüssige Lykopodium abgeklopft ist, schiebt man die Glasplatte wieder in den Apparat und untersucht, ob

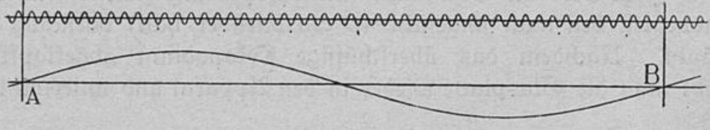


auch beide Schreibspitzen beim Anschlagen der Stimmgabel und beim Schwingenlassen des Pendels (Amplitude 1 cm) schreiben, d. h. die Lykopodiumschicht eben wegkratzen. Wenn bei diesen Vorversuchen die Lykopodiumschicht auf der Platte verbraucht sein sollte, ist die Spiegelglasplatte mit einem Tuche zu reinigen, neu einzufetten und einzustäuben.

d) Ist alles so vorbereitet, und ist man sicher, daß beide Spitzen auf der ganzen Länge der Platte schreiben, so wird zuerst die Stimmgabel angeschlagen, dann sofort das Pendel in Schwingungen versetzt (nicht in umgekehrter Reihenfolge!) und ohne Zeitverlust die Glasplatte mit einer solchen Geschwindigkeit unter den Schreibspitzen fortgeschoben, daß sich auf ihr $1\frac{1}{2}$ bis 2 Wellenlängen der Pendelschwingung aufzeichnen.

e) Stimmgabel und Pendel werden angehalten, die Schreibspitze der Gabel wird entfernt und die Glasplatte unter der jetzt ruhenden Schreibspitze des Pendels entlang gezogen, um die zu seiner Schwingungskurve gehörige Achse zu erhalten.

In den beiden Punkten A und B, in denen sich Achse und Kurve schneiden, und die um eine, vielleicht auch um zwei **ganze** Wellenlängen voneinander entfernt sind, errichtet man, ohne die Glasplatte aus den Schienen zu entfernen, mit Hilfe des dem Apparat beigegebenen rechtwinkligen Anschlagdreiecks auf der Achse je eine Senk-



rechte, die auch die Stimmgabelkurve schneiden. Man benutze hierzu einen sehr spitzen Bleistift.

f) Mit der Stoppuhr beobachte man jetzt die Dauer von 50 Pendelschwingungen viermal und berechne daraus die Zeit t für eine Pendelschwingung AB.

g) Jetzt ist die Anzahl N der Stimmgabelschwingungen, die in der gleichen Zeit erfolgt sind, auf der Glasplatte zwischen den beiden Loten abzuzählen. Zu diesem Zwecke stellt oder legt man die Platte geeignet auf und bezeichnet zunächst jede fünfte Schwingung durch eine Marke auf der Lykopodiumschicht (s. d. Fig. auf S. 6). Eine Lupe erleichtert diese Arbeit sehr. Es ist dann nicht schwierig, die Gesamtzahl N der Schwingungen festzustellen, die in der Zeit t erfolgt sind.

	t	N	n
1 2			
Mittel:			

h) Wieviel Schwingungen hat die Stimmgabel in einer Sekunde gemacht? Diese Anzahl n heißt die Schwingungszahl der Stimmgabel.

i) Stelle den ganzen Versuch auf einer zweiten Spiegelglasplatte noch einmal an und nimm aus beiden Messungen das Mittel.

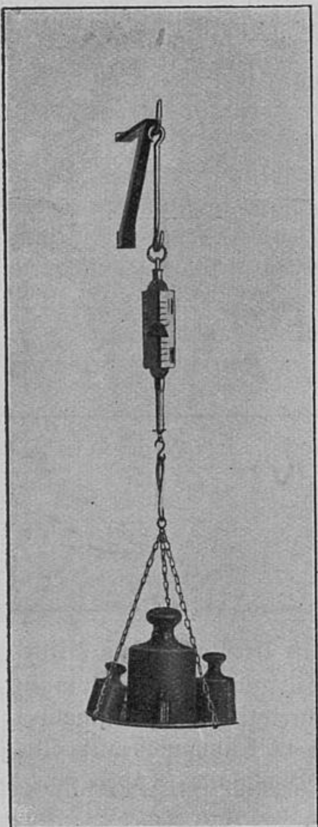
Zubehör: Schienenapparat mit Pendel, zwei Schraubzwingen, Spiegelglasplatten, Klebwachs, zwei Schreibspitzen, Stimmgabel, Hammer, Vaseline in Tube, Lykopodium in Leinwandbeutel, Anschlagdreieck, Stoppuhr, Gestell für die Glasplatte, Lupe, harter Bleistift.

2. Bestimmung der Schwingungszahl einer Stimmgabel mit Hilfe des Monochords.

A. Eichung der Federwage.

a) Mit Hilfe der beiden der Federwage beigegebenen Klemmen befestige man auf ihr einen passend zugeschnittenen Papierstreifen, auf dem die Skala der Federwage angebracht werden soll.

b) Man hänge die Federwage auf, bringe an ihr die 250 g wiegende Schale an und setze auf diese noch 750 g, um die Wage im ganzen mit 1 kg zu belasten. Von der Rückseite her klopfe man sie ein wenig, um eine fehlerfreie Einstellung des Zeigers zu erzielen. Den Zeiger halte man vorsichtig in seiner Lage fest und ziehe ganz dicht an seiner unteren Schreibkante mit einem sehr harten und fein angespitzten Bleistift eine Gerade, die die Bezeichnung „1 kg" erhält.



c) Man setze jetzt noch 1 kg auf die Schale, klopfe wieder, halte den Zeiger fest und bringe den Eichstrich „2 kg“ an. Man setze dies Verfahren von kg zu kg bis „11 kg“ fort.

d) Gewichte und Schale werden vorsichtig entfernt, ohne dabei die Skala zu verschieben. Die Federwage wird auf das Monochord zurückgebracht.

B. Bestimmung der Saitenkonstanten m.

a) Von dem beigegebenen Stahldraht kneife man ein Stück von ungefähr 2 m ab und messe seine Länge, indem man es auf zwei mit ihren Null-Enden zusammengefügte Meterstäbe legt, die Drahtenden mit zwei Flachzangen haltend. Jeder der beiden Beobachter liest nur ein Ende ab; die Summe der Ablesungen, vermehrt um die gegenseitige Entfernung der Null-Enden, gibt die Länge. Unter Vertauschung der Plätze wird die Messung an einer anderen Stelle der Maßstäbe wiederholt und aus den so gefundenen Längen das Mittel L genommen.

b) Jetzt ist das Gewicht des Drahtstückes zu bestimmen. Dies geschieht nach der Tariermethode: Der Draht wird auf die linke Schale einer Wage gebracht und sorgfältig austariert, indem man auf die andere Schale so viel Belastung (Schrot und zuletzt Papierstückchen) bringt, daß die Wage annähernd symmetrisch zu 10 schwingt.

	L	g	log m	Q	l	n
1						
2						
3						
					Mittel:	

Nachdem man den Nullpunkt bestimmt hat, entfernt man den Draht von der Wage und bestimmt durch zwei Schwingungsversuche, durch wieviel Gewicht das Gewicht des Drahtes zu ersetzen ist. Aus diesem Gewicht g und der Länge L berechnet man das Gewicht eines Zentimeters des Drahtes. Es sei m.

C. Einstellung des Monochords.

a) Der eben gewogene Draht wird auf dem Monochord ausgespannt, indem man ihn auf der einen Seite mit drei festen Knoten an dem Haken der Federwage anbringt und ihn auf der anderen Seite in gleicher Weise am Wirbel befestigt, ihn dabei durch das Loch im Wirbel hindurchziehend. Die überflüssige Länge des Drahtes wird abgekniffen. Der Draht soll schon jetzt möglichst stramm sitzen.

b) Den beweglichen Steg bringt man unter das dem Wirbel zugekehrte Ende der Saite.

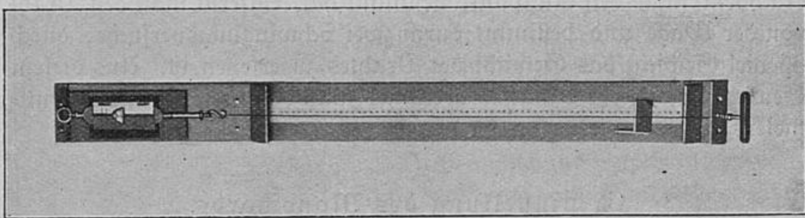
c) Der eine Beobachter schlägt die Stimmgabel an und setzt sie mit ihrem Stiel auf den Tisch, während der andere die Saite in ihrer Mitte wenig zupft, sie allmählich, den Wirbel links herum drehend, von kg zu kg immer mehr spannend, bis bei einer Spannung von einer vollen Anzahl Kilogrammen die Saite zum erstenmal einen höheren Ton gibt als die Stimmgabel. Dann wird die Spannung der Saite wieder um 1 kg vermindert und die abgelesene*) Spannung Q (in kg) in die erste Zeile der Tabelle eingetragen. Der Ton der Saite muß jetzt tiefer sein als der der Stimmgabel.

d) Mit Hilfe des Steges wird die Saite so lange verkürzt, bis dem Ohre der Ton der Saite dem der Stimmgabel gleich zu sein scheint.

e) Eine ziemlich genaue Übereinstimmung beider Töne erzielt man dadurch, daß man auf die Mitte der Saite ein Papierreiterchen setzt, die Stimmgabel anschlägt, sie mit ihrem Stiel auf das Monochord setzt und den Steg so lange wenig hin und her schiebt, bis der Reiter abspringt. Ist die Einstellung*) der Federwage noch richtig?

f) Ob man wirklich genaue Übereinstimmung beider Töne erzielt hat, erkennt man zum Schluß folgendermaßen: Man schlage die Stimmgabel an, setze sie mit ihrem Stiel auf das Monochord und halte kurz darauf ihre Zinken mit der anderen Hand fest. Hört man dann die Saite tönen, so ist die Einstellung genau genug. Die Länge l der Saite (bis zum Steg) wird abgelesen und ebenfalls in

*) Federwage klopfen!



die erste Zeile der Tabelle eingetragen. Ist die Einstellung*) an der Federwage noch richtig?

g) Man verringere jetzt die Spannung der Saite um 1 kg und verkürze die Saite, bis beide Töne wieder Übereinstimmung zeigen, die man wie oben nachweist. Die so erhaltenen Werte von Q und l kommen in die zweite Zeile der Tabelle.

h) Noch ein zweites Mal vermindere man die Spannung der Saite um 1 kg, um ein drittes Wertepaar von Spannung und Saitenlänge zu erhalten, das in die dritte Zeile der Tabelle eingetragen wird.

D. Berechnung.

a) Den Ton bzw. die Schwingungszahl einer Saite erhält man aus der Taylorschen Gleichung

$$n = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{P}{m}},$$

in der n die Schwingungszahl der Saite,
l ihre Länge (in Zentimetern),
P ihre Spannung (in Dynen) und
m das Gewicht eines Zentimeters der Saite (in Grammen) bedeutet.

b) l und m sind bereits bestimmt. Wie erhält man aus der abgelesenen Anzahl (Q) Kilogrammen die Spannung (P) in Dynen?

c) Man setze außer m die drei Wertepaare von P und l in die Gleichung ein und nehme aus den drei so erhaltenen Werten von n das Mittel. Dieser Wert ist dann zugleich die Schwingungszahl der Stimmgabel.

Zubehör: Federwage, Schreibpapier, Schere, Schale, Gewichte bis 11 kg, harter Bleistift, Monochord, Stahldraht, Beißzange, zwei Flachzangen, Maßstäbe, Wage mit Gewichten, Schrot, Stimmgabel, Papierreiter.

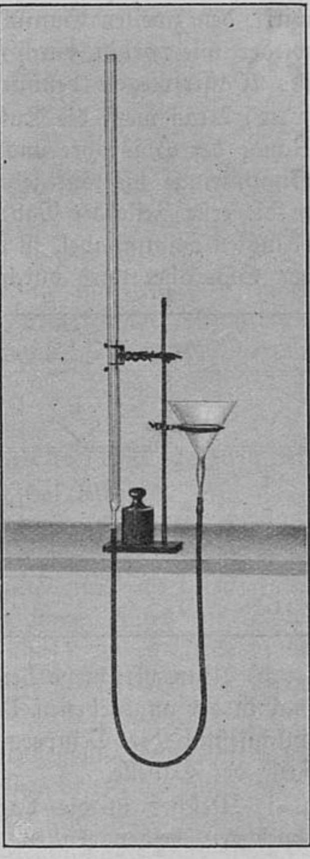
---

*) Federwage klopfen!

3. Die Geschwindigkeit des Schalles in Luft mit der Resonanzröhre zu bestimmen.

a) Vom Bunsenschen Gestelle nehme man den Ring ab, lege ihn auf den Tisch und führe den langen Gummischlauch durch ihn hindurch. Dann befeuchte man die sich verjüngenden Ansätze der Resonanzröhre und des Glastrichters und ziehe die Enden des Schlauches über beide Ansätze hinüber. Beide Schlauchenden werden sorgfältig festgebunden.

b) Nachdem man über die Resonanzröhre zwei Gummiringe gestreift hat, befestige man die Röhre und den Trichter in senkrechter Stellung so an dem Stative, wie es die Abbildung zeigt. Ein auf die Stativplatte gesetztes Gewicht verhütet ein Umkippen der ganzen Vorrichtung. Den Schlauch läßt man herabhängen.



c) Jetzt bringe man den Trichter so tief und die Röhre so hoch, daß sich der Rand des Trichters nur ungefähr 5 cm höher befindet als das untere Ende der Resonanzröhre. In den Trichter gieße man Wasser, bis es auch in der Röhre aufsteigt. Zunächst verhindert zwar die im Schlauche abgesperrte Luft den Ausgleich, doch läßt sich diese leicht durch Zusammendrücken des Schlauches entfernen. Daß sämtliche Luft entfernt ist, erkennt man daran, daß das Wasser in der Röhre und im Trichter gleich hoch steht.

d) Der Trichter wird jetzt so hoch gebracht und die Röhre so tief herabgezogen, daß das Wasser in ihr nur noch wenige Zentimeter vom oberen Rande entfernt ist. Der eine Beobachter schlägt die Stimmgabel*) an und hält sie ziemlich dicht so über das obere Ende der Glasröhre, daß die Zinken in der Richtung der Röhrenachse schwingen; doch hat er sehr darauf zu achten, daß die Gabel das Glas **nicht** berühre.

*) Die Stimmgabel ist **durchaus vor Feuchtigkeit zu schützen.** Sie darf nur mit ganz trockenen Händen berührt werden.

Der andere Beobachter senkt durch Hinabgehen mit dem Trichter den Wasserstand so lange, bis er ein lautes Mittönen der Luftsäule in der Röhre hört. Der so ermittelte Wasserstand in ihr wird durch den oberen der beiden Gummiringe bezeichnet.

e) Eine scharfe Einstellung des Gummiringes erreicht man dadurch, daß man den Wasserspiegel durch vorsichtiges Heben und Senken des Trichters mehrmals langsam über die bezeichnete Stelle wandern läßt und beobachtet, ob sowohl beim Sinken als auch beim Steigen des Wassers der entstehende Resonanzton gerade in dem Augenblick sein Maximum hat, wo sich der Wasserspiegel in der Höhe des Gummiringes befindet.

f) Man senke jetzt den Wasserspiegel in der Glasröhre weiter, bis wiederum ein lauter Resonanzton hörbar wird, und bringe an der Stelle, wo jetzt der Wasserspiegel das Maximum des Tones bewirkt, den zweiten Gummiring an. Seine endgültige Stellung wird wieder, wie vorhin, durch mehrmaliges langsames Senken und Heben des Wasserspiegels bestimmt.

g) Man messe die Entfernung e_1 des oberen Gummiringes vom Rande der Glasröhre und die gegenseitige Entfernung e der beiden Gummiringe bis auf zehntel Zentimeter und trage beide Größen in die erste Zeile der Tabelle ein. Auch n, die Schwingungszahl der benutzten Stimmgabel, ist anzugeben. Die Temperatur t der Luft in der Glasröhre wird durch ein eingesenktes Thermometer bestimmt.

n =							
	e_1	e	t	Fehler von e_1	λ_t	c_t	c_0
1							
2							
3							
						Mittel:	

h) Man verschiebe beide Gummiringe und stelle sie noch zweimal in der angegebenen Weise ein. Die so erhaltenen Ablesungen, einschließlich der Temperaturen, kommen in die zweite und dritte Zeile der Tabelle.

i) Welches ist die Lage der Knoten und Bäuche in den beobachteten beiden Fällen von Resonanz? Betrachte die folgenden

Figuren, in denen statt der longitudinalen stehenden Luftwelle eine transversale gezeichnet ist. Der wievielte Teil einer Wellenlänge ist e_1 und e? Der wievielte Teil von e müßte demnach e_1 sein? Weshalb weisen die Messungen dieses Verhältnis nicht genau auf? Um wieviel ist e_1 zu klein gefunden worden? Trage diesen Fehler von e_1 in die Tabelle ein.

k) Berechne aus e die Wellenlänge λ_t, d. h. die Wellenlänge des benutzten Tones bei der Zimmertemperatur t, und trage λ_t in die Tabelle ein.

l) Versteht man unter c_t die Geschwindigkeit des Schalles in Luft von der Temperatur t, so gilt die Gleichung

$$c_t = n\lambda_t.$$

Berechne aus ihr c_t.

m) Um hieraus c_0, d. h. die Geschwindigkeit des Schalles in Luft bei 0^0 zu finden, dient die Gleichung

$$c_t = c_0 \cdot \sqrt{1 + \alpha t},$$

in der $\alpha = 0{,}004$ zu setzen ist. Berechne c_0 und trage es, wie c_t, in die Tabelle ein.

n) Nimm aus den drei Werten von c_0 das Mittel.

Zubehör: Bunsensches Gestell mit Ring und großer Klemme, langer Gummischlauch, Resonanzröhre, Glastrichter, Bindfaden, Gummiringe, Gewicht, Wassertopf, Stimmgabel, Maßstab, Thermometer.

4. Die Geschwindigkeit des Schalles in Glas und Messing mit der Kundtschen Röhre zu bestimmen.

A. Aufstellung des Apparates.

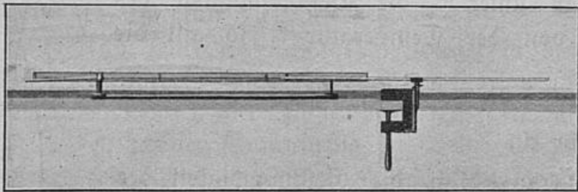
a) Die Kundtsche Röhre wird mit Hilfe eines an einen Faden gebundenen Wattebausches, der ziemlich streng durch die Röhre gehen soll, gut getrocknet, indem man ihn mehrere Male in der gleichen Richtung langsam durch die Röhre zieht. Über die Röhre werden zwei Gummiringe gestreift.

b) Dann halte man die Röhre unter einem Winkel von ungefähr 45^0 schräg nach unten und schütte einen viertel bis einen halben Teelöffel Korkstaub hinein. Durch öfteres Aufrichten und Neigen der Röhre versucht man, eine möglichst gleichmäßige Verteilung des

Korkstaubes zu erzielen. Hat man dies erreicht, so lege man die Röhre wagerecht in ihre Lager zurück. Das eine Ende der Röhre wird durch den verschiebbaren, an einem kurzen Holzstiele befestigten Korkstöpsel verschlossen.

c) Man lege den beigegebenen Glasstab auf einen Meterstab, messe seine ganze Länge l′ und bringe den kurzen Gummischlauch auf ihm genau in seine Mitte.

d) In einem am Tische zu befestigenden eisernen Kloben wird der Glasstab da, wo sich der Gummischlauch befindet, also in seiner Mitte, eingeklemmt (Vorsicht!). Die Kundtsche Röhre wird mitsamt ihrem Lager verschoben, bis sie über das mit der Korkscheibe versehene Ende des Glasstabes so weit hinüberreicht, wie es die Abbildung zeigt. Der Glasstab soll sich genau in der Achse der Röhre befinden.

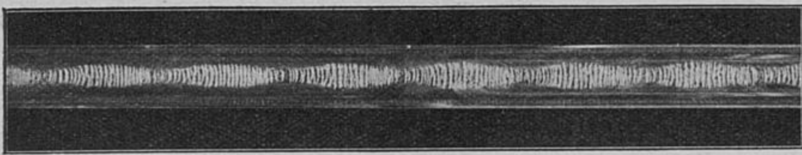


B. Welche Wellenlänge in Luft hat der Longitudinalton des Glasstabes?

a) Die beiden Beobachter stellen sich an den beiden Enden des so zusammengesetzten Apparates auf. Der eine reibt mit einem nassen Tuche den Glasstab von der Mitte nach dem freien Ende zu, ohne dabei das Tuch zu sehr an den Stab anzudrücken, es vielmehr ziemlich lose zwischen Daumen und Zeigefinger haltend. Nach einigen Versuchen gelingt die Erzeugung eines hohen, gleichmäßig reinen Tones leicht.

b) Der andere Beobachter verschiebt versuchsweise den Stöpsel wenig, höchstens einige Zentimeter, hin und her, bis einer der erzeugten Töne den Korkstaub in stehenden Wellen anordnet. Es ist dabei für die Entstehung schön ausgebildeter Staubfiguren von Vorteil, wenn der Korkstaub nicht am Boden der Röhre liegt, sondern durch Drehen der Kundtschen Röhre um ihre Achse etwas gehoben wird.

c) Ist die Figur zur Zufriedenheit ausgefallen, so werden die beiden Gummiringe über zwei möglichst weit voneinander entfernt liegende, aber noch scharf erkennbare Knoten (oder über zwei eben-



solche Bäuche) gebracht, und die Anzahl der zwischen ihnen liegenden halben Wellen gezählt. Die Kundtsche Röhre wird behutsam aus ihrem Lager genommen, ohne daß man die Gummiringe verschiebt, und auf den Maßstab gelegt, mit dessen Hilfe die Entfernung beider Ringe bis auf zehntel Zentimeter gemessen wird. Ein in das Rohr geschobenes Thermometer gibt die Temperatur t_1 an. Ist p die Anzahl der halben Wellen zwischen den Gummiringen, $\frac{\lambda}{2}$ die Länge einer halben Staubwelle, also auch die der Luftwelle im Rohre, und a die Entfernung beider Gummiringe (λ und a in Zentimetern gemessen), so gilt die Gleichung $p \cdot \frac{\lambda}{2} = a$.

d) Durch Klopfen wird, nachdem das Thermometer entfernt worden ist, die Staubfigur zerstört. Die Röhre bringt man in ihr Lager zurück, setzt den Apparat wieder zusammen und verschiebt beide Gummiringe. Noch zweimal werden jetzt in der angegebenen Weise die Figuren erzeugt, die Gummiringe eingestellt und ihre Entfernungen b und c sowie die Anzahl (r und s) der zwischen ihnen liegenden halben Wellen bestimmt, wodurch man zwei der oben angegebenen Gleichung entsprechende erhält. Auch die zugehörigen Temperaturen t_2 und t_3 werden gemessen. Sämtliche gemessenen Größen werden in der nebenstehenden Tabelle zusammengestellt.

Glasstab*)		
„Ein-Strich“		
1	$p \cdot \frac{\lambda}{2} = a$	$t_1 =$
2	$r \cdot \frac{\lambda}{2} = b$	$t_2 =$
3	$s \cdot \frac{\lambda}{2} = c$	$t_3 =$
	$(p + r + s) \cdot \frac{\lambda}{2} = a + b + c$	$t =$
	$\frac{\lambda}{2} =$	$l =$
	$c =$	$n =$

*) Alle sich auf den Versuch mit dem Glasstab beziehenden Größen erhalten den oberen Zeiger „Ein-Strich“.

C. Welche Wellenlänge in Luft hat der Longitudinalton des Messingstabes?

a) Man entferne den Glasstab aus dem Kloben, lege den beigegebenen Messingstab auf den Maßstab, messe seine ganze Länge l'' und befestige ihn genau in seiner Mitte im Kloben in derselben Lage wie vorher den Glasstab. Die Kundtsche Röhre wird wieder über das Ende des Stabes geschoben, das die Korkscheibe trägt.

Messingstab*)		
„Zwei-Strich"		
1.	$p \cdot \frac{\lambda}{2} = a$	$t_1 =$
2.	$r \cdot \frac{\lambda}{2} = b$	$t_2 =$
3.	$s \cdot \frac{\lambda}{2} = c$	$t_3 =$
$(p + r + s) \cdot \frac{\lambda}{2} = a + b + c$		$t =$
$\frac{\lambda}{2} =$		$l =$
$c =$		$n =$

b) Der Messingstab wird dadurch zum Tönen gebracht, daß man ihn mit einem in gepulvertes Kolophonium getauchten Lappen oder auch nur mit den in Kolophonium getauchten Fingerspitzen reibt.

c) Wie beim Glasstabe stelle man drei Versuche an, deren Ergebnisse man ebenso wie bei jenem in einer Tabelle zusammenstelle. Man versäume nicht die Messung der Temperaturen.

D. Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Glas und in Messing.

a) Wieviel Wellen in Glas (oder in Messing) gehen auf die Länge des geriebenen Stabes, der in der Mitte festgeklemmt ist, der also an den freien Enden je einen Schwingungsbauch hat?

Betrachte die Figur, in der statt der stehenden longitudinalen Welle die entsprechende transversale gezeichnet ist. Welche Größe hat also $\frac{\lambda}{2}\left(\frac{\Lambda}{2}\right)$, wenn $\lambda (\Lambda)$ die Wellenlänge im Glasstabe (im Messingstabe) bedeutet.

---

*) Alle sich auf den Versuch mit dem Messingstab beziehenden Größen erhalten den oberen Zeiger „Zwei-Strich".

b) Bedeutet ferner:

$c'(c'')$ die Schallgeschwindigkeit in Glas (in Messing),

$n'(n'')$ die Schwingungszahl des verwendeten Tones und

$c_{t'}(c_{t''})$ die Schallgeschwindigkeit in Luft bei der Temperatur $t'(t'')$, dem Mittel aus den gemessenen drei Temperaturen, so gelten die Gleichungspaare:

I. für den Versuch mit dem Glasstabe:

1. $c' = n'\lambda$ für Glas,
2. $c_{t'} = n'\lambda'$ für Luft;

II. für den Versuch mit dem Messingstabe:

1. $c'' = n''\Lambda$ für Messing,
2. $c_{t''} = n''\lambda''$ für Luft.

Warum hat n' im ersten und n'' im zweiten Gleichungspaare denselben Wert?

c) Man dividiere die Gleichungen jedes Paares durcheinander, setze $c_t = 33100\sqrt{1 + \alpha t}$ (s. die vorige Übung) und für das Verhältnis der ganzen Wellenlängen das der halben.

d) $\frac{\lambda'}{2}\left(\frac{\lambda''}{2}\right)$ findet man, indem man (s. die Tabelle) die drei für $\frac{\lambda'}{2}\left(\frac{\lambda''}{2}\right)$ geltenden Gleichungen addiert und die entstehende durch den Faktor $(p + r + s)$ dividiert. Berechne die einzige Unbekannte $c'(c'')$ und trage ihren Wert gleichfalls in die Tabelle ein.

E. Welches ist die Höhe des benutzten Tones?

a) Berechne aus den unter D, b angegebenen Gleichungen die Schwingungszahlen n' des Glasstabes und n'' des Messingstabes. Wie läßt sich die Berechnung auf ihre Richtigkeit prüfen? Trage n' und n'' in die Tabellen ein.

b) Bestimme die musikalischen Benennungen der beiden benutzten Töne mit Hilfe der Tabelle auf Seite 16 der Schülkeschen Logarithmentafel.

Zubehör: Kundtsche Röhre mit Stöpsel, Doppellager, Watte, Faden, Gummiringe, Korkstaub, Glasstab, Messingstab, nasses Tuch, wollener Lappen, Kolophonium, Maßstab, Thermometer, eiserner Kloben.

5. Die Geschwindigkeit des Schalles in Kohlendioxyd und in Leuchtgas mit der Kundtschen Röhre zu bestimmen.

A. Bestimmung der Wellenlänge eines Stabtones in **Luft.**

a) Die Kundtsche Röhre wird, wie in der vorigen Übung angegeben ist, mit Hilfe eines Wattebausches gut getrocknet. Sie wird mit Korkstaub beschickt, auf ihr Lager gelegt und an einem Ende mit dem verschiebbaren Stöpsel und am anderen mit dem Korken verschlossen, der die Mitte eines Glasstabes festhält. Über die Röhre sind zwei Gummiringe zu streifen.

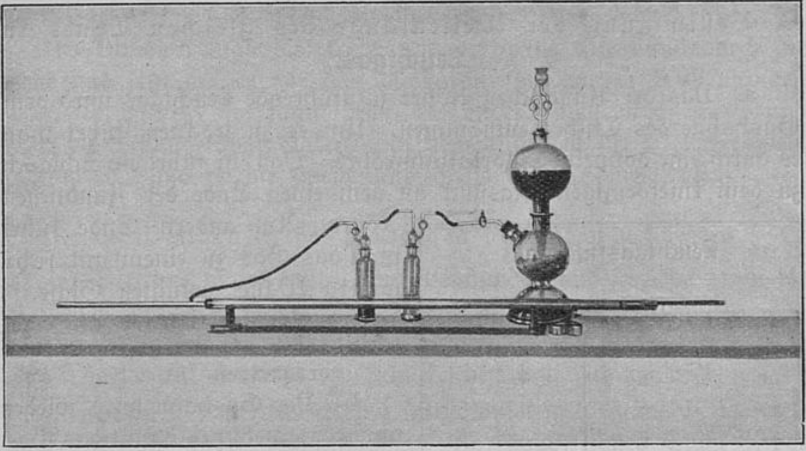
b) Durch Reiben mittelst eines nassen Tuches bringt man den Glasstab zum Tönen. Durch Verschieben des Stöpsels wird sich auch hier bald die Bildung einer guten Staubfigur erreichen lassen. Der Versuch wird dreimal angestellt und jedesmal die ganze Länge einer möglichst zahlreichen Folge von Wellen gemessen, um daraus $\frac{\lambda'}{2}$, die Länge einer halben Welle des benutzten Tones in Luft, zu berechnen. Auch hier versäume man nicht die Messung der zugehörigen Temperaturen, um aus ihnen das Mittel t′ zu nehmen. Die Messungen sind in Tabellenform aufzuschreiben.

Luftfüllung*)	
„Ein-Strich“	
$p \cdot \frac{\lambda}{2} = a$	$t_1 =$
$r \cdot \frac{\lambda}{2} = b$	$t_2 =$
$s \cdot \frac{\lambda}{2} = c$	$t_3 =$
$\frac{\lambda}{2} =$	$t =$
$c_0 = 33100$	$n =$

B. Bestimmung der Wellenlänge desselben Tones in **Kohlendioxyd.**

a) Von einem Kippschen Apparat für die Entwicklung von Kohlendioxyd führe man dieses Gas, um es von der mitgerissenen Säure zu befreien, durch eine mit Wasser gefüllte Waschflasche und von dieser durch eine gleiche, mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllte, um es hierin zu trocknen. Von hier führt es ein Schlauch weiter zu dem knieförmig gebogenen Rohre, von dem es in das Innere der Kundtschen Röhre gelangt. Am andern Ende der Röhre führt man das austretende Gas, um die Geschwindigkeit seines Durchgangs durch die Röhre beobachten zu können, aus dem an die

*) Alle Größen, die sich auf den Versuch mit der mit **Luft** gefüllten Röhre beziehen, erhalten den oberen Zeiger „Ein-Strich“.



Röhre angeschmolzenen Glasansatze in ein mit wenig Wasser gefülltes Glas.

Vor dem Öffnen des Hahnes ist der ganze Aufbau vorzuzeigen.

b) Der Hahn des Kippschen Apparates wird wenig geöffnet, d. h. nur so weit, daß man die einzelnen durch die Waschflaschen tretenden Gasblasen noch deutlich voneinander unterscheiden kann. Man lasse den Gasstrom die in der Röhre vorhandene Luft vollständig verdrängen und schließe, wenn man davon überzeugt ist, daß die Kundtsche Röhre nur Kohlendioxyd enthält, den Hahn so weit, daß aus ihr in jeder Sekunde ungefähr eine Gasblase austritt.

Kohlendioxydfüllung*)	
„Zwei-Strich"	
$p \cdot \frac{\lambda}{2} = a$	$t_1 =$
$r \cdot \frac{\lambda}{2} = b$	$t_2 =$
$s \cdot \frac{\lambda}{2} = c$	$t_3 =$
$\frac{\lambda}{2} =$	$t =$
$c_0 =$	$n =$

c) Durch Reiben des Glasstabes mit dem nassen Tuche und Verschieben des Stöpsels am andern Ende (den Gasausfluß nicht absperren!) erzeugt man, wie vorhin, die Staubfiguren dreimal, mißt wieder die Größen p, r, s; a, b, c; t_1, t_2, t_3 und berechnet aus ihnen $\frac{\lambda}{2}$ und t. Gashahn schließen!

*) Alle Größen, die sich auf den Versuch mit der Kohlendioxydfüllung beziehen, erhalten den oberen Zeiger „Zwei-Strich".

C. Bestimmung der Wellenlänge des gleichen Tones in Leuchtgas.

a) Das der Kundtschen Röhre zuzuführende Leuchtgas wird dem Gashahne des Tisches entnommen. Um es zu trocknen, führt man es durch eine doppelte Chlorkalziumröhre. Von ihr führt ein Schlauch zu dem knieförmigen Glasstück an dem einen Ende der Kundtschen Röhre. Am andern Ende führt man das Gas zu einem mit sehr wenig Wasser gefüllten Glase.

Leuchtgasfüllung*)	
„Drei-Strich"	
$p \cdot \frac{\lambda}{2} = a$	$t_1 =$
$r \cdot \frac{\lambda}{2} = b$	$t_2 =$
$s \cdot \frac{\lambda}{2} = c$	$t_3 =$
$\frac{\lambda}{2} =$	$t =$
$c_0 =$	$n =$

Vor dem Öffnen des Gashahnes ist der ganze Aufbau vorzuzeigen.

b) Der Gashahn wird wieder nur wenig geöffnet, damit das Gas beim Hinstreichen über das Chlorkalzium auch vollständig getrocknet werde. Ist man sicher, daß die Kundtsche Röhre nur Leuchtgas enthält, ersetze man das Glas mit Wasser, in dem man das Aufsteigen der Gasblasen verfolgt hat, durch einen Gasbrenner, an dem man das Gas entzünde. Die Flamme wird ziemlich klein gedreht. Doch halte man eine zweite Flamme bereit, um an ihr die erste wieder entzünden zu können, falls sie später durch den erzeugten Ton ausgelöscht worden sein sollte.

c) Durch Reiben des Glasstabes mit dem nassen Tuche und Verschieben des Stöpsels am anderen Ende (den Gasausfluß nicht absperren!) erzeugt man, wie vorhin, die Staubfiguren dreimal, mißt wieder die Größen p, r, s; a, b, c; t_1, t_2, t_3 und berechnet aus ihnen $\frac{\lambda}{2}$ und t. Gashahn schließen!

D. Berechnung der Schallgeschwindigkeit in beiden Gasen.

a) Für die unter A, B und C gemessenen Größen gelten folgende Gleichungen:

1. für Luft: $c_0' \sqrt{1 + \alpha t'} = n \lambda'$,
2. für Kohlendioxyd: $c_0'' \sqrt{1 + \alpha t''} = n \lambda''$ und
3. für Leuchtgas: $c_0''' \sqrt{1 + \alpha t'''} = n \lambda'''$.

*) Alle Größen, die sich auf den Versuch mit der Leuchtgasfüllung beziehen, erhalten den oberen Zeiger „Drei-Strich".

Warum hat n in allen Gleichungen denselben Wert?

b) Dividiert man die zweite und die dritte Gleichung durch die erste und setzt wieder für das Verhältnis der ganzen Wellenlängen das der halben, so kann man die unbekannten Größen c_0'' und c_0''', die Schallgeschwindigkeiten in beiden Gasen bei 0°, berechnen. c_0'' und c_0''' sind in die zweite und dritte Tabelle einzutragen.

E. Welches ist die Höhe des benutzten Tones?

a) Berechne n aus allen drei Gleichungen und schreibe es in die Tabellen ein.

b) Bestimme die musikalische Benennung des Tones mit Hilfe der Tabelle auf Seite 16 der Schülkeschen Logarithmentafel.

Zubehör: Kundtsche Röhre mit Stöpsel und Glasstab, Doppellager, Watte, Faden, Gummiringe, Korkstaub, nasses Tuch, Kippscher Apparat, Gummischläuche, Waschflaschen mit Wasser und Schwefelsäure, Chlorkalziumröhre, zwei Gasbrenner.

Sechste Abteilung:

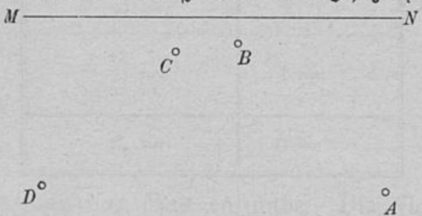
Optik.

1. Der ebene Spiegel.

A. Das Reflexionsgesetz.

a) Man spanne auf das Reißbrett einen Zeichenbogen nach der in Abteilung III, Nr. 4 (Kraftlinienbilder) Seite 14 angegebenen Weise.

b) Mit Hilfe der Reißschiene, deren Kopf man an die linke kurze Seite des Reißbrettes anlegt, ziehe man mit einem harten, gut angespitzten Blei auf der unteren Hälfte des Bogens ungefähr 15 cm von seinem Rande entfernt eine zu den Längsseiten parallele Gerade von annähernd 25 cm Länge.



c) Man stelle den Spiegel, ohne die spiegelnde Ebene mit den Fingern zu berühren, so auf den Bogen, daß die gezeichnete Gerade genau in die Ebene des Spiegels fällt.

d) Ungefähr 2 cm vor der Mitte des Spiegels steche man eine Nadel B genau senkrecht durch den Bogen in das Brett und setze eine zweite Nadel A ungefähr 10 cm vor dem Spiegel ebenfalls senkrecht so ein, daß die gemeinsame Ebene der beiden Nadeln A und B mit der Spiegelebene einen Winkel von ungefähr 45° bildet.

e) Man suche mit dem rechten Auge die Spiegelbilder A′ und B′ der Nadeln A und B und bringe das Auge in eine solche Lage, daß A′ von B′ verdeckt wird. Eine dritte Nadel C setze man jetzt ungefähr 2 cm vor dem Spiegel so ein, daß sie die beiden Spiegelbilder A′ und B′ verdeckt, indem man hauptsächlich die richtige Lage der drei Fußpunkte prüft. Man bezeichne den Fußpunkt von C durch einen kleinen Bleistiftkreis, entferne die Nadel C und setze eine vierte Nadel D ungefähr 10 cm vor dem Spiegel ebenfalls so ein, daß sie wie C die Spiegelbilder A′ und B′ verdeckt.

f) Nachdem man noch die Fußpunkte der drei Nadeln A, B und D durch Kreise bezeichnet hat, entferne man die Nadeln und den

	α	β	$\alpha - \beta$
1			
2			
3			
		Mittel:	

Spiegel vom Reißbrett und zeichne so genau wie möglich die Geraden AB und CD bis etwas über ihren Schnittpunkt mit der Geraden MN. Wo liegt der Schnittpunkt O von AB und CD?

g) In diesem Schnittpunkt errichte man mit Hilfe der Reißschiene und eines rechtwinkligen Dreiecks auf der Geraden MN die Senkrechte OP (Einfallslot). Mit einem Winkelmesser werden jetzt der Winkel AOP $= \alpha$ (Einfallswinkel) und der Winkel DOP $= \beta$ (Reflexionswinkel) gemessen und ihre Werte in die erste Zeile obenstehender Tabelle eingetragen.

h) Den Versuch wiederhole man noch zweimal mit einem kleineren und einem größeren Einfallswinkel an anderen Stellen des Zeichenbogens. In die dritte Spalte der Tabelle kommen die Differenzen $\alpha - \beta$ (Vorzeichen!). Man bilde aus diesen drei Differenzen das Mittel.

i) Sprich das so erhaltene Gesetz in Worten aus.

k) Um von den Fehlern des Winkelmessers unabhängig zu sein, bestimme man die sechs Winkel α und β noch auf folgende Weise: Man schlage um O mit einem Radius $r \sim 10$ cm den Kreisbogen, der den einfallenden und den reflektierten Strahl schneidet, und fälle von beiden Schnittpunkten die Lote l_1 und l_2 auf OP.

l) Welche Strecken sind zu messen, um $\sin \alpha$ und $\sin \beta$ berechnen zu können?

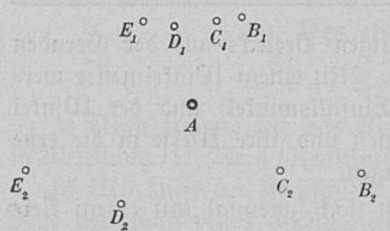
m) Man führe diese Messungen und die Berechnung (Rechenschieber!) aus und trage die gemessenen und die berechneten Werte in folgende Tabelle ein, die dann nach dem Muster der ersten zu vervollständigen ist.

r =	l_1	l_2	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	α	β	$\alpha - \beta$
1							
2							
3							
						Mittel:	

Zubehör: Reißbrett, Reißschiene, Reißnägel, Zeichenbogen, 60°-Dreieck, Bleistift, Stecknadeln, Winkelmesser, ebener Spiegel, Zirkel, Maßstab, Punktiernadel.

B. Lage des Bildes.

a) Man zeichne wieder die Gerade MN und setze den Spiegel so auf den Zeichenbogen, daß MN in die Spiegelebene fällt. Eine Nadel A setze man ungefähr 6 cm vor der Mitte des Spiegels ein.



b) Durch zwei Nadeln B_1 und B_2 lege man rechts von A eine Gerade fest, deren Verlängerung durch das Spiegelbild A′ geht und einen Einfallswinkel von ungefähr 30° besitzt. (Wie kann man, um diesen Einfallswinkel annähernd zu erhalten, das 60°-Dreieck benutzen?) Die Fußpunkte der Nadeln B_1 und B_2 werden umringelt und die Nadeln entfernt.

c) Eine zweite Gerade $C_1 C_2$ (ebenfalls rechts von A, aber mit einem kleineren Einfallswinkel) wird in der gleichen Weise abgesteckt, so daß auch ihre Verlängerung durch A′ geht. Die Fußpunkte der Nadeln C_1 und C_2 werden umringelt und die Nadeln entfernt.

d) In der gleichen Weise werden links von A die beiden Geraden $D_1 D_2$ (s. Fig.) und $E_1 E_2$ abgesteckt. Nachdem auch der Fußpunkt von A durch einen Ring bezeichnet worden ist, werden sämtliche Nadeln und der Spiegel entfernt.

e) Die vier durch die Nadelpaare abgesteckten Geraden werden mit einem spitzen, harten Bleistifte ausgezogen und über die Gerade MN hinaus verlängert. Durch welchen Punkt gehen diese vier Geraden nach unserer Konstruktion?

f) Man fälle von A aus das Lot auf MN. Durch welchen Punkt geht die Verlängerung dieses Lotes? Gib einen geometrischen Ort für die Lage des Spiegelbildes an.

g) Miß die Entfernung d des Gegenstandes A und die Entfernung d′ des Bildes A′ vom Spiegel MN, trage die Größen d und d′ in die erste Zeile nebenstehender Tabelle ein und bilde d — d′ (Vorzeichen!).

	d	d′	d — d′
1			
2			
3			
		Mittel:	

h) Stelle den ganzen Versuch noch zweimal an, trage die hierbei gefundenen Größen ebenfalls in die Tabelle ein und suche aus den drei Werten von d — d' das Mittel. Gib einen zweiten geometrischen Ort für die Lage des Spiegelbildes an.

i) Fasse die Angaben beider geometrischen Örter in einen Satz zusammen.

Zubehör: Wie bei A, doch ohne Winkelmesser und Zirkel.

C. Das Abweichungsverfahren.

a) Sieh durch das Fenster nach dem gegenüberliegenden Hause. Halte den Kopf so, daß der senkrechte Balken F des Fensterkreuzes einen bestimmten Punkt P des gegenüberliegenden Hauses verdeckt.

b) Bringe den Kopf so weit nach rechts, daß diese Deckung aufhört. Welcher von den beiden Gegenständen F und P liegt jetzt rechts vom anderen? Ist dies der nähere oder der entferntere?

c) Bewege den Kopf über die ursprüngliche Lage hinaus nach links. Welcher der beiden Gegenstände F und P liegt links vom anderen? Ist dies der nähere oder der entferntere?

d) Kleide das Ergebnis dieser Untersuchung in Worte.

e) Halte den Zeigefinger der linken Hand ungefähr 50 cm und den Zeigefinger der rechten Hand ungefähr halb so weit vom rechten Auge entfernt (das linke schließen!), so daß der rechte Zeigefinger den linken verdeckt.

f) Bewege den Kopf noch einmal nach rechts und nach links und untersuche, welcher von den beiden Fingern die Bewegung des Auges mitzumachen scheint. Nähere den linken Finger dem rechten und stelle fest, wie lange der linke an der Bewegung des Kopfes scheinbar teilnimmt?

g) Gilt der vorhin aufgestellte Satz auch dann noch, wenn der linke Finger den rechten berührt?

h) Bringe den linken Finger noch näher an das Auge. Welcher Finger (der linke oder der rechte) nimmt jetzt an der Bewegung des Kopfes scheinbar teil? Gilt unser Satz immer noch?

i) Kehre jetzt diesen Satz um. Untersuche, ob er auch in dieser Fassung bei allen Fingerstellungen gilt. Gib ein Erkennungsmittel dafür an, daß sich zwei Gegenstände an derselben Stelle befinden.

D. Eine Anwendung des Abweichungsverfahrens.

a) Man zeichne wieder die Gerade MN und setze den Spiegel so auf den Zeichenbogen, daß MN in die Spiegelebene fällt. Eine

Nadel A setze man ungefähr 6 cm von der Mitte des Spiegels ein und achte besonders darauf, daß diese Nadel genau senkrecht zum Reißbrett steht.

b) Im Spiegel suche man das hinter ihm gelegene Bild A′ der Nadel und setze an diejenige Stelle, an der sich dieses Bild zu befinden scheint, eine zweite Nadel B. Auch bei dieser Nadel prüfe man ganz besonders die genau senkrechte Stellung. A, A′ und B müssen in einer Geraden liegen.

c) Man bewege jetzt den Kopf nach rechts und links, soweit der Spiegel es erlaubt, und stelle fest, ob B oder A′ die Bewegung des Kopfes scheinbar mitmacht. Welcher der beiden Punkte ist nach dem Abweichungsverfahren vom Auge weiter entfernt als der andere?

d) Verbessere den Ort der Nadel B so lange, bis bei einer beliebigen Bewegnng des Auges B und A′ ihre scheinbare gegenseitige Stellung nicht ändern. Was folgt in diesem Falle über den Ort der Nadel B?

e) Nach Umringelung der Fußpunkte der beiden Nadeln A und B entferne man diese und den Spiegel und fälle von A aus das Lot auf die Gerade MN. Durch welchen Punkt geht die Verlängerung dieses Lotes?

f) Miß die Entfernung d des Gegenstandes A und die Entfernung d′ des Bildes B vom Spiegel MN, trage die Größen d und d′ in die erste Zeile der unter B, g angegebenen Tabelle ein und bilde d—d′ (Vorzeichen!).

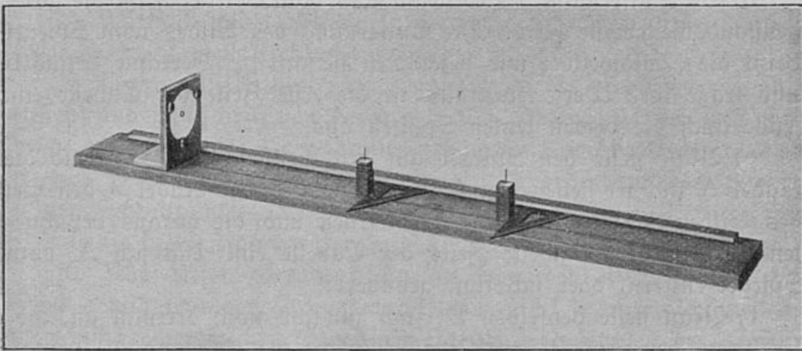
g) Stelle den ganzen Versuch noch zweimal an, trage die hierbei gefundenen Größen ebenfalls in die Tabelle ein und suche aus den drei Werten von d—d′ das Mittel.

Zubehör: Wie bei B.

2. Der Hohlspiegel.

a) Man setze den Hohlspiegel so auf die optische Bank, daß die an ihm befindliche Marke, die den Ort seines Scheitels anzeigt, an dem Teilstrich 80 der Bank steht. Die Nadel A (den „Gegenstand“) stelle man auf den Teilstrich 10 genau vor die Mitte des Spiegels und suche ihr Bild A′. Ist das Bild aufrecht oder umgekehrt? Erscheint es größer oder kleiner als der Gegenstand?

b) Man stelle die Nadel B ungefähr in die Mitte zwischen Spiegel und Gegenstand und vergleiche nach dem Abweichungsverfahren durch seitliche Bewegung des Kopfes die gegenseitige Lage von A′



und B. Hat A′ oder B vom Auge die größere Entfernung? In welcher Richtung muß man B bewegen, damit es an den Ort von A′ gelangt?

c) Man führe die Verschiebung von B in dieser Richtung so lange aus, bis B den Ort von A′ erreicht hat. Wie läßt sich dies nach dem Abweichungsverfahren feststellen? Trage den Ort des Spiegels, die Lage von A und A′ (oder B) in die erste Zeile folgender Tabelle ein.

	Ort des Spiegels	Ort von A	Ort von B und A′	a	b	Bild verkehrt oder aufrecht?	Bild vergrößert oder verkleinert?
1	80	10					
2	70	10					
3	60	10					
4	50	10					
5	40						
6	40	10					
7	50	23					
8	50	25					
9	60	36					
10	30						
11	30	18					
12	30	20					
13	30	22					
14	30	24					
15	30	30					

d) Die Entfernung des Gegenstandes vom Spiegel heißt die „Gegenstandsweite“; sie sei a. Die Entfernung des Bildes vom Spiegel heißt die „Bildweite“; wir bezeichnen sie mit b. Berechne a und b und trage ihre Werte ebenfalls in die erste Zeile der Tabelle ein. Fülle auch die beiden letzten Spalten aus.

e) Man stelle den Spiegel auf den Teilstrich 70, während die Nadel A auf 10 stehen bleibt, suche mit Hilfe der Nadel B den Ort des Bildes A′ und trage die abgelesenen und die daraus berechneten Größen in die zweite Zeile der Tabelle ein. Hat sich A′ vom Spiegel entfernt oder sich ihm genähert?

f) Man stelle denselben Versuch zunächst noch dreimal an, wobei man den Spiegel auf die Teilstriche 60, 50 und 40 bringe. Tabelle ausfüllen: Die Ergebnisse des letzten Versuches kommen in die Zeile 6. Was bemerkt man bei diesem letzten Versuch über die gegenseitige Lage von A und B?

g) Bringe, ohne den Ort des Spiegels zu ändern, die Nadel A in eine solche Entfernung von ihm, daß sich ihr Bild an derselben Stelle befindet, an der sie selbst steht. Warum ist die Benutzung der Nadel B hierbei überflüssig? Trage die Ergebnisse dieses Versuches in die Zeile 5 ein. Was ist größer, der Gegenstand oder sein Bild?

h) Beim Versuche 7 stellen wir den Spiegel auf 50 und die Nadel A auf 23; beim Versuche 8 kommt der Spiegel auf 50 und die Nadel A auf 25; beim Versuche 9 setzen wir den Spiegel auf 60 und die Nadel A auf 36. Tabelle ausfüllen.

i) Für den nächsten Versuch, dessen Ergebnisse in die elfte Zeile kommen, bringen wir den Spiegel auf 30 und die Nadel A auf 18. Fülle zunächst die beiden letzten Spalten in Zeile 11 aus und suche dann mit Hilfe der Nadel B den Ort des Bildes A′. Wie wird das Vorzeichen von b?

k) Da bei den neun ersten Versuchen das Bild umgekehrt ist, während es beim letzten aufrecht erscheint, muß es eine Stellung der Nadel A geben, bei der das eine in das andere übergeht. Man lasse den Spiegel auf 30 stehen und suche diese ausgezeichnete Stellung der Nadel A, wobei man mit dem Auge so weit zurückgehe, wie das Zimmer es erlaubt. Trage die Ergebnisse dieses Versuches in die Zeile 10 ein.

l) Für den 12., den 13. und den 14. Versuch lasse man den Spiegel auf 30 stehen und bringe den Gegenstand A der Reihe nach auf die Teilstriche 20, 22 und 24. Tabelle ausfüllen.

m) Wohin fällt das Bild, wenn der Gegenstand den Spiegel berührt? Fülle die Zeile 15 aus.

n) Weshalb sind wohl die 15 Versuche gerade in dieser Reihenfolge in die Tabelle aufgenommen?

o) Trage auf Millimeterpapier (2 mm) die Größen a als Abszissen und b (Vorzeichen beachten!) als Ordinaten auf und verbinde die Endpunkte der zusammengehörigen Koordinatenpaare durch je eine gerade Linie. Stelle die beiden Koordinaten des gemeinsamen Schnittpunktes dieser fünfzehn (oder vierzehn?) Geraden fest. Vergleiche beide Koordinaten miteinander.

p) Jede dieser Geraden schneidet von der Abszissenachse das Stück a und von der Ordinatenachse das Stück b ab; wie lautet die Gleichung einer solchen Geraden? Da die Koordinaten des gemeinsamen Schnittpunktes, wie die Zeichnung lehrt, einander gleich sind, dürfen wir sie mit dem gleichen Buchstaben (f) bezeichnen. Der Punkt mit den Koordinaten (f, f) liegt also auf jeder der Geraden, seine Koordinaten müssen also jede ihrer Gleichungen befriedigen. Wie heißt dann eine beliebige der Gleichungen? Dividiere beide Seiten der Gleichung durch f.

q) Sprich die so erhaltene Gleichung (Hohlspiegelformel) in Worten aus.

r) Berechne aus ihr die Größe f und setze in den Ausdruck für f die Wertepaare von a und b ein. Benutze dazu den Rechenschieber. Nimm aus den so erhaltenen Werten von f das Mittel. Vergleiche diesen Wert von f mit den Werten von a des zehnten und des fünften Versuches.

s) Sprich das, was der zehnte und fünfte Versuch lehrt, in Worten aus. Benutze dabei für f die Bezeichnung Brennweite.

t) Miß mit dem Sphärometer nach I, 14 den Kugelradius des Hohlspiegels. Wie dort abgeleitet, ist $r = \frac{d^2}{6H} + \frac{H}{2}$, wobei die Bedeutung von d und H an der angeführten Stelle nachzuschlagen ist. Vergleiche r mit den Werten von a in der zehnten und fünften Zeile und mit f. Das Ergebnis des fünften Versuches läßt sich jetzt noch anders in Worte kleiden.

Zubehör: Optische Bank, Hohlspiegel in Holzfuß, zwei Nadeln in Holzfüßen, zwei kleine rechtwinklige Dreiecke, Millimeterpapier (2 mm), Sphärometer mit Glasebene.

3. Der erhabene Spiegel.

a) Man setze den Spiegel so auf die optische Bank, daß die an ihm befindliche Marke, die den Ort seines Scheitels anzeigt, an dem Teilstrich 20 der Bank steht. Die Nadel A (den „Gegenstand") stelle man auf den Teilstrich 10 genau vor die Mitte des Spiegels und suche ihr Bild A′. Ist dies Bild aufrecht oder umgekehrt? Erscheint es größer oder kleiner als der Gegenstand?

b) Mit Hilfe der Nadel B suche man den Ort des Bildes A′ (einen beleuchteten weißen Schirm dahinter stellen!). Den Ort des Spiegels und die Lage von A und A′ (oder B) trage man in die zweite Zeile folgender Tabelle ein:

	Ort des Spiegels	Ort von A	Ort von B und A′	a	b	Bild verkehrt oder aufrecht?	Bild vergrößert oder verkleinert?
1	10						
2	20	10					
3	30	10					
4	40	10					
5	50	10					
6	60	10					
7	70	10					

Berechne in derselben Zeile die Gegenstandsweite a und die Bildweite b, trage ihre Werte ein und fülle auch die beiden letzten Spalten dieser Zeile aus.

c) Man stelle den Spiegel auf den Teilstrich 30, während die Nadel A auf 10 stehen bleibt, suche mit Hilfe der Nadel B den Ort des Bildes A′ und trage die abgelesenen und daraus berechneten Größen in die dritte Zeile der Tabelle ein. Hat sich A′ vom Spiegel entfernt oder sich ihm genähert?

d) Man stelle denselben Versuch noch viermal an, wobei man den Spiegel auf die Teilstriche 40, 50, 60 und 70 bringe (Tabelle ausfüllen: Zeile 4 bis 7).

e) Wohin fällt das Bild, wenn der Gegenstand den Spiegel berührt? Fülle die erste Zeile aus. Weshalb sind die sieben Versuche in dieser Reihenfolge in die Tabelle aufgenommen?

f) Trage auf Millimeterpapier (2 mm) die Größen a und b als Abszissen und Ordinaten (Vorzeichen beachten!) auf und verbinde die Endpunkte der zusammengehörigen Koordinatenpaare durch je eine Gerade. Stelle die beiden Koordinaten des gemeinsamen Schnittpunktes dieser Geraden fest. Vergleiche beide Koordinaten miteinander.

g) Wie lautet die Gleichung einer Geraden, die von der Abszissenachse das Stück a und von den Ordinatenachse das Stück b abschneidet? Da die Koordinaten des gemeinsamen Schnittpunktes, wie die Zeichnung lehrt, einander gleich sind, dürfen wir sie mit dem gleichen Buchstaben (f) bezeichnen. Welche Größe darf man daher für x und y in die vorhin aufgestellte Gleichung einsetzen? Führe diese Einsetzung aus und dividiere die Gleichung durch f.

h) Sprich die so erhaltene Gleichung in Worten aus.

i) Berechne aus ihr die Größe f und setze in den Ausdruck für f die Wertepaare von a und b ein; benutze dazu den Rechenschieber. Nimm aus den Werten von f das Mittel.

k) Wohin fällt das Bild, wenn a unendlich groß wird? f heißt die Brennweite.

l) Miß mit dem Sphärometer nach I, 14 den Kugelradius des Spiegels. Vergleiche r mit f. Kleide dies Ergebnis in Worte.

Zubehör: Optische Bank, erhabener Spiegel in Holzfuß, zwei Nadeln in Holzfuß, zwei kleine rechtwinklige Dreiecke, Schirm, elektrische Lampe, Millimeterpapier (2 mm), Sphärometer mit Glasebene.

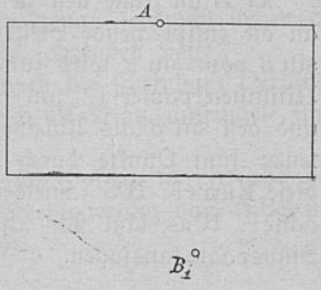
4. Ableitung des Brechungsgesetzes.

a) Man spanne auf das Reißbrett einen Zeichenbogen und ziehe mit Hilfe der Reißschiene auf der unteren Hälfte des Bogens ungefähr 15 cm von seinem Rande entfernt die Gerade MN von etwa 20 cm Länge.

b) Man stelle den Glasklotz so auf den Zeichenbogen, daß die beiden polierten Flächen senkrecht stehen und die Gerade MN genau in die Ebene der vorderen polierten Fläche fällt.

c) Eine Nadel A setze man hinter die Mitte des Glasklotzes genau senkrecht so ein, daß sie in die Ebene der hinteren polierten Fläche fällt.

d) Eine zweite Nadel B_1 (s. Fig.) steche man 1 cm vor dem Glasklotz 0,5 cm rechts von seiner Mitte ebenfalls genau senkrecht ein und prüfe, ob sich der Glasklotz noch genau in seiner vorgeschriebenen Lage befindet und beide Nadeln genau parallel erscheinen.



e) Man bringe das rechte Auge (das linke schließen!) in eine solche Lage, daß die Nadel A von B_1 verdeckt wird. Eine dritte Nadel C_1 setze man jetzt etwa 10 cm vor dem Glasklotz so ein, daß sie die beiden Nadeln verdeckt. Hierbei prüfe man hauptsächlich die richtige Lage der drei Fußpunkte.

f) Man entferne den Glasklotz, bezeichne die Fußpunkte der drei Nadeln durch je einen kleinen Bleistiftkreis und entferne die Nadeln.

g) Man ziehe den Strahl C_1B_1 bis zur Geraden MN, die er im Punkte D_1 schneiden möge. Wie läuft der Strahl im Glase weiter? Ziehe von D_1 aus diesen Strahl (ungefähr 10 cm lang) und errichte in D_1 auf MN die Senkrechte (Einfallslot), nach beiden Seiten ebenfalls etwa 10 cm lang.

h) Miß den Winkel α zwischen dem eintretenden Strahle C_1B_1 und dem Einfallslote (Einfallswinkel) und den Winkel β zwischen dem gebrochenen Strahle D_1A und dem Einfallslote (Brechungswinkel) und trage die Werte von α und β in die erste Zeile folgender Tabelle ein.

	α	β	$\sin\alpha$	$\sin\beta$	$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$
1					
2					
3					
4					
5					
				Mittel:	

i) Den Versuch wiederhole man noch viermal, indem man den Glasklotz und die Nadel A in derselben Weise, aber stets an anderer Stelle des Zeichenbogens aufstellt, während die Nadeln B_2, B_3, B_4 und B_5 (s. Fig. auf d. vor. Seite) zwar auch 1 cm vor dem Glasklotz ihren Platz finden, aber jedesmal 0,5 cm nach rechts rücken, so daß schließlich B_5 2,5 cm rechts von der Mitte des Glasklotzes steht. Die gemessenen Winkel α und β werden in die Tabelle eingetragen.

k) Man trage den zu jedem der zehn Winkel zugehörigen Sinus an die entsprechende Stelle der Tabelle ein. Die Abhängigkeit des $\sin\beta$ vom $\sin\alpha$ wird zunächst graphisch dargestellt, indem man auf Millimeterpapier (2 mm) den $\sin\alpha$ als Ordinate (0,1 als 2 cm) und den $\sin\beta$ als Abszisse (0,1 als 2 cm) aufträgt und die erhaltenen fünf Punkte durch eine Kurve verbindet. Welcher Art ist diese Kurve? Wo schneidet sie die Abszissenachse, wo die Ordinatenachse? Was läßt sich also über das gegenseitige Verhältnis der Sinuspaare aussagen.

l) Berechne fünfmal dieses Verhältnis n, trage die fünf Werte für n ebenfalls in die Tabelle ein und bilde aus ihnen das Mittel.

m) Sprich das so erhaltene Gesetz in Worten aus; benutze dabei für n die Bezeichnung „Brechungsverhältnis".

n) Um von den Fehlern des Winkelmessers unabhängig zu sein, bestimme man die fünf Werte von n noch auf folgende Weise: Man schlage um D mit einem Radius $r \sim 8$ cm den Kreisbogen, der den eintretenden und den gebrochenen Strahl schneidet, und fälle von beiden Schnittpunkten die Lote l_1 und l_2 auf das Einfallslot.

o) Man stelle in den beiden dadurch entstandenen rechtwinkligen Dreiecken einen Ausdruck für $\sin \alpha$ und für $\sin \beta$ auf und dividiere die erhaltenen Gleichungen durcheinander, um das Brechungsverhältnis n zu erhalten. Welche Größe fällt bei der Division fort? Welche beiden Strecken sind also allein zu messen? Führe die Messung aus und trage die erhaltenen zehn Werte in die beiden ersten Spalten nebenstehender Tabelle ein.

	l_1	l_2	n
1			
2			
3			
4			
5			
		Mittel:	

p) Bilde in jeder Zeile das Verhältnis n und nimm aus seinen fünf Werten das Mittel.

Zubehör: Reißbrett, Reißschiene, Reißnägel, Zeichenbogen, rechtwinkliges Dreieck, Bleistift, Stecknadeln, Glasklotz, Zirkel, Winkelmesser, Maßstab, Punktiernadel.

5. Verschiebung eines Strahles durch eine planparallele Platte.

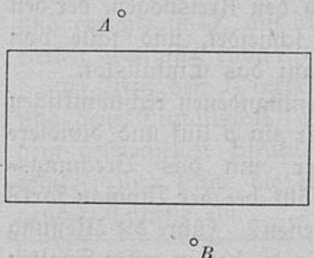
a) Auf dem Zeichenbogen zeichne man mit Hilfe der Reißschiene wieder die Gerade MN und stelle den Glasklotz, wie in der vorhergehenden Übung angegeben, an die Gerade MN.

b) Eine Nadel A setze man in 0,5 cm Entfernung hinter den Glasklotz, und zwar 0,5 cm links von seiner Mitte; eine Nadel B in symmetrischer Weise 0,5 cm vor ihm und 0,5 cm rechts von seiner Mitte. Prüfe, ob beide Nadeln genau senkrecht stehen und parallel erscheinen (s. die Figur auf der folgenden Seite).

c) Eine dritte Nadel C bringe man in die scheinbare Verlängerung von AB ungefähr 10 cm hinter den Glasklotz, umringele ihren Fußpunkt und entferne sie.

d) Eine vierte Nadel D bringe man etwa 10 cm vor dem Glasklotz ebenfalls in die scheinbare Verlängerung von AB, umringele ihren Fußpunkt und entferne sie.

e) Nach Umringelung der Fußpunkte der Nadeln A und B entferne man auch diese. Mit einem sehr spitzen und harten Bleistift zeichne man die Spur PQ der hinteren polierten Ebene des Glasklotzes auf den Zeichenbogen, indem man, ohne den Klotz zu verrücken, an ihm entlang zieht. Man nehme den Klotz vom Reißbrett und zeichne die Gerade PQ mit Hilfe der an das Reißbrett angelegten Reißschiene so lang wie MN.



f) Jetzt zeichne man den Strahl DB, bis er die Gerade MN in E schneidet, und führe den Strahl CA bis zu seinem Schnittpunkt F mit PQ. Welchen Weg nimmt der Strahl im Glase? Zeichne diesen Weg.

g) Verlängere CA bis in die Gegend von D. Was bemerkt man über die gegenseitige Lage von DB und AC? Man zeichne den gegenseitigen Abstand beider Geraden, indem man von E aus das Lot EG = d auf AC fällt. Man messe diesen Abstand.

h) Der Versuch wird noch dreimal wiederholt, wobei man die Nadeln A und B zwar wieder 0,5 cm hinter und vor dem Glasklotz einsetzt, aber jedesmal mit ihnen 0,5 cm nach links bzw. nach rechts geht, so daß sich beim vierten Versuche die Nadel A 2 cm links von der Mitte, die Nadel B 2 cm rechts von der Mitte des Glasklotzes befindet.

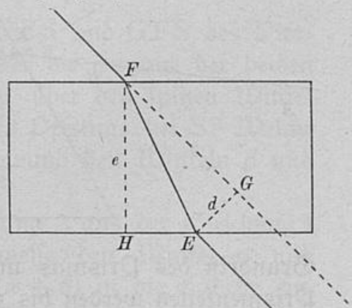
i) Die Ergebnisse dieser vier Versuche werden in die letzte Spalte folgender Tabelle eingetragen.

k) Um die Größe d zu berechnen, verfahre man folgendermaßen: Man errichte in E das Einfallslot, benenne den Einfallswinkel

	e =				
	α	β	$\alpha - \beta$	d berechnet	d beobachtet
1					
2					
3					
4					

zwischen dem Strahle DB und dem Einfallslote mit dem Buchstaben α und den Brechungswinkel zwischen dem gebrochenen Strahle EF und dem Einfallslote mit dem Buchstaben β, und zeichne ferner das Einfallslot FH = e (s. Fig.)

l) Wie groß ist Winkel GFH? Wie groß ist Winkel EFH? Wie groß ist Winkel GFE? Bestimme d als Funktion von EF und dem Winkel $(\alpha - \beta)$. Bestimme EF als Funktion von e und β. Setze diesen Wert von EF in die erste Gleichung ein. Welche Größen sind zu messen, um d berechnen zu können?



m) Zur Messung von e dient die Schublehre (größte Vorsicht!). Die erforderlichen Winkel messe man mit dem Winkelmesser und trage sämtliche zur Berechnung von d gemessenen Größen aus allen vier Figuren in die Tabelle ein. Berechne d viermal, trage auch diese berechneten Werte von d ein und vergleiche sie mit den beobachteten.

Zubehör: Wie bei Nr. 4; außerdem die Schublehre.

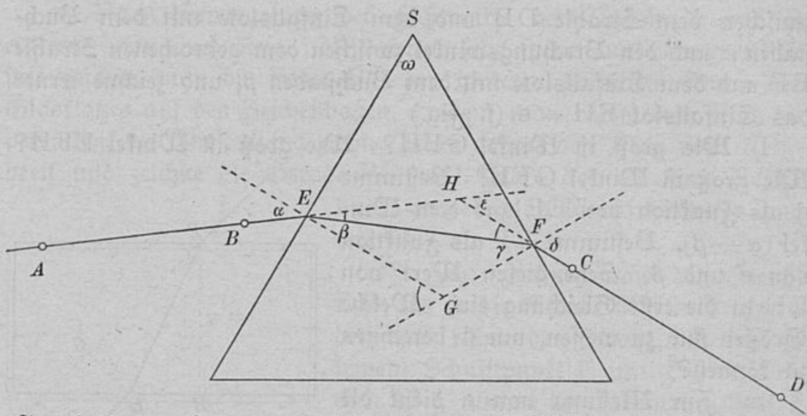
6. Ablenkung eines Strahles durch ein Prisma.

a) Man stelle das Prisma so auf die untere Hälfte des Zeichenbogens, daß die „brechende Kante" vom Beschauer abgewendet und die matte rechteckige Fläche ihm zugekehrt ist. Durch zwei Nadeln A und B lege man einen Strahl fest, der die linke Prismenfläche unter dem Einfallswinkel $\alpha \sim 65^0$ trifft. Wie läßt sich hierzu bequem der beigegebene Papierwinkel von 25^0 benutzen?

b) Eine dritte Nadel C setze man in der Nähe des Prismas rechts von ihm in die scheinbare Verlängerung von AB. Ob man dabei von rechts oder links durch das Prisma blickt, ist an und für sich gleichgültig, doch wähle man diejenige von beiden Sehrichtungen, bei der die Nadeln weniger bunt erscheinen.

c) Nach Umringelung der Nadel C entferne man sie, setze in größerer Entfernung vom Prisma die vierte Nadel D ebenfalls in die scheinbare Verlängerung von AB, umringele ihren Fußpunkt und entferne sie. Die Nadeln A und B werden nach Umringelung ihrer Fußpunkte ebenfalls fortgenommen.

d) Mit einem sehr spitzen, harten Bleistift umfahre man den



Grundriß des Prismas und entferne auch dieses. Die Spuren der Prismenseiten werden bis zu ihrem gemeinsamen Schnittpunkt S verlängert und ebenso die Strahlen AB und CD bis zu ihren Schnittpunkten E und F mit den beiden Prismenflächen. Welchen Weg nimmt der Strahl im Glase? Zeichne diesen.

e) Man errichte in den Punkten E und F die Einfallslote und bringe sie in G zum Schnitt. Miß den Einfallswinkel α des Strahles AB in Luft und ebenso den Einfallswinkel δ des Strahles DC in Luft und trage beide Winkel in die erste Zeile folgender Tabelle ein.

	α	δ	ε gemessen	$\alpha + \delta$	ω	ε berechnet
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

f) Man verlängere den Strahl AB über E und den Strahl DC über F hinaus, bis sich beide in H schneiden. Der spitze Winkel ε bei H stellt den Winkel vor, um den man sich den Strahl AB gedreht denken muß, damit er in die Richtung des Strahles CD fällt. Dieser Winkel ε heißt die „Ablenkung". Miß ε und trage seinen Wert in die dritte Spalte der ersten Zeile ein.

g) Es seien die Winkel GEF $= \beta$ und GFE $= \gamma$. Welchen Wert haben dann die Winkel HEF und HFE? Welchen Wert hat ferner ε als Außenwinkel des Dreiecks HEF? Man fasse in diesem Ausdruck für ε die positiven und die negativen Größen in je einer Klammer zusammen (Gleichung 1).

h) Welche Größe haben die Winkel GES und GFS des Vierecks GESF? Was weiß man daher über die Summe der beiden andern Winkel des Vierecks? Was folgt über den spitzen Winkel bei G und den „brechenden Winkel" ω des Prismas bei S? Welche Beziehung besteht zwischen dem Winkel ω und den Winkeln β und γ? (Gleichung 2.)

i) Man entferne mit Hilfe der Gleichung 2 aus der Gleichung 1 die Winkel β und γ (Gleichung 3), messe den Winkel ω und trage seinen Wert sowie den Wert von $(\alpha + \delta)$ in die Tabelle ein. Man berechne aus Gleichung 3 den Winkel ε und trage seinen Wert in die letzte Spalte der Zeile 1 ein.

k) Wiederhole diesen Versuch noch sechsmal, stets an anderer Stelle des Zeichenbogens, mit den Einfallswinkeln von ungefähr 60^0, 55^0, 50^0, 45^0, 40^0 und 35^0. Benutze dabei, um die vorgeschriebenen Einfallswinkel annähernd zu erhalten, die beigegebenen Papierwinkel. (Wegen der Sehrichtung vergleiche man den gesperrt gedruckten Satz unter b.) Tabelle ausfüllen.

l) Man betrachte in der Tabelle den Verlauf der Ablenkung ε. Was für einen „ausgezeichneten Wert" besitzt ε? Vergleiche die gegenseitige Größe von α und δ vor diesem ausgezeichneten Wert, bei ihm und hinter ihm! Was folgt bei dem ausgezeichneten Wert der Ablenkung ε über die gegenseitige Größe von β und γ?

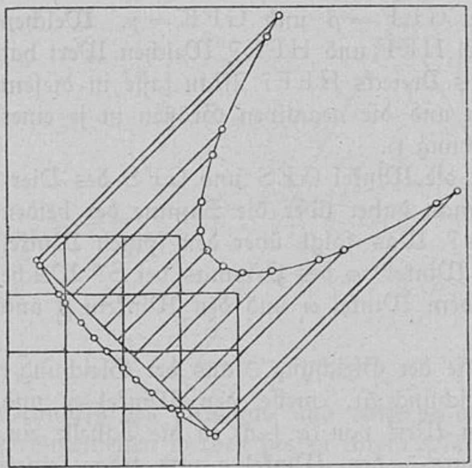
m) Welche Gestalt nimmt hierbei das Dreieck EGF, welche das Dreieck EHF und welche das Dreieck ESF an? Welche Werte erhalten die Winkel SEF und SFE, falls $\omega = 60^0$ ist? Welchen Wert erhalten in diesem Fall β (Gleichung 4) und γ (Gleichung 5)? Welchen Wert erhält dann ε? (Gleichung 6.)

Man sagt in diesem Falle, der Strahl gehe symmetrisch durch das Prisma.

n) Welchen Satz kann man also im Falle des symmetrischen Strahlenganges für die Ablenkung ε aufstellen?

o) Das Minimum der Ablenkung für den Fall des symmetrischen Strahlenganges, d. h. wenn $\alpha = \delta$ ist, läßt sich auch durch folgende Zeichnung deutlich machen:

Man trage auf Millimeterpapier (2 mm) die Größen α als Abszissen (1^0 als 2 mm) und δ als Ordinaten (1^0 als 2 mm) auf



und konstruiere für jedes der sieben Wertepaare von α und δ den zugehörigen Punkt im Koordinatensystem. Da die Richtung des Strahles im Prisma gleichgültig ist, lassen sich in jeder Zeile α und δ vertauschen, und man erhält sieben neue Punkte in der Zeichnung.

p) Man verbinde diese 14 Punkte durch eine Kurve und ziehe diejenige Sehne, die den ersten und letzten Punkt dieser Kurve miteinander verbindet. Zu welcher Geraden liegt die Kurve und ihre Sehne symmetrisch?

q) Man denke sich in jedem der konstruierten 14 Kurvenpunkte auf der Ebene des Koordinatenpapiers eine Senkrechte von der Größe der zugehörigen Ablenkung ε errichtet und verbinde im Geiste die oberen Endpunkte dieser Senkrechten durch eine Kurve. Wo hat diese Kurve ihr Minimum?

r) Um diese Kurve auf das Papier zeichnen zu können, denke man sich sämtliche Senkrechten, die die 14 Ablenkungen darstellen, sowie die Kurve für ε auf eine Ebene projiziert, die auf der Ebene des Koordinatenpapiers senkrecht steht und deren Spur die Sehne ist. Diese Ebene, mit der in ihr enthaltenen Zeichnung, klappe man um die Sehne als Achse um 90^0 in die Ebene des Koordinatenpapiers. Jetzt läßt sich die Ablenkungskurve in folgender Weise zeichnen:

s) Von den 14 Punkten der Kurve fälle man Lote auf die Sehne (welcher Geraden sind diese Lote parallel?) und mache diese Lote jenseits der Sehne gleich ε (1^0 als 1 mm), wobei man, um die Lote nicht unnötig lang machen zu müssen, von ε eine konstante Größe (vielleicht 35^0) subtrahiere. Man erkennt deutlich, daß das Minimum von ε an derjenigen Stelle liegt, an der $\alpha = \delta$ ist.

Zubehör: Reißbrett, Zeichenbogen, Reißnägel, zwei Dreiecke, Prisma, Stecknadeln, Winkelmesser, sieben Papierwinkel, Maßstab, Punktiernadel, Millimeterpapier (2 mm), harter Bleistift.

7. Bestimmung des Brechungsverhältnisses einer Glassorte vermittelst der Minimalablenkung beim Prisma von 60^0.

a) Man zeichne auf den Zeichenbogen einen Winkel von 60^0, schlage um den Scheitelpunkt S mit einem Radius von ungefähr 2 cm einen Kreisbogen, der die Schenkel des Winkels in B und C schneidet, und setze in B und C zwei Nadeln genau senkrecht ein.

b) Man schiebe das Prisma zwischen den Nadeln B und C hindurch, so in den Winkel hinein, daß seine Seitenflächen möglichst dicht an die Schenkel des Winkels herankommen, ihnen genau parallel laufen und die Nadeln B und C vollständig in den Prismenflächen liegen.

c) Durch zwei Nadeln A (links vom Prisma) und D (rechts von ihm) lege man einen Strahl ABCD fest. Wie durchläuft dieser Strahl das Prisma?

d) Nach Entfernung der Nadeln und des Prismas stelle man durch Verlängerung der Strahlen AB und CD den Ablenkungswinkel ε fest.

e) Wiederhole diesen Versuch noch dreimal und nimm aus den vier so erhaltenen Werten von ε das Mittel.

f) Nach dem Brechungsgesetz ist $n = \sin \alpha : \sin \beta$. Man setze hierin für α den aus Gleichung 6 (Seite 37) zu errechnenden Wert und für β seinen Wert aus Gleichung 4 ein (Gleichung 7). Welche Größe allein muß man kennen, um das Brechungsverhältnis n berechnen zu können?

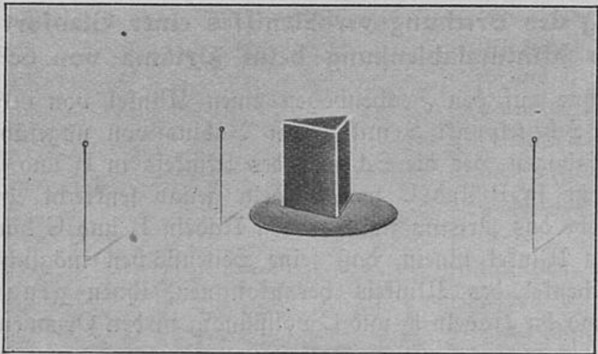
g) Man setze das vorhin bestimmte Mittel von ε in die Gleichung 7 ein.

Zubehör: Reißbrett, Zeichenbogen, Reißnägel, Dreieck, Prisma, Stecknadeln, Winkelmesser, Zirkel, Maßstab, Punktiernadel, harter Bleistift.

8. Bestimmung des Minimums der Ablenkung durch Drehung des Prismas.

a) Nachdem man auf das Reißbrett einen Zeichenbogen gespannt hat, befestige man mit Hilfe eines Reißnagels die kleine Drehscheibe auf dem Reißbrett und setze mit sehr wenig Klebwachs das Prisma in der bekannten Stellung auf die drei Buckel der Drehscheibe.

b) Mit Hilfe eines Papierwinkels und zweier Stecknadeln lege man einen Strahl fest, der die Mitte der linken Prismenfläche unter dem Einfallswinkel $\alpha \sim 65^0$ trifft, und bezeichne diese Stellung der Dreh-



scheibe durch eine Marke auf dem Zeichenbogen, die der Marke auf der Drehscheibe gegenüberliegt.

c) In einer Entfernung von ungefähr 10 cm vom Mittelpunkt der Scheibe bringe man eine dritte Nadel D so an, daß sie in die scheinbare Richtung von AB fällt (nur annähernd einstellen!).

d) Man drehe die Scheibe langsam links herum, ohne das Auge aus der Richtung AB zu entfernen, und beobachte das scheinbare Wandern der Nadel D, bis sie ganz aus dem Gesichtsfeld verschwunden ist. Beschreibe diese Wanderung!

e) Man führe die Drehscheibe in die ursprüngliche Lage (rechts herum) zurück, versetze die Nadel D um einige Millimeter links herum und beobachte bei einer erneuten Prismendrehung das scheinbare Wandern der Nadel. Was bemerkt man jetzt über die scheinbare Abweichung dieser Nadel nach rechts?

f) In dieser Weise fahre man mit der Versetzung der Nadel D so lange fort, bis sie bei der gleichen Prismendrehung nicht mehr auf der rechten Seite der scheinbaren Verlängerung von AB auftritt, aber doch noch, von links kommend und nach links verschwindend, bis in die genannte Richtung zu fallen scheint. Die Nadel wird umringelt und entfernt.

g) Mit einer vierten Nadel C stelle man den gleichen Versuch an, nur setze man sie in einer Entfernung von ungefähr 4 cm vom Mittelpunkt der Drehscheibe in das Papier, umringele die Nadel und entferne sie.

h) Nachdem man auch die Fußpunkte von A und B gekennzeichnet und beide Nadeln sowie das Prisma und die Drehscheibe vom Reißbrette entfernt hat, ziehe man den eintretenden Strahl AB und den austretenden Strahl CD sorgfältig mit einem spitzen, harten Bleistifte aus, bringe sie dadurch zum Schnitt und messe ihren Richtungsunterschied. Welchen Winkel stellt dieser Richtungsunterschied dar?

i) Den gleichen Versuch stelle man noch dreimal (stets an anderen

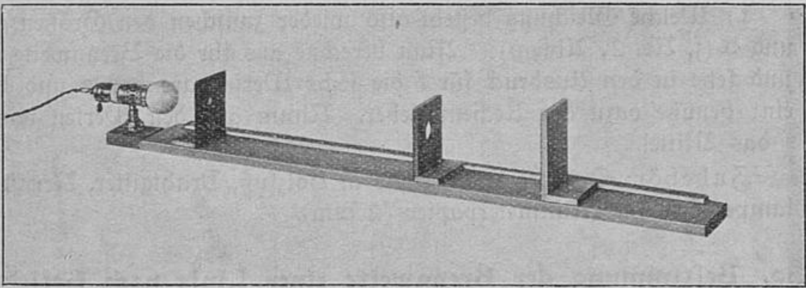
Stellen des Reißbretts) an, messe jedesmal den Winkel ε und nehme aus den vier so erhaltenen Werten von ε das Mittel.

k) Aus der Gleichung 7 (S. 39) berechne man mit Hilfe dieses Wertes von ε das Brechungsverhältnis n.

Zubehör: Reißbrett, Zeichenbogen, Reißnägel, Papierwinkel von 25°, Stecknadeln, Drehscheibe, Prisma, Winkelmesser, harter Bleistift, Punktiernadel.

9. Ableitung der Linsenformel.

a) Man bringe das Drahtgitter (den „Gegenstand") auf den Teilstrich 5 der optischen Bank und setze die vordere Ebene des Linsenhalters, in der sich der Linsenmittelpunkt befindet, auf den Teilstrich 25. Der Gegenstand wird durch eine (abgeblendete) Nernstlampe beleuchtet.



b) Man bringe den Schirm an das Ende der optischen Bank und nähere ihn so lange der Linse, bis man auf ihm ein deutliches Bild des Gegenstandes erblickt. Auf die Mitte des Bildes einstellen! Man lese den Ort des Bildes auf der optischen Bank ab und trage die Ablesung in die erste Zeile folgender Tabelle ein.

	Ort des Gegenstandes	Ort der Linse	Ort des Bildes	a	b	f
1	5	25				
2	5	30				
3	5	35				
4	5	40				
5	5	45				
6	5	50				
					Mittel:	

c) Die Entfernung des Gegenstandes von der Linse heißt die „Gegenstandsweite", sie sei a.

Die Entfernung des Bildes von der Linse heißt die „Bildweite", wir bezeichnen sie mit b.

Man berechne a und b und trage ihre Werte ebenfalls in die erste Zeile der Tabelle ein.

d) Der Versuch wird noch fünfmal wiederholt, indem man die Linse auf die in der Tabelle angegebenen Teilstriche bringt und jedesmal den Ort des Bildes bestimmt. Tabelle ausfüllen.

e) Man trage auf Millimeterpapier (2 mm) die Größen a als Abszissen und b als Ordinaten auf und verbinde die Endpunkte der zusammengehörigen Koordinatenpaare durch je eine Gerade, stelle die beiden Koordinaten des gemeinsamen Schnittpunktes dieser sechs Geraden fest und vergleiche beide Koordinaten miteinander.

f) Welche Gleichung besteht also wieder zwischen den Größen a und b (s. Nr. 2, Abs. p)? Man berechne aus ihr die Brennweite f und setze in den Ausdruck für f die sechs Wertepaare von a und b ein; benutze dazu den Rechenschieber. Nimm aus den Werten von f das Mittel.

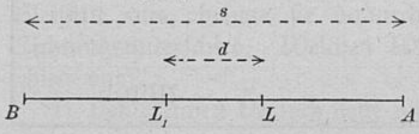
Zubehör: Optische Bank, Linse in Holzfuß, Drahtgitter, Nernstlampe, Schirm, Millimeterpapier (2 mm).

10. Bestimmung der Brennweite einer Linse nach Bessels Verfahren.

A. Erklärung.

a) In der Linsenformel $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ sind die Größen a und b vertauschbar, ohne daß sich die Gleichung ändert. Haben also z. B. bei einem der in der vorhergehenden Aufgabe angestellten Versuche der Gegenstand die Stellung A, die Linse die Stellung L und das Bild die Lage B (wobei also $AL = a$ und $BL = b$ ist), so muß es noch eine zweite Stellung L_1 der Linse geben, für die bei unveränderter Lage des Gegenstandes und des Schirmes die Linse ein scharfes Bild des Gegenstandes auf den Schirm wirft, nämlich dann, wenn $AL_1 = b$ und $BL_1 = a$ ist.

b) Bezeichnet man die Strecke AB mit s und die Größe der Linsenverschiebung LL_1 mit d, so läßt sich s und d durch a und b ausdrücken.



c) Berechne aus den so erhaltenen Gleichungen durch Addition und Subtraktion die Größen b und a und setze ihre Werte in die Linsenformel ein. Jetzt läßt sich f als Funktion von s und d darstellen. — Warum ist die Messung von s und d zweckmäßiger als die von a und b?

B. Ausführung.

a) Man setze den Gegenstand auf den Teilstrich 5 der optischen Bank und den Schirm auf 85. Wie groß ist dann s? Man bringe die Linse zwischen Gegenstand und Schirm, suche beide Stellungen L und L_1 der Linse, in denen sie vom Gegenstande ein scharfes Bild auf dem Schirme erzeugt, trage diese Stellungen in die erste Zeile folgender Tabelle ein und bestimme die Größe d der Verschiebung.

	A auf	B auf	s	L auf	L_1 auf	d	f
1	5	85					
2	5	80					
3	5	75					
4	5	70					
5	5	65					
						Mittel:	

b) Aus s und d berechne man nach der vorhin entwickelten Formel die Brennweite f. Ist es vorteilhafter, den Zähler in der Formel als Differenz zweier Quadrate oder als Produkt zu schreiben?

c) Man stelle den Versuch noch viermal an, wobei man den Gegenstand jedesmal auf Teilstrich 5 stehen lasse, den Schirm aber ihm je um 5 cm nähere. Für jeden Versuch bestimme man f und nehme aus den fünf so erhaltenen Werten das Mittel.

Zubehör: Wie bei Nr. 9, doch ohne Millimeterpapier.

11. Anwendung des Besselschen Verfahrens zur Bestimmung der Brennweite eines Linsenpaares.

a) Man entferne aus dem gemeinsamen Linsenhalter die Linse II und bestimme nach Bessels Verfahren die Brennweite f_1 der Linse I (5 Versuche). In der gleichen Weise stelle man die Brennweite f_2 der Linse II fest (5 Versuche).

b) Nachdem beide Linsen wieder in die Fassung gesetzt sind, bestimme man nach demselben Verfahren (drei Versuche: Schirm auf 45, 40 und 35 setzen!) die Brennweite f des Linsenpaares. Warum läßt sich das frühere Verfahren (Nr. 9) hier nicht anwenden?

c) Zum Schluß berechne man die Brennweite f aus der Formel

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

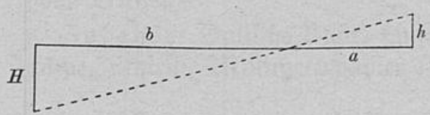
und gebe an, um wieviel sich der berechnete Wert von dem beobachteten unterscheidet. Woher rührt dieser Unterschied?

Zubehör: Wie bei Nr. 10, jedoch Doppellinse in Holzfuß.

12. Bestimmung der Brennweite einer Linse nach dem Verfahren von Abbe.

A. Erklärung.

a) Außer der Linsenformel $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ (Gleichung 1) benutzen wir hier noch eine zweite Gleichung, in der b und a die Bild- und die Gegenstandsweite, H die Bildgröße und h die Gegenstandsgröße bedeutet:



$b : a = H : h$ (Gleichung 2).

Nennt man das Verhältnis $H : h$ die „Vergrößerung" und bezeichnet man es mit v, so erhält man $b : a = v$ (Gleichung 3).

b) Man multipliziere jedes Glied der Linsenformel mit b, bringe die Größe 1 auf die rechte Seite und setze für die linke Seite ihren Wert aus Gleichung 3 ein (Gleichung 4). Welche Größen wären zu messen, um aus der entstandenen Gleichung f berechnen zu können?

c) Die Messung der Größe b kann man auf folgende Weise umgehen: Man denke sich zwei Bildeinstellungen, die erste mit der Vergrößerung v_1 und der Bildweite b_1, die zweite mit der Vergrößerung $v_2 (v_2 > v_1)$ und der Bildweite b_2 und stelle für jeden dieser beiden Fälle die Gleichung 4 auf. Man subtrahiere die erste dieser Gleichungen von der zweiten, setze $b_2 - b_1 = d$ und berechne f (Gleichung 5).

Weshalb ist die Anwendung dieser Gleichung vorteilhafter als die der Gleichung 4?

B. Ausführung.

a) Man setze die Linse auf den Teilstrich 30 der optischen Bank, beleuchte den Gegenstand, der aus zwei feinen im Abstande von genau 5 mm voneinander ausgespannten Fäden besteht, mit der Nernstlampe und setze auf der anderen Seite der Linse den mit einer Millimeterskala versehenen durchscheinenden Schirm auf die Bank.

b) Man bringe Schirm und Gegenstand in eine solche Entfernung von der Linse, daß auf dem Schirme die Bilder der beiden Fäden in einem Abstande von ungefähr 10 mm erscheinen.*) Man trage die Stellung des Schirmes (Lage von B) und die Größe des Bildes in die erste Zeile folgender Tabelle ein.

		Lage von B	Größe von H in mm	d	v	$f = \frac{d}{v_2 - v_1}$
Versuch I	1 2					
Versuch II	1 2					
Versuch III	1 2					

c) Man bringe Schirm und Gegenstand in eine solche Entfernung von der Linse, daß die Bilder der beiden Fäden in einem Abstande von ungefähr 15 mm erscheinen, trage die Stellung des Schirmes und die Größe des Bildes in die zweite Zeile ein und berechne v_1 und v_2.

Wie erhält man die Größe d, die Differenz der Bildweiten b_2 und b_1? Man berechne f aus der Gleichung 5 (Versuch I).

d) Noch zweimal (Versuch II und III) wird die Brennweite f in der gleichen Weise bestimmt, wobei die Linse stets an derselben Stelle stehen bleibt, doch der Schirm jedesmal ungefähr 1 cm weiter von der Linse entfernt wird.

Aus den drei so erhaltenen Werten von f nehme man das Mittel.

Zubehör: Optische Bank, Linse in Holzfuß, Nernstlampe, Gegenstand, Schirm, Spiegel.

---

*) Die letzte scharfe Einstellung geschieht am besten durch Verschiebung des Gegenstandes!

13. Wie ändert sich die Brennweite eines Linsenpaares mit der gegenseitigen Entfernung der beiden Linsen?

(Größere Aufgabe.)

a) Man bringe die beiden Linsen in einer Entfernung von 15 cm auf die optische Bank, setze auf die eine Seite dieses Linsenpaares den beleuchteten Gegenstand (zwei Fäden im gegenseitigen Abstand von 5 mm) und auf ihre andere Seite den durchscheinenden Schirm. Unter Anwendung des Verfahrens von Abbe bestimme man bei *ungefähr* dreifacher und vierfacher Vergrößerung die Brennweite des Linsenpaares dreimal (Tabelle wie in Nr. 12!) und nehme aus den drei Werten das Mittel.

b) Den gegenseitigen Abstand beider Linsen verringere man auf 12 cm und bestimme in der gleichen Weise die jetzige Brennweite des Linsenpaares.

Noch dreimal wird der gegenseitige Abstand beider Linsen um je 3 cm verringert und jedesmal die Brennweite bestimmt.

	Abstand der Linsen	Beobachtete Brennweite	Berechnete Brennweite
1	15		
2	12		
3	9		
4	6		
5	3		
6			
7	0	—	

Die beobachteten Brennweiten werden in die vorstehende Tabelle eingetragen. Beim sechsten Versuche bringe man die Linsen so weit aneinander, wie es möglich ist, und bestimme auch in diesem Falle die Brennweite.

c) Die beobachteten Werte werden auf Millimeterpapier (1 mm) aufgetragen: die Linsenabstände als Abszissen (1 cm als 1 cm) und die Brennweiten als Ordinaten (1 cm als 1 cm).

d) Zum Schluß berechne man die Brennweiten des Linsenpaares für die in Betracht kommenden Abstände und für den Abstand 0 nach der Formel:

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

in der f_1 und f_2 die Brennweiten der Einzellinsen*) und d ihren gegenseitigen Abstand bedeuten.

e) Vergleiche diese Formel mit der unter Nr. 11, c (Seite 44) angegebenen. Wie groß darf d höchstens werden? Wie groß wird dann die Brennweite des Linsenpaares?

f) Man trage auch die berechneten Werte von f in die Tabelle ein und vervollständige die Zeichnung.

Zubehör: Wie bei Nr. 12, doch zwei Linsen in Holzfüßen und Millimeterpapier (1 mm).

14. Wird rotes oder blaues Licht stärker gebrochen?

a) Man bringe den glühenden Faden der Wotanfadenlampe genau über den Teilstrich 10 der optischen Bank und setze den durchscheinenden Schirm auf den Teilstrich 135. Wie groß ist dann s, die Entfernung des Gegenstandes (des Fadens) vom Schirme? Vergleiche die Figur auf S. 42.

b) Vor der Lampe bringe man den roten Lichtfilter an, setze die Linse zwischen Filter und Schirm und bestimme fünfmal die Örter L und L_1 (Besselsches Verfahren), in denen sie ein Bild des Fadens auf dem Schirme entwirft. Man trage diese fünf Wertepaare in folgende Tabelle ein.

Rotes Licht			Blaues Licht		
	L	L_1		L	L_1
1			1		
2			2		
3			3		
4			4		
5			5		
Mittel:			Mittel:		
d_r			d_b		
f_r			f_b		
$f_r - f_b =$					

*) Sind diese Brennweiten nicht bekannt, so müssen sie zunächst nach dem Verfahren von Abbe bestimmt werden.

c) Nachdem man für beide Stellungen L und L_1 das Mittel berechnet hat, suche man d_r, die Größe der Verschiebung bei rotem Licht, und berechne aus der unter Nr. 10, c gefundenen Formel die Brennweite f_r der Linse für rotes Licht. Tabelle ausfüllen.

d) Man wechsele den roten Filter durch einen blauen aus und bestimme in genau der gleichen Weise die Verschiebung d_b der Linse für blaues Licht und f_b, die Brennweite der Linse für blaues Licht. Tabelle ausfüllen. Man bilde $f_r - f_b$.

e) Wird rotes oder blaues Licht stärker gebrochen?

Zubehör: Optische Bank, Wotansoffittenlampe, Filter für rotes und blaues Licht, Linse in Holzfuß, durchscheinender Schirm.

Anhang.

V. Akustik.

1. Der Schreibapparat ist ähnlich dem von H. Hahn verwendeten. Die Schreibfläche liegt nicht auf einem Holzschlitten, sondern wird in Schienen aus Winkelmessing bewegt. Statt der gewöhnlichen Glasplatten sind solche aus dickem Spiegelglas verwendet. Die Schreibspitze für das Pendel ist eine dünne Schweineborste, die für die Stimmgabel harter Manganindraht von 0,16 mm Durchmesser. Die Verwendung von Bärlappsporen ermöglicht ein sehr sauberes Arbeiten. Das Ergebnis des Versuches wird nur dann genau, wenn man während des Zählens der Pendelschwingungen das Pendel mit seiner Schreibspitze die Glasplatte ebenso streifen läßt wie während des Versuches.

2. Die Federwage ist nach meinen Angaben von Reimann, Berlin, Schmidtstraße, hergestellt. Sie ist nicht mit Teilung versehen. Um sie bequem eichen zu können, ist ihr Zeiger als Lineal ausgebildet. Klaviersaitendraht von 0,3 mm Dicke.

VI. Optik.

1. Prüfung der Reißschiene und der Dreiecke ist unerläßlich, s. A. zur Megede, Wie fertigt man technische Zeichnungen? 5. Aufl. Seite 9.

Stecknadeln: schwarze Karlsbader Insektennadeln Nr. 4 von Böttcher, Berlin, Brüderstr. 15.

Winkelmesser auf Pausleinwand von Wichmann, Berlin, Karlstraße 13.

Ebener Spiegel, auf der Vorderseite versilbert.

2. Hohlspiegel: geschliffener Spiegel; versilberte Uhrgläser sind billig, aber unbrauchbar.

3. Eine der beiden Nadeln muß bedeutend dünner sein als die andere.

8. Die Drehscheibe ist eine kreisrunde Kupfer- oder Messingscheibe von 6 cm Durchmesser und ungefähr 1 mm Dicke, am Rande mit

einer Marke versehen; sie trägt in ihrem Mittelpunkte ein Loch, durch das der sie auf dem Zeichenbrett festhaltende Reißnagel knapp hindurchgeht. Um den Reißnagel herum befinden sich drei aufgelötete Metallfüßchen in gleichem Winkelabstande voneinander, auf denen das Prisma mit sehr wenig Klebwachs befestigt wird.

12. Der Schirm besteht aus einem Stück Pflanzenfaserpauspapier (Wichmann, Berlin, Karlstr. 13), das in nassem Zustande auf einen Holzrahmen geklebt wird. Über die Mitte dieses Papieres klebt man wagerecht eine Millimeterteilung auf die der Linse abgewandte Seite des Schirmes. Der Gegenstand besteht aus zwei auf ein Deckglas in einer gegenseitigen Entfernung von genau 5 mm in senkrechter Lage aufgespannten feinsten Kokonfäden. Das Deckglas ist vor die Öffnung einer großen schwarzen Blende geklebt.

14. Wotansoffittenlampe für 110 Volt.

Als Linse wird eine Flintglaslinse von ungefähr 25 cm Brennweite benutzt. Schirm wie bei 12, doch ohne Millimeterteilung.

Ersatz für die Aufgabe II, 4. Seite 30 des ersten Teiles.

4. Die Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Metalle zu bestimmen.

a) Die Länge l des Stabes, dessen Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden soll, wird mit Hilfe eines Maßstabes gemessen.

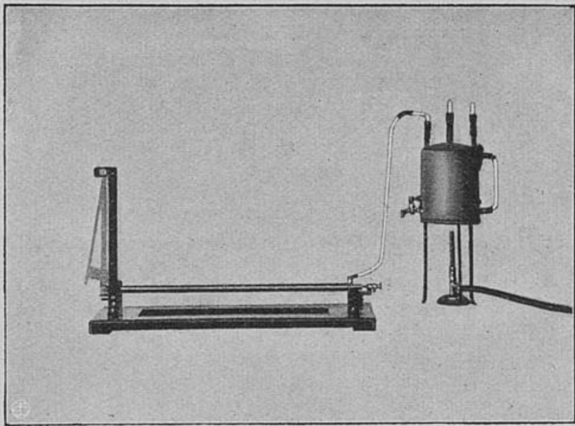
b) Dann lege man, nachdem man das Mikrometer weit genug zurückgeschraubt hat, den Stab auf die dazu bestimmten Lager und verbinde mittels zweier kurzer Gummischläuche seine beiden Dampfröhren mit dem Einlaß- und Auslaßrohr des Apparates und das andere Ende des Einlaßrohres mit dem geheizten Dampfkessel. Die mittlere Öffnung im Deckel des Dampfkessels bleibt zunächst noch offen.

c) Mit Hilfe der Mikrometerschraube stelle man den beweglichen Zeiger auf die an dem Apparat angebrachte weiße Marke und lese die Stellung n_1 des Mikrometers ab.

Stoff:	$l =$
$n_1 =$ $n_2 =$	$t_1 =$ $t_2 = 100^0$
$n_2 - n_1 =$	$t_2 - t_1 =$
$\alpha =$	

Man bestimme die Zimmertemperatur t_1 in der Nähe des Apparates und trage n_1 und t_1 in die Tabelle ein.

d) Sobald das Wasser im Kessel siedet, verschließe man die Öffnung in seinem Deckel. Das jetzt statt=



findende Vorrücken des Zeigers verhindere man dadurch, daß man die Mikrometerschraube in demselben Maße zurückdreht, bis er seine Stellung nicht mehr ändert, der Stab also die Temperatur $t_2 = 100^0$ angenommen hat.

e) Nachdem man den Brenner unter dem Dampfkessel entfernt hat, lese man die jetzige Stellung n_2 des Mikrometers ab und trage n_2 in die Tabelle ein. Man berechne die Temperaturerhöhung des Stabes und seine Verlängerung. Tabelle ausfüllen.

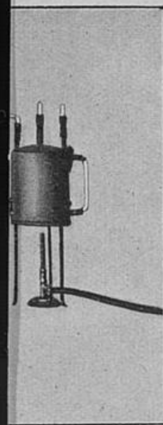
f) Die Strecke, um die sich ein Stab von der Länge 1 bei einer Erwärmung um 1^0 ausdehnt, nennen wir seinen Ausdehnungskoeffizienten α. Um wieviel hat sich also der von uns benutzte Stab, der die Länge l besitzt, und der um $(t_2 - t_1)^0$ erwärmt worden ist, ausgedehnt?

g) Da diese Verlängerung mit Hilfe des Mikrometers unmittelbar gemessen worden ist, erhalten wir eine Gleichung, aus der man α berechnen kann. (Alle Längen in der gleichen Einheit messen!) Man füge diese Größe obiger Tabelle zu.

h) Stelle den Versuch auch mit den beiden anderen Stäben an.

Zubehör: Apparat, Stäbe aus Aluminium, Messing und Eisen, Thermometer, Maßstab, Dreifuß, Dampfkessel, Brenner.

findende Vorrück
des Zeigers ve
hindere man d
durch, daß m
die Mikromete
schraube in der
selben Maße z
rückdreht, bis
seine Stellung ni
mehr ändert, d
Stab also die Te
peratur $t_2 = 10$
angenommen h



e) Nachd
man den Bren hat, lese man
die jetzige Stell n_2 in die Ta-
belle ein. Ma s Stabes und
seine Verlänge

f) Die Str Länge l bei
einer Erwär seinen Aus-
dehnungskoe der von uns
benutzte Stab, $- t_1)^0$ erwärmt
worden ist, au

g) Da dies ers unmittelbar
gemessen word us der man α
berechnen kann messen!) Man
füge diese Grö

h) Stelle d ren Stäben an.

Zubehör: sing und Eisen,
Thermometer, ner.

Druck von B. G. Teubner in Leipzig.