

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II 3060
L. inw.



SCHWEIDLER

PRAKTISCHE ÜBUNGEN

S. ZIOMBROSKI

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000297533

16-360

2b.

K390

6917



PRAKTISCHE ÜBUNGEN

IN DER
AUSFÜHRUNG PHYSIKALISCHER SCHULVERSUCHE

EIN LEITFADEN FÜR STUDIERENDE

VON

DR. EGON R. v. SCHWEIDLER
A. Ö. PROFESSOR AN DER K. K. UNIVERSITÄT WIEN

MIT 120 FIGUREN

PREIS GEB. 3 M. — 3 K 60 H

S. ZIOBROWSKI

WIEN
F. TEMPSKY



1911

LEIPZIG
G. FREYTAG
G. M. B. H.

D/417

Alle Rechte, einschließlich des
Übersetzungsrechtes, vorbehalten.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

II 3060

Akc. Nr. 2668/49

Vorwort.

Seit dem Jahre 1903 wird an der Wiener Universität neben dem allgemein üblichen physikalischen Praktikum, das in die Anwendung der prinzipiell wichtigen Meßmethoden der Physik einführt, noch ein sogenanntes »Demonstrationspraktikum« abgehalten, das speziell den Lehramtskandidaten die Möglichkeit bieten soll, sich einige Übung in der Ausführung von Schulversuchen anzueignen.

Während für das »Meßpraktikum« die allgemein bekannten und verbreiteten ausgezeichneten Werke von Kohlrausch, Wiedemann und Ebert u. a. eine kompendiöse Zusammenstellung der erforderlichen Beschreibungen von Theorie und Praxis der wichtigsten Meßmethoden geben, waren für das Demonstrationspraktikum die analogen Erläuterungen in zahlreichen Lehrbüchern der Experimentalphysik, Spezialwerken und Zeitschriften verstreut.

Vorliegendes Büchlein bezweckt daher, für eine Reihe von Demonstrationsexperimenten die theoretischen Grundlagen der Versuche, die Beschreibung der Apparate und die Methoden der Ausführung in möglichst knapper Form darzustellen und so dem Studierenden bei seinen Übungen als Leitfaden zu dienen; keineswegs aber beansprucht es, mit jenen Werken in Konkurrenz zu treten, die eine für den Lehrer der Physik bestimmte erschöpfende Zusammenstellung von Vorlesungs- und Schulversuchen bieten.

Dementsprechend ist die Zahl der behandelten Versuche eine geringe (60) und ihre Auswahl eine mehr oder minder willkürliche, da es sich ja nur darum handelt, gewissermaßen an Stichproben die Methodik der Demonstrationsversuche einzuüben.

Da physikalische Messungen ohnedies im Meßpraktikum ausgeführt werden, sind hier vorzugsweise Versuche mehr qualitativen Charakters, wie sie ja im Mittelschulunterricht die Hauptrolle spielen, behandelt; doch sind dabei vielfach Nebenversuche quantitativen Charakters eingeschaltet; denn auch wo der Schüler nur das qualitative Ergebnis des Versuches zu

beachten braucht, soll der Experimentator selbst auch die quantitativen Verhältnisse in dem von ihm durchgeführten Versuche beherrschen, teils im allgemeinen des gründlicheren Verständnisses halber, teils um über die Bedingungen für das Gelingen des Versuches orientiert zu sein.

Ein Anhang enthält die Beschreibung einiger der wichtigsten und am häufigsten vorkommenden manuellen Operationen.

Dem Herrn Verleger bin ich für seine Sorgfalt bezüglich der äußeren Ausstattung und für sein freundliches Entgegenkommen gegenüber allen meinen Wünschen zu herzlichem Danke verpflichtet.

Wien, im Juni 1910.

E. v. Schweidler.

1. Atwood's Fallmaschine.

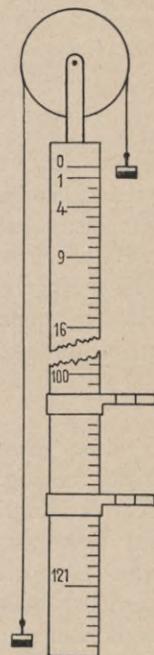
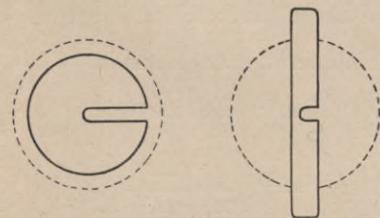
Instrumentarium: Fallmaschine, Kästchen mit Gewichten, Metronom, Stopuhr, Tafelwage, Ölfläschchen mit Pinsel.

Beschreibung des Apparates. Ein mit drei Stellschrauben versehenes Fußbrett trägt eine vertikal stehende Holzsäule von rechteckigem Querschnitt, deren eine Seite mit einer cm-Teilung versehen ist; die Quadratzahlen 1, 4, 9, 16 sind durch längere Striche hervorgehoben. Auf dem oberen Ende der Säule befindet sich ein Metallrad, dessen Achse in einem Spitzenlager mit geringer Reibung läuft und dessen Felge eine Rinne besitzt; über diese Rinne läuft eine Schnur, an deren Enden gleichschwere gestielte Metallscheibchen befestigt sind. Längs der Säule verschiebbar und daher auf einen beliebigen Teilstrich einstellbar sind zwei Metallplatten mit einem kreisförmigen Loch in der Mitte, das groß genug ist, um die Scheibchen hindurchzulassen. Die zugehörigen Gewichte sind in zwei Formen vorhanden: a) Scheiben vom Durchmesser der an den Enden der Schnur befestigten Scheibchen mit einem bis zur Mitte reichenden Schlitz, so daß sie konzentrisch mit diesen angelegt werden können und das Loch der Schieberplatte passieren, b) rechteckige Plättchen, deren Länge größer als der Lochdurchmesser ist, so daß sie beim Sinken von der Schieberplatte abgehoben werden.

Nach Bedarf kann über das Loch der Schieberplatte eine Blechplatte gelegt werden, so daß das sinkende Scheibchen am Ende der Schnur aufschlägt.

Zur Herstellung in gleichen Intervallen erfolgender hörbarer Zeitmarken dient ein Metronom, im wesentlichen ein Pendel, dessen Schwingungsdauer durch Verschieben eines Laufgewichtes variiert werden kann. Die Lamelle, längs welcher es verschiebbar ist, besitzt eine Anzahl von Kerben, in die eine Feder des Laufgewichtes einschnappt und so dessen Stellung fixiert; die am Gehäuse befestigte nebenliegende Skala gibt durch die Ziffer die Anzahl der Halbschwingungen pro Minute an.

Zu den vorbereitenden Messungen dient eine Stopuhr, deren Sekundenzeiger beim ersten Druck auf den Aufziehknopf der Uhr sich in Bewegung setzt und in Intervallen von $\frac{1}{3}$ Sekunden weiterspringt, beim 2. Drucke arretiert wird, so daß die Zeit zwischen 1. und 2. Drucke auf 0.2 sec genau abgelesen werden kann, endlich beim 3. Drucke wieder in die Nullstellung zurückspringt.



Theorie der Versuche. Die Atwood'sche Fallmaschine dient zur Demonstration der Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung sowie des Satzes, daß die an einer Masse durch eine konstante Kraft hervorbrachte Beschleunigung dem Werte der Kraft direkt, dem Werte der bewegten Masse umgekehrt proportional ist. Bezeichnet also t die vom Beginn der Bewegung an gerechnete Zeit, s den zur Zeit t zurückgelegten Weg, v die zur Zeit t erreichte Momentangeschwindigkeit, P die wirksame Kraft, M die bewegte Masse, γ die Beschleunigung, so lauten die empirisch zu bestätigenden Formeln:

$$1) s = \frac{1}{2} \gamma t^2$$

$$2) v = \gamma t$$

$$3) \gamma = \frac{P}{M}$$

Unter der Voraussetzung, daß die Massen der Schnur und des Rades zu vernachlässigen seien, und daß die Bewegung ohne Reibungswiderstand (Achsenreibung und Luftwiderstand) erfolge, wäre die wirksame Kraft proportional dem Übergewichte μ der stärker belasteten Seite, die zu bewegend Masse gegeben durch $M = 2m + \mu$, wenn m die beiderseits gleichen Belastungen darstellt. Bezeichnet also g die Beschleunigung des freien Falles, so ist die erzielte Beschleunigung γ gegeben durch:

$$\gamma = g \frac{\mu}{2m + \mu}$$

Für genauere Versuche sind die hierbei gemachten Vernachlässigungen nicht zulässig. Eine zweite Annäherung erhält man durch Einführen von Korrektionsgliedern, die den Reibungswiderstand sowie den Einfluß des an der Bewegung teilnehmenden Rades darstellen. Ermittelt man experimentell jenes Übergewicht μ_1 , welches eben ausreicht, das im indifferenten Gleichgewichte befindliche symmetrisch belastete System in Bewegung zu setzen, so kommt nur der Betrag $\mu_2 = \mu - \mu_1$ des Übergewichtes als beschleunigend in Rechnung. Der Einfluß des mitrotierenden Rades wird berücksichtigt, indem man im Nenner der obigen Formel zur bewegten Masse $M = (2m + \mu)$ ein Korrektionsglied hinzufügt, das sich folgendermaßen bestimmt: da die Umfangsgeschwindigkeit des Rades (Radius = r) gleich der Geschwindigkeit der Schnur und der bewegten Massen ist, wird die Winkelbeschleunigung dargestellt durch $\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\gamma}{r}$; besitzt das Rad ein Trägheitsmoment K , so ist $\frac{K d^2 \varphi}{dt^2}$ gleich dem Drehungsmoment der wirkenden Kraft; die korrigierte Bewegungsgleichung lautet also:

$$P = (\mu - \mu_1)g = (2m + \mu)\gamma + \frac{K}{r^2}\gamma \quad \text{oder} \quad \gamma = g \frac{\mu - \mu_1}{2m + \mu + K/r^2}$$

Für den Fall, daß beim Rade die Masse der Achse und der Speichen gegen die der Felge zu vernachlässigen ist, kann $\frac{K}{r^2}$ einfach gleich der Masse des Rades gesetzt werden.

Auch diese zweite Annäherung ist unexakt; zunächst ist das die Wirkung der Widerstandskräfte darstellende Glied μ, γ tatsächlich nicht konstant, einerseits infolge zufälliger Änderungen der Reibung bei verschiedenen Stellungen der stets in ihren Lagern leicht schlotternden Achse, andererseits prinzipiell, da die Reibung und der Luftwiderstand von der Geschwindigkeit der Bewegung abhängen, also in verschiedenen Stadien der Bewegung verschieden sind. Ferner wäre noch zu berücksichtigen, daß mit den Veränderungen der Schnurlängen auf beiden Seiten auch das wirksame Übergewicht geändert wird.

Aus diesen Gründen eignet sich die Atwood'sche Fallmaschine nicht zu exakten quantitativen Versuchen, besonders die Bestimmung der Schwerebeschleunigung g liefert sehr unsichere Werte. Da schon die Korrektionsglieder der zweiten Annäherung für den Elementarunterricht zu kompliziert sind, wird man sich im allgemeinen mit Demonstrationsversuchen begnügen, die mehr zur Veranschaulichung und Erläuterung der oben erwähnten Gesetze als zu ihrem exakten empirischen Nachweis dienen. Doch ist es für den Experimentator selbst von Wichtigkeit, bei der Vorbereitung auch die Korrektionsglieder zu bestimmen und die Giltigkeit der oben abgeleiteten Formeln zu prüfen, um ein Bild von der Genauigkeit zu erhalten, die sich bei diesen Versuchen erzielen läßt.

Ausführung der Versuche. 1) Justierung und Vorbereitung. Das Rad wird aus seinem Achsenlager entfernt, auf einer gewöhnlichen Tafelwage gewogen (behufs Bestimmung des Korrektionsgliedes $\frac{K}{r^2} =$ annähernd Radmasse), die Achse und deren Lager eventuell gereinigt und mit etwas Uhrmacheröl versehen. Beim Wiedereinsetzen werden die Achsenlager durch Schrauben derart gestellt, daß weder (durch zu lockeres Anziehen) ein merkliches Schlottern der Achse stattfinden kann, noch (durch zu festes Anziehen) die Reibung zu sehr vergrößert wird. Die Schnur samt den beiden an ihr befestigten Scheibchen wird ebenfalls gewogen (eine Genauigkeit der Wägung auf etwa $\frac{1}{2}$ g ist ausreichend) und dann über das Rad gelegt; durch entsprechende Verstellung der Stellschrauben des Fußbrettes erzielt man, daß die Säule vertikal steht und die Scheibchen, ohne anzustreifen, das Loch des Schiebers passieren.

Hierauf werden beiderseits gleiche Gewichte der Form (a) aufgelegt, etwa in der Größenordnung von 200 g. Nun bestimmt man jenes Übergewicht μ_1 , das die Reibung kompensiert, und legt es als dünnes Scheibchen der Form (a) auf. Bei gereinigter und geölter Achse wird im allgemeinen μ_1 den Wert von $\frac{m}{200}$ nicht übersteigen. Dieses Übergewicht wird dauernd an seiner Stelle belassen und bei der Berechnung weiterhin nicht berücksichtigt.

Man stellt nun den Schieber auf eine Quadratzahl der Teilung, z. B. 100 cm, und legt ein Übergewicht μ_2 von der Größenordnung $\frac{m}{50}$ auf, so

daß die erzielte Beschleunigung rund $\frac{g}{100}$ wird, also die Strecke von 0 bis 100 cm in 4 bis 5 sec durchlaufen wird. Diese Zeit τ bestimmt man genauer mittels der Stopuhr und zwar aus mehreren wiederholten Versuchen, aus deren Resultaten man den Mittelwert berechnet.

2) Demonstration des Gesetzes: $s = \frac{1}{2} \gamma t^2$. Auf Grund der im vorigen Versuch ausgeführten Bestimmung der Zeit τ wählt man $\delta = \frac{1}{10} \tau$ als willkürliche Zeiteinheit und stellt das Laufgewicht des Metronoms so, daß die Zahl der Schläge pro Minute nahezu $\frac{600}{\tau}$ beträgt, also die einzelnen Schläge nahezu in Intervallen der Größe δ aufeinanderfolgen. Läßt man nun das auf den Nullpunkt der Teilung gestellte mit dem Übergewicht versehene Scheibchen bei einem Schlage (Nr. 0) des in Gang gesetzten Metronoms los, so passiert es bei den Schlägen Nr. 1, 2, 3 die Teilstriche 1, 4, 9

3) Demonstration des Gesetzes $v = \gamma t$. Durch die Einführung der willkürlichen Zeiteinheit δ hat die Beschleunigung γ den Wert 2 angenommen; wirkt also die Beschleunigung durch k solcher Zeiteinheiten, so ist die erreichte Endgeschwindigkeit $v = 2k$; zum Nachweise dieses Gesetzes wird das Übergewicht μ_2 durch ein Plättchen von der Form (b) hergestellt und der obere nicht bedeckte Schieber in den verschiedenen Versuchen der Reihe nach auf die Teilstriche 1, 4, 9, 16 gestellt. Das vom Nullpunkt losgelassene Gewicht passiert dann diesen Schieber zu den Zeiten 1, 2, 3, 4 und bewegt sich von da an mit der konstanten Geschwindigkeit 2, 4, 6, 8 weiter, da ja beim Passieren des Schiebers das Übergewicht abgehoben wird. Indem man den zweiten Schieber, mit der Blechplatte bedeckt, um beziehungsweise 10, 20, 30, 40 cm tiefer stellt als den ersten, erzielt man, daß das sinkende Gewicht jedesmal nach der Zeit 5δ (entsprechend 5 Metronomschlägen) aufschlägt.

4) Demonstration des Gesetzes: γ prop. P. Durch Variation des Übergewichts μ_2 im 2. Versuche wird die Beschleunigung γ proportional geändert; indem man daher nacheinander die Übergewichte $\mu_2, 2\mu_2, 3\mu_2$ verwendet und den mit der Platte bedeckten oberen Schieber beziehungsweise auf die Teilstriche 25, 50, 75 cm stellt, erzielt man, daß diese Strecken jedesmal in der Zeit 5δ durchlaufen werden.

5) Demonstration des Gesetzes: γ prop. $\frac{1}{M}$. Durch Veränderung der beiderseits gleichen Belastungen m bei konstantem Übergewicht μ_2 kann man qualitativ die Veränderung der erzielten Beschleunigung nachweisen. Zahlenmäßige Übereinstimmung des Experiments mit der Formel würde eine exakte Bestimmung des Korrektionsgliedes $\frac{K}{r^2}$ erfordern.

6) Bestimmung der Schwerebeschleunigung g . Aus den Resul-

taten des Versuches (2) kann man probeweise den Wert von g aus der Formel:

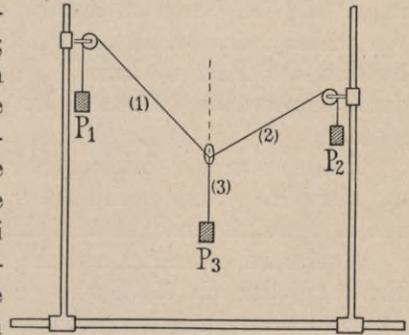
$$\gamma = g \frac{\mu_1}{2m + \mu_1 + \mu_2 + \frac{K}{r^2}}$$

berechnen. Wie bereits erwähnt, dient dieser Versuch nur zur Orientierung des Experimentators über den Grad der erreichten Genauigkeit.

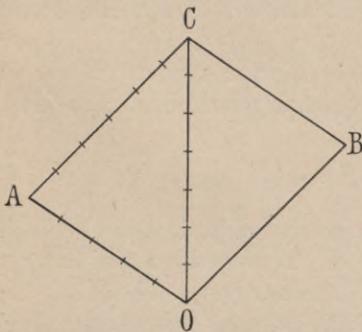
2. Das Kräfteparallelogramm.

Instrumentarium: Apparat zur Demonstration des Kräfteparallelogramms; Satz von Hakengewichten; Lineal; Zirkel; Maßstab; Schreibpapier.

Beschreibung des Apparates: Auf einer Schiene sind zwei vertikale Ständer in horizontaler Richtung verschiebbar; diese tragen verstellbare Rollen; drei an einem Ende mit Schlingen (zum Einhängen von Gewichten) versehene Schnüre sind mit den andern Enden verknüpft und es werden zwei Teile über die beiden Rollen geführt, während der dritte Teil vertikal herabhängt. Werden drei Gewichte P_1 , P_2 , P_3 in die Schlingen gehängt, so sind dadurch die Winkel, welche die Schnüre (1) und (2) mit der Vertikalen bilden, gegeben; die horizontale oder vertikale Verstellung der Rollen verändert nur die Lage des Knotenpunktes O.



Theorie der Versuche. Die Winkel zwischen den Schnüren (1), (2) und (3) lassen sich theoretisch aus den Gewichten P_1 , P_2 , P_3 ableiten auf Grund des Satzes, daß P_3 der Resultierenden von P_1 und P_2 entgegengesetzt gleich ist; am einfachsten erfolgt diese Ableitung konstruktiv, indem man aus 3 Strecken: $OA = l_1$, $OB = AC = l_2$ und $OC = l_3$, die in willkürlichen Längeneinheiten gemessen den Gewichten P_1 , P_2 und P_3 proportional sind, ein Dreieck OAC konstruiert und dieses — der Figur entsprechend — zu einem Parallelogramm OACB ergänzt. Es ist unmittelbar ersichtlich, daß OC als Resultierende von OA und OB die



Größe einer in entgegengesetzter Richtung OD wirkenden Kraft angibt, welche den Kräften OA und OB das Gleichgewicht hält. Die Linien OA, OB und OD der Konstruktion entsprechen somit der wirklichen Lage der Schnüre des Apparates, wenn die angenommenen Kräfte in Form von Gewichten angehängt werden.

Ausführung der Versuche. 1) Konstruktion der Figuren. Mit Lineal und Zirkel konstruiert man einige Parallelogramme, bei denen die Seitenlängen in einfachen Zahlenverhältnissen stehen, z. B.: $l_1 = l_2 = l_3 = 4$; $l_1 = l_2 = 3$, $l_3 = 4$; $l_1 = 3$, $l_2 = 4$, $l_3 = 5$ (ergibt ein rechtwinkliges Dreieck) oder analoge. Die Größe der willkürlichen Längeneinheit wird zu etwa 3 cm gewählt, so daß die Seiten der Dreiecke etwa 10 bis 15 cm lang werden; die Linien werden stark ausgezogen und durch Querstriche in den Distanzen der willkürlichen Längeneinheit die Längenverhältnisse unmittelbar ersichtlich gemacht. Die Verlängerung OD der Diagonale wird ebenfalls dick eingezeichnet.

2) Vergleich mit der tatsächlichen Gestalt der Schnur. Die den Seitenlängen proportionalen Gewichte P_1 (links), P_2 (rechts) und P_3 (in der Mitte) werden angehängt, z. B. je 100 g pro Längeneinheit der Zeichnung. Es ist darauf zu achten, daß die Gewichte frei hängen und daher voll wirken, nicht z. B. bei P_3 auf der Schiene des Apparates aufruhend; ist dies der Fall, so kann man durch vertikales Heben der Rollen oder durch horizontales Näherschieben der Ständer den Knotenpunkt O höher legen.

Indem man die Zeichnung unmittelbar hinter das Schnursystem hält, die Linie OD vertikal nach abwärts, zeigt man die Übereinstimmung (Deckung) von Konstruktion und tatsächlicher Gestalt des Schnursystems.

Ergänzend kann man auch zeigen, daß in Fällen, wo eine der drei Kräfte größer als die Summe der beiden andern ist, einerseits die Konstruktion eines Dreieckes unmöglich ist, andererseits am Apparat sich keine Gleichgewichtslage ergibt.

3. Die Zentrifugalmaschine.

Instrumentarium: Zentrifugalmaschine; 4 Aufsätze hierzu: a) mit Lineal und Stiften, b) mit 6 Röhren, c) mit Dynamometer, d) mit Kugel auf schiefer Ebene.

Theorie der Versuche. Bewegt sich ein Körper von der Masse m mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn vom Radius r , so kann die Zentrifugalkraft F in einer der Formen

$$F = \frac{m v^2}{r} = m \omega^2 r = 4 \pi^2 m \frac{r}{\tau^2} = 4 \pi^2 m n^2 r$$

ausgedrückt werden, je nachdem man die Bahngeschwindigkeit v , die Winkelgeschwindigkeit ω , die Umlaufdauer τ oder die Tourenzahl n einführt.

Denkt man sich ein vertikal stehendes Röhren (vergl. die Figur auf S. 11) vom Radius ρ , das mit Wasser gefüllt ist, um eine Achse AA' rotierend, die den Abstand r von der Mitte des Röhrens besitzt, so bildet bei konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit die Wasseroberfläche — unter Vernachlässigung der Kapillarkräfte — genau genommen ein Stück eines Rotationsparaboloides, angenähert eine Ebene, die den Winkel α mit der

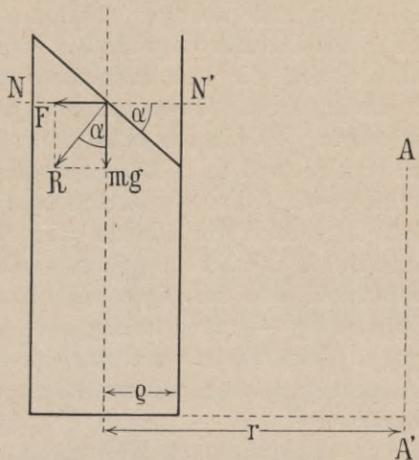
Horizontalen einschließt. Aus der Bedingung, daß die Resultierende R aus Zentrifugalkraft F und Schwere mg für jedes Teilchen senkrecht zur Oberfläche stehe, ergibt sich:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{mg} = \frac{4\pi^2 n^2 r}{g}$$

Hört die Rotation auf, so nimmt die Oberfläche eine horizontale Lage NN' an und die Höhendifferenz dieses Niveaus gegen den oberen Rand des Röhrchens (entsprechend der Menge des herausgeschleuderten Wassers) ist gegeben durch:

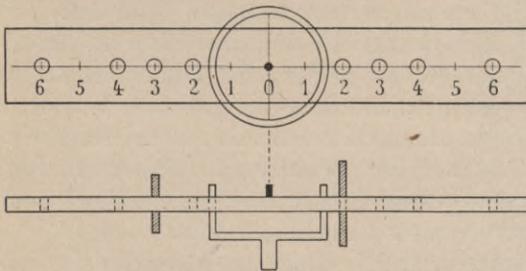
$$h = q \operatorname{tg} \alpha = \frac{4\pi^2}{g} n^2 q r$$

Solche rotierende Röhrchen werden in den späteren Versuchen verwendet, teils um die quantitativen Beziehungen der Fliehkraft zu demonstrieren, teils als Nebenbestandteile anderer Aufsätze zur Ermittlung der Tourenzahl.



Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche.

- 1) Gleichgewicht zweier Zentrifugalkräfte. Ein bezüglich der Massenverteilung symmetrisches Lineal kann mit geringer Reibung in einer durch die Schlitze eines Hohlzylinders gebildeten Führung gleiten; bei seitlicher Verschiebung hindert ein Anschlagstift die Entfernung über eine bestimmte Größe hinaus.



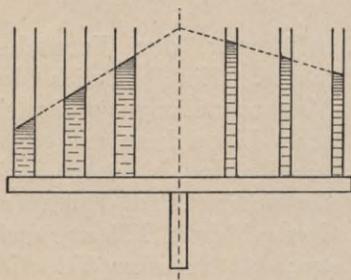
Das Lineal hat beiderseits in den Distanzen 2, 3, 4 und 6 Löcher, in welche nach Belieben einer von den drei beigegebenen Messingzylindern I, II oder III mit den relativen Massen 1, 2 und 3 eingeschraubt werden kann.

Stellt man das Lineal — zunächst ohne eingeschraubte Zylinder — ursprünglich so, daß eine in der Mitte befindliche Marke möglichst genau mit einer Marke an der Führung koinzidiert, so ist sein Schwerpunkt in der Drehungsachse, und bei Rotation bleibt das Gleichgewicht erhalten.

Werden nun zwei Zylinder derart rechts und links eingesetzt, daß das Produkt mr für beide Seiten den gleichen Wert hat, z. B. Zylinder I in Distanz 4 und II in Distanz 2 oder: II in Distanz 3 und III in Distanz 2 etc., so bleibt das Gleichgewicht ebenfalls erhalten, wie aus der Formel $F = m\omega^2 r$ unmittelbar ersichtlich ist, da ω für beide Massen den gleichen Wert besitzt. Formal ist die Gleichgewichtsbedingung $mr = m'r'$ vollkom-

men analog dem Hebelgesetze; es ist aber zu berücksichtigen, daß beim mathematischen (masselosen) Hebel das Gleichgewicht ein indifferentes, in diesem Falle aber ein labiles ist, denn die geringste seitliche Verschiebung des Lineales vergrößert r für die eine Masse und verringert es für die andere, und die nun vorhandene Differenz der Zentrifugalkräfte hat die Tendenz, diesen Unterschied noch zu vergrößern. Bei absolut reibungsloser Bewegung des Lineales wäre daher praktisch das labile Gleichgewicht nicht zu erzielen, und selbst trotz der vorhandenen Reibung wird bei theoretischem Gleichgewicht dieses gestört, sobald eine hinreichende Rotationsgeschwindigkeit angewandt wird, da die Einstellung des Lineales in die Symmetrielage tatsächlich unexakt ausgeführt wird. Die Ausschläge erfolgen aber — entsprechend dem zufälligen Charakter der ursprünglichen Abweichung der Einstellung — unregelmäßig nach der einen oder anderen Seite; wird dagegen absichtlich mr und $m'r'$ verschieden gewählt, so erfolgt natürlich der Ausschlag stets nach jener Seite, auf der das Produkt den größeren Wert besitzt.

2) Aufsatz mit Röhrrchen. Auf einem horizontalen Träger sind 6 Glasröhrrchen befestigt, die von der Drehungsachse die relativen Distanzen 1, 2 und 3 besitzen. Die Röhrrchen auf derselben Seite haben untereinander gleiche Durchmesser, die der anderen Seite aber einen davon verschiedenen. Vor dem Versuche werden die Röhrrchen bis zum Rande mit Wasser gefüllt; für Demonstration vor einem Auditorium wäre gefärbtes Wasser zu verwenden. Konzentrisch zur Drehungsachse ist auf der Zentrifugalmaschine ein Ring angebracht, auf den ein beiderseits offener Glaszylinder gestellt wird, damit das beim Versuche wegspritzende Wasser aufgefangen wird.



1, 2 und 3 besitzen. Die Röhrrchen auf derselben Seite haben untereinander gleiche Durchmesser, die der anderen Seite aber einen davon verschiedenen. Vor dem Versuche werden die Röhrrchen bis zum Rande mit Wasser gefüllt; für Demonstration vor einem Auditorium wäre gefärbtes Wasser zu verwenden. Konzentrisch zur Drehungsachse ist auf der Zentrifugalmaschine ein Ring

angebracht, auf den ein beiderseits offener Glaszylinder gestellt wird, damit das beim Versuche wegspritzende Wasser aufgefangen wird.

Setzt man den Apparat vorübergehend in Rotation, so zeigt sich nachträglich das Niveau in den verschiedenen Röhrrchen erniedrigt, und zwar gilt für die Niveausenkung h die früher theoretisch abgeleitete Formel:

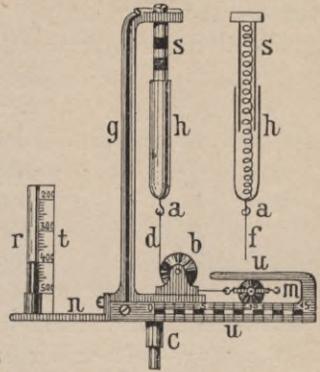
$$h = \frac{4\pi^2}{g} n^2 \varrho r$$

n ist hierbei der während der Rotation erreichte Maximalwert der Tourenzahl.

Es ergibt sich also zunächst durch Vergleich der drei Röhrrchen auf derselben Seite, daß h proportional der Distanz r ist, so daß die Mittelpunkte der Niveauflächen eine nach innen ansteigende Gerade bilden. Die symmetrisch gelegenen Röhrrchen links und rechts zeigen verschiedenen Stand, und zwar tieferen in den weiteren Röhrrchen, da h proportional dem Röhrrchenradius ϱ ist.

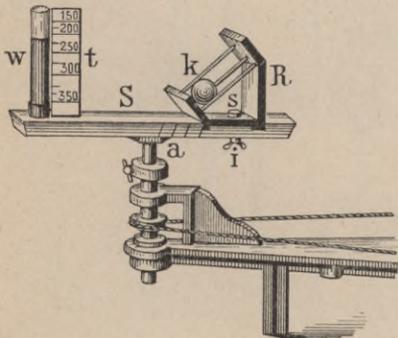
3) Aufsatz mit Federmanometer zur quantitativen Prüfung der Fliehkraftformel. Die bewegliche Masse m hat die Gestalt eines

Wägelchens, das oben und unten durch Schienen u eine Führung erhält. An einer Skala ist die Distanz seines Schwerpunktes von der Drehungsachse abzulesen. Von dem Wägelchen führt eine Schnur über eine fixe Rolle b in der vertikalen Verlängerung der Drehungsachse aufwärts zu einem Federdynamometer h. Wird der Apparat in Rotation versetzt, so bewegt sich m so weit nach außen, daß die Zentrifugalkraft gerade der Spannung der Feder das Gleichgewicht hält. Die Hülse des Federdynamometers läßt in herabgezogenem Zustande auch während der Rotation die ringförmigen Striche der Teilung s am inneren Kerne sehen, so daß die Anzahl der freigewordenen und daher sichtbaren Ringe direkt die Größe der Kraft angibt, und zwar entspricht auf der empirisch hergestellten Skala 1 Intervall dem Werte von 100 g-Gew.



Wird also der Apparat in gleichmäßige Rotation versetzt, so ist die Größe der Zentrifugalkraft direkt abzulesen. Andererseits aber ist ihr Wert durch die Formel $F = 4\pi^2 m n^2 r$ gegeben. Die Masse M des Wägelchens ist durch Wägung zu bestimmen, seine Entfernung r von der Drehungsachse liest man nachträglich an der Skala längs der Schienen ab, indem man es mit der Hand so weit hinauszieht, daß die Dynamometerskala s dieselbe Einstellung wie während der Rotation zeigt. Endlich ist noch die Tourenzahl n zu bestimmen. Hierzu wird ein nebenan befestigtes Röhrchen r verwendet, das entsprechend den in Versuch 2) besprochenen Gesetzen funktioniert; die neben dem Röhrchen stehende Skala t gibt direkt die Anzahl der Touren pro Minute. Der aus $4\pi^2 m n^2 r$ berechnete Wert der Zentrifugalkraft ist mit dem direkt am Dynamometer abgelesenen Werte zu vergleichen. Man übersehe dabei nicht, daß die Fliehkraftformel in der hier verwendeten Form die Messung der Kraft in absoluten Einheiten (Dyn) zur Voraussetzung hat, daß also die Tourenzahl auf die Sekunde und die in g-Gew abgelesene Kraft in Dyn ($1 \text{ g-Gew} = 980 \text{ Dyn}$) umzurechnen ist.

4) Aufsatz mit Kugel zur quantitativen Prüfung der Fliehkraftformel.

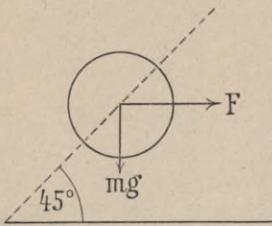


Die horizontale zum Drehzapfen senkrechte Schiene S trägt auf der einen Seite ein Röhrchen w mit Skala t , das so wie beim vorhin besprochenen Apparate als Tourenzähler dient, auf der andern Seite einen Schlitten R , der in vier verschiedenen Entfernungen von der Achse mittels der Schraube s fixiert werden kann. Auf diesem Schlitten bilden drei unter 45° geneigte Drähte die Führung für eine

zwischen ihnen mit sehr geringer Reibung bewegliche Kugel k . Der Mittelpunkt der Kugel hat in den 4 Stellungen die Distanzen 0, 1, 2 und 3 cm von der Achse.

Wird der Apparat mit allmählich steigender Geschwindigkeit in Rotation versetzt, so liefert die aus der Schwere mg und der Fliehkraft $F = 4\pi^2 m n^2 r$ entstehende Resultierende eine Komponente in der Richtung der aufsteigenden schiefen Ebene, sobald $F > mg$ ist. In dem Momente also, wo F diesen kritischen Wert überschreitet, schlägt die Kugel hörbar an das obere Ende des Rahmens an. Stellt man nun die Drehung ein, so kann nachträglich am Tourenzähler die der

maximalen Geschwindigkeit entsprechende Tourenzahl abgelesen und die Formel $g = 4\pi^2 n^2 r$ für die verschiedenen Stellungen (verschiedene Werte von r) empirisch bestätigt werden. Natürlich ist n wieder auf sec^{-1} umzurechnen.

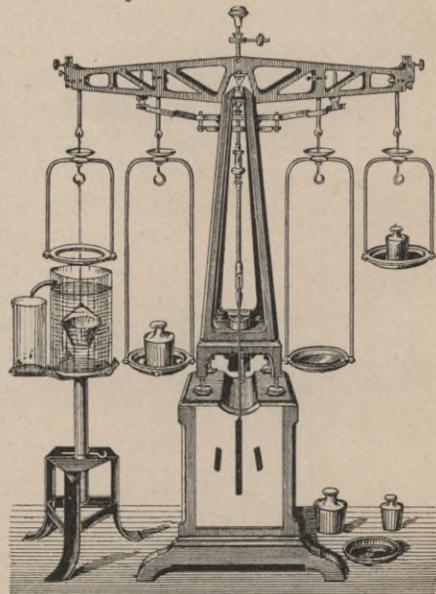


4. Die Demonstrationswage.

Instrumentarium: Rueprecht'sche Demonstrationswage mit zwei Schalenpaaren (lang und kurz); 2 Gewichte à 1000 g; 2 Gewichte à 500 g; Gewichtssatz; Tara (Schrot); Apparat für Archimedisches Prinzip; Senkkörper, Becherglas; Flasche mit Salzlösung; verstellbares Tischchen; 2 Glaszylinder; Kipp'scher Apparat für Kohlensäure; Spule mit feinem Messingdraht; Spritzflasche; Filtrierpapier.

Beschreibung des Apparates. Die Rueprecht'sche Demonstrationswage besteht aus einem gußeisernen Stative, das mit 4 Stellschrauben auf einem Holzuntersatze aufgestellt ist. Ein Senkel läßt die richtige Stellung der Wage durch sein Einspielen erkennen. Der — außer bei den Wägungen selbst stets durch die Arretiervorrichtung abgehobene und fixierte — Wagebalken besitzt einen vertikal nach abwärts gerichteten Zeiger, dessen Spitze über einer für den Experimentator bestimmten Skala schwingt; ein rechtwinklig gebogener Bügel, der mittels einer gut passenden federnden Hülse über diesen Zeiger geschoben werden kann, bildet eine Verlängerung des Zeigers und gibt, über einer an der Vorderseite des Holzuntersatzes angebrachten Skala (bestehend aus

Die Rueprecht'sche Demonstrations-



drei dicken Streifen) spielend, für ein Auditorium weithin sichtbar die Einstellung der Wage an.

Längs des Zeigers ist ein Laufgewicht mit mäßiger Reibung vertikal verschiebbar behufs Demonstration der Empfindlichkeitsänderungen bei vertikaler Verlagerung des Schwerpunktes des Wagebalkens (Grobverstellung des Schwerpunktes in vertikaler Richtung).

Von der Mitte des Wagebalkens vertikal nach aufwärts ragt eine Schraubenspindel, auf welcher eine Schraubenmutter als 2. Laufgewicht vertikal verstellt werden kann. Diese Mutter besitzt noch eine horizontal stehende Schraubenspindel, auf welcher abermals eine Schraubenmutter als 3. Laufgewicht in horizontaler Richtung verschiebbar ist. Das zweite Laufgewicht dient erstens zur vertikalen Verschiebung des Wagebalkenschwerpunktes, indem es in Ergänzung der mit dem früher erwähnten ersten Laufgewichte ausgeführten Grobverstellung eine eventuell gewünschte Feinverstellung ermöglicht; zweitens gestattet es in Verbindung mit dem 3. Laufgewicht eine horizontale Verlagerung des Schwerpunktes, welche bei der Justierung der Wage derart vorgenommen wird, daß die unbelastete Wage sich in der Symmetriestellung befindet, d. h. daß der Zeiger sich auf die Mitte der Skala einstellt. Dreht man das 2. Laufgewicht um die vertikale Spindel, so beschreibt das 3. Laufgewicht einen Bogen und ändert damit die horizontale Lage des Schwerpunktes verhältnismäßig stark (Grobverstellung); wird dagegen bloß das 3. Laufgewicht auf der ruhenden horizontalen Schraubenspindel der Mitte genähert oder von ihr entfernt, so entspricht dies der Feinverstellung des Schwerpunktes in horizontaler Richtung.

Außerdem befindet sich am oberen Ende der vertikalen Schraubenspindel noch ein massiver Messingknopf. Wird die Wage als Demonstrationswage vor einem Auditorium benutzt, mit dem oben erwähnten Bügel als weithin sichtbarem Zeiger, so ist dieser Knopf aufzuschrauben, da er die Tieferlegung des Schwerpunktes durch den Bügel kompensiert. Soll nur ein einzelner Beobachter die Wage benutzen, so werden Bügel und Knopf entfernt (auch der Holzuntersatz wird dann entbehrlich), da jetzt durch Beseitigung der überflüssigen Gewichte die Empfindlichkeit der Wage erhöht wird (vergl. später unter »Theorie«).

Der Wagebalken trägt außer dem dreikantigen Stahlprisma, das die Drehungsachse bildet, noch 3 Paare von innen scharf geschliffenen Stahlringen, in die die Schalen einzuhängen sind; 2 Paare — in den beiläufigen Entfernungen von 16 bzw. 32 cm von der Achse — sind fix und liegen mit der Drehungsachse in einer Ebene (vergl. später unter »Theorie«); sie sind für die wirklichen Wägungen bestimmt und liefern eine kurzarmige und eine langarmige Wage. Das 3. äußerste Ringpaar (zirka 34 cm Distanz) ist nach Lösung einer Fixierungsschraube in vertikaler und horizontaler Richtung etwas verstellbar und dient bloß zu Demonstrationsversuchen, welche die Eigenschaften einer fehlerhaften Wage (ungleicharmige Wage, Wage, bei der die drei Schneiden nicht in einer Ebene liegen) veranschaulichen sollen.

Von Schalen sind 2 aus je gleichschweren Stücken bestehende Paare vorhanden, mit langem und mit kurzem Bügel, je nach Bedarf im Einzelfalle zu verwenden. Die Bodenplatte ist herauszunehmen, so daß in die Ringe die Glaszylinder eingehängt werden können; auch bei Verwendung als hydrostatische Waage wird die Platte entfernt. Die kleinen Schälchen am oberen Ende der Bügel dienen in diesem Falle zur Aufnahme von Tara und kleinen Gewichtstücken; unterhalb dieser Schälchen befinden sich Haken für jene Versuche, bei denen Körper, mittels feinen Drahtes aufgehängt, nicht auf der Schale liegend, gewogen werden sollen.

Theorie der Versuche. Man pflegt die Eigenschaften, die eine Waage vom Typus des gleicharmigen Hebels besitzen soll, zu formulieren als: 1) Stabilität, 2) Richtigkeit, 3) Empfindlichkeit der Waage.

Die Stabilität der Waage ist dadurch bedingt, daß der Schwerpunkt des Wagebalkens inklusive der mit ihm starr verbundenen Teile (also inklusive Zeiger, Laufgewichte etc., aber exklusive der Wagschalen) in der Symmetriestellung (horizontaler Hebel, vertikaler Zeiger) vertikal unterhalb der Drehungsachse liegt, also bei einer Verdrehung des Wagebalkens ein rücktreibendes Drehungsmoment liefert. Liegt der Schwerpunkt in der Drehungsachse (indifferentes Gleichgewicht des Wagebalkens) oder oberhalb (labiles Gleichgewicht), so bringt — abgesehen von Reibungswiderständen — das kleinste Übergewicht die Waage zum Umschlagen, und auch bei gleicher Belastung (gleichem Drehungsmomente der Kräfte) ist die Ruhelage entweder unbestimmt (beim indifferenten Gleichgewichte) oder eine labile, also praktisch nicht herstellbare. Bei stabilem Gleichgewichte dagegen ist die Einstellung der unbelasteten Waage (»Nullpunkt«) eine definierte, und die Einstellung bei nur angenähert gleichen Belastungen weicht vom Nullpunkt um einen Betrag ab, der der noch vorhandenen Belastungsdifferenz proportional ist, so daß ein systematisches Verfahren zur Ermittlung der richtigen Belastung möglich ist.

Die Richtigkeit der — bereits als stabil vorausgesetzten — Waage ist dadurch bedingt, daß die beiden Hebelarme gleich lang sind. Exakt gleiches Gewicht der Schalen ist nicht unbedingt erforderlich; denn bei gleichen Hebelarmen ändert sich die Einstellung der Waage nicht, wenn beiderseits gleiche Gewichte (Körper — Gewichtstücke) hinzukommen; allerdings darf aber das eventuelle Übergewicht der einen Schale nicht so groß sein, daß die Ruhelage der unbelasteten Waage bedeutend von der Symmetriestellung abweicht, da sonst die Skala, auf der der Zeiger spielt, unverwendbar würde.

Die Empfindlichkeit der Waage ist gegeben durch die Einstellungsänderung (im Winkelmaße oder in Intervallen der Skale angegeben), welche ein bestimmtes Übergewicht hervorruft; sie bestimmt zugleich die absolute (im Gegensatz zur prozentuellen) Genauigkeit des Wägungsergebnisses.

Sowohl für die Empfindlichkeit als für die Richtigkeit und Stabilität der Waage maßgebend ist die relative Lage der Angriffspunkte der Kraft (Schneiden der Schalenaufhängung) und der Drehungsachse.

a) Es sei zunächst vorausgesetzt, daß die Angriffspunkte der Kräfte (Schalengewicht + Gewicht des aufgelegten Körpers) A und B mit der Drehungsachse O in einer Geraden liegen und daß $OA = OB = l$ sei. Das Gewicht des Wagebalkens sei mit G , die Distanz OS seines Schwerpunktes von der Achse mit h bezeichnet. Ist dann die Belastung einerseits P , andererseits $P + p$, so ergibt sich als stabile Gleichgewichtslage eine gegenüber dem Nullpunkte um den Winkel α verdrehte, wobei α bestimmt ist durch die Gleichung:

$$Pl \cos \alpha + Gh \sin \alpha = (P + p)l \cos \alpha \text{ also: } \operatorname{tg} \alpha = p \frac{1}{Gh}$$

d. h. der Ausschlag ist dem Übergewichte p proportional und der Proportionalitätsfaktor, die »Empfindlichkeit«, ist der Balkenlänge l direkt, dem Gewichte des Balkens G und der Schwerpunktsdistanz h umgekehrt proportional. Die beiderseits gleiche Belastung P ist in dieser Gleichung nicht enthalten, ein bestimmtes kleines Übergewicht, z. B. 10 mg, bringt also den gleichen Ausschlag hervor, ob es auf die unbelastete oder auf die beiderseits mit beliebigen Gewichten P belastete Wage gelegt wird.

Für $h = 0$ würde die Empfindlichkeit unendlich groß werden, zugleich aber die Bedingung der Stabilität nicht mehr erfüllt sein.

b) Es sei wieder $OA = OB = l$, der Winkel dieser beiden Geraden mit der Horizontalen aber nicht null, sondern gleich β . Die Gleichgewichtsbedingung — analog der obigen — lautet nun:

$$Pl \cos (\beta - \alpha) + Gh \sin \alpha = (P + p)l \cos (\beta + \alpha) \text{ oder:}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = p \frac{l \cos \beta}{Gh + (2P + p)l \sin \beta}$$

Die Empfindlichkeit ist jetzt abhängig von der Größe der Belastung P und

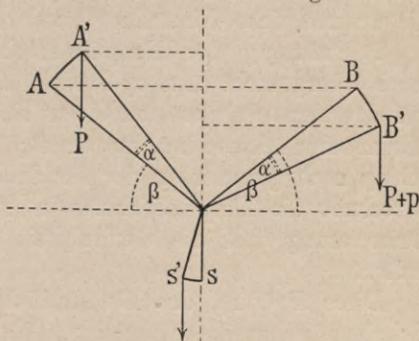
nimmt ab, wenn diese zunimmt.

c) Die Verhältnisse seien dieselben wie im Falle (b), nur der Winkel β nach aufwärts gerichtet. Die Gleichgewichtsbedingung lautet jetzt:

$$Pl \cos (\beta + \alpha) + Gh \sin \alpha = (P + p)l \cos (\beta - \alpha) \text{ oder:}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = p \frac{l \cos \beta}{Gh - (2P + p)l \sin \beta}$$

Die Empfindlichkeit ist wieder abhängig



von der Belastung und nimmt mit dieser zu; für einen Wert P , der den Nenner der obigen Gleichung null macht, wird sie unendlich groß und damit zugleich das Gleichgewicht der belasteten Waage ein labiles.

Wenn die beiden Schalen etwas verschiedenes Gewicht besitzen, so weicht die Nullstellung der unbelasteten Waage um einen kleinen Winkel δ von der Symmetrielage ab; für die Form (a) bleiben aber die wirksamen Hebelarme $l \cos \delta$ einander gleich und die Waage bleibt daher richtig; in den unter (b) und (c) angenommenen Fällen dagegen sind die Hebelarme $l \cos(\beta + \delta)$ und $l \cos(\beta - \delta)$, also voneinander verschieden und die Herstellung der ursprünglichen Gleichgewichtslage durch einen abzuwägenden Körper Q und die Belastung P mittels Gewichtstücken entspricht einer Wägung mit ungleicharmiger Waage. Die Bedingung, daß AOB eine Gerade sei, ist daher bei der Herstellung der Waage möglichst genau zu erfüllen.

Ausführung der Versuche. 1) Justierung der Waage. Es wird hier stets vorausgesetzt, daß die Waage in der für Demonstrationsversuche geeigneten Form, also mit Bügel und kompensierenden Knopf (vergl. S. 15) verwendet wird.

Zunächst ist mittels der Stellschrauben das Senkel zum Einspielen zu bringen; nach Entfernung der Wagschalen wird das Laufgewicht I (vergl. Beschreibung S. 15) auf dem Zeiger in eine durch Striche markierte Stellung nahe dem oberen Ende geschoben und mittels der Laufgewichte II und III zunächst die grobe, dann die feine Horizontalverschiebung des Schwerpunktes ausgeführt, so daß nach Auslösung der Arretierung der Wagebalken eine von der Symmetrielage (Zeiger in der Mitte der Skala) nur wenig abweichende Gleichgewichtslage annimmt; natürlich wird vor jeder eventuell nötigen Verstellung der Laufgewichte die Waage wieder arretiert. Man überzeugt sich, daß das Gleichgewicht ein stabiles sei.

Die Schalen werden nun wieder eingehängt, und zwar in jenes Schneidenpaar, welches korrekt liegt (mit der Drehungsachse in einer Geraden) und den größeren Hebelarm (zirka 32 cm) besitzt. Sollte die mit den nominell gleich schweren Schalen versehene Waage eine merkliche Abweichung von der früher beobachteten Ruhelage zeigen (infolge zufälliger Gewichtsänderung der Schalen durch Verunreinigung u. dergl.), so ist durch Trieren die ursprüngliche Einstellung wieder herzustellen.

2) Prüfung der Empfindlichkeit. Man ermittelt durch Probieren jenes Übergewicht (den cg-Stücken des Gewichtsatzes entnommen), welches auf der sonst unbelasteten Waage eine auch für entferntere Zuschauer noch erkennbaren Ausschlag hervorruft; außerdem bestimmt man diesen Ausschlag noch genauer an der für den Experimentator bestimmten Skala und berechnet die Empfindlichkeit in Skalenteilen pro Centigramm, um eine Orientierung über die Genauigkeit der auszuführenden Wägungen zu erhalten.

Diese Prüfung der Empfindlichkeit wird wiederholt, indem man die Schalen beiderseits mit gleichen Gewichten von je 100 g, bzw. 500 und

1000 g belastet. Die Empfindlichkeit erweist sich, entsprechend dem früher unter (a) theoretisch abgeleiteten Resultate, als annähernd konstant. Eine leichte Abnahme der Empfindlichkeit mit steigender Belastung rührt daher, daß selbst bei ursprünglich korrekter Lagerung der Schneiden durch die größere Belastung der Balken etwas durchgebogen wird und daher die unter (b) behandelte Form annimmt.

3) Variation der Empfindlichkeit mit der Länge des Hebelarmes. Werden die Schalen in das Schneidenpaar mit dem halben Hebelarm (zirka 16 cm) eingehängt, so zeigt sich entsprechend dem Resultate von Proportionalität der Empfindlichkeit mit dem Hebelarme diese auf die Hälfte verringert.

4) Variation der Empfindlichkeit durch vertikale Verschiebung des Schwerpunktes. Das Laufgewicht I wird an das untere Ende des Zeigers geschoben; die Empfindlichkeit ist bedeutend verringert (entsprechend der umgekehrten Proportionalität mit h).

Geht man umgekehrt über die durch Striche markierte Stellung hinauf, so wird das Gleichgewicht ein labiles, da nun der Schwerpunkt oberhalb der Drehungsachse liegt.

5) Waage mit nicht geradem Hebel. Das äußerste, in der Höhe verstellbare Schneidenpaar wird zur Aufhängung der Schalen verwendet, und zwar zunächst bei möglichst tiefer Lage der Schneiden, so daß der Fall (b) (Seite 17) realisiert ist. Die Prüfung der Empfindlichkeit bei verschiedenen Belastungen ($P = 0, 100, 500, 1000$) ergibt eine rasche Abnahme.

Die Schneiden werden nun (bei inzwischen ausgehängten Schalen) in die höchste Lage verstellt, so daß Fall (c) realisiert ist. Die analog wie früher ausgeführte Prüfung der Empfindlichkeit ergibt zunächst eine Zunahme derselben mit steigender Belastung, weiterhin aber ein Labilwerden der Waage.

6) Bestimmung des Wagarmverhältnisses. Unter Verwendung der richtig gelegenen Schneiden wird zunächst der Nullpunkt der Waage ermittelt, hierauf die Schalen mit je 1000 g belastet und die eventuell vorhandene, jedenfalls aber sehr geringe Abweichung der Einstellung durch Zusatzgewichte ausgeglichen. Um zu entscheiden, ob diese Abweichung auf einer tatsächlichen Verschiedenheit der nominell gleichen Gewichtstücke à 1 kg oder auf einer Ungleichheit der Hebelarme beruht, werden die beiden Gewichtstücke gegeneinander vertauscht und wie früher der Nullpunkt wieder hergestellt; ist das hierzu erforderliche Zusatzgewicht auf derselben Wagschale wie früher aufzulegen, so war die Ungleichheit der Hebelarme die Ursache, und man findet das Verhältnis der beiden Arme aus der Beziehung: $PL = (P + p)R$; wenn dagegen das Zusatzgewicht in beiden Fällen zum gleichen kg-Stück hinzuzulegen wäre, so wäre hieraus auf eine Differenz zwischen den beiden angeblich gleichen Gewichtstücken zu schließen. Es sei darauf aufmerksam gemacht, daß auch an korrekt hergestellten Gewichten solche Abweichungen bei unachtsamer Behandlung

nachträglich entstehen können, speziell infolge Amalgamierung der Gewichte durch verspritzte Quecksilbertropfen.

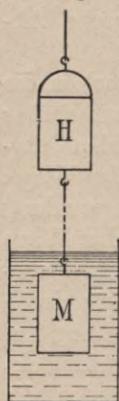
Wirken beide Ursachen zusammen, so findet man die — eventuell negativ zu rechnenden Zulagegewichte auf der rechten Seite in den beiden Versuchen verschieden und kann aus den Gleichungen

$$PL = (P' + p_1)R \text{ und } P'L = (P + p_2)R$$

sowohl den Quotienten $\frac{R}{L}$ als auch die Differenz $(P - P')$ bestimmen. Bei gut instand gehaltenen Wagen und Gewichtsätzen werden aber innerhalb der erreichbaren Genauigkeit keine solchen Abweichungen zu konstatieren sein.

Zur Demonstration des Gaußschen Verfahrens der Doppelwägung verwendet man nun die verstellbaren Schneiden, indem man diese zunächst bezüglich ihrer Höhenlage in die richtige, dem Typus (a) entsprechende Stellung bringt, dann aber durch seitliches Verschrauben absichtlich den einen Hebelarm verlängert. Die vorher an der richtigen Wage als gleich befundenen Gewichte P und P' erfordern zur Einstellung auf den Nullpunkt bei beiden Wägungen das gleiche Zulagegewicht auf der gleichen Seite, und das Verhältnis $\frac{R}{L}$ wird in der oben beschriebenen Weise daraus abgeleitet.

7) Demonstration des Archimedischen Principes. Ohne Ausführung absoluter Wägungen, bloß durch Trieren, läßt sich der Archimedische Satz, daß der Auftrieb eines in eine Flüssigkeit getauchten Körpers gleich dem Gewichte des von ihm verdrängten Flüssigkeitsvolumens sei, mittels folgenden Apparates nachweisen:



Ein massiver Messingzylinder M , der an der oberen Fläche ein eingeschraubtes Häkchen trägt, paßt genau in einen Hohlzylinder H , der unten verschlossen, oben offen und mit einem Bügel versehen ist. Die Gleichheit der Volumina des Massivzylinders und des Hohlraumes ergibt sich unmittelbar aus der Betrachtung der beiden ineinandergesteckten Körper.

Nach Entfernung der Bodenplatte der einen Wagschale wird nun mittels eines feinen Messingdrahtes zunächst der Hohlzylinder H an dem Häkchen des Schalenbügels und dann M mittels eines zweiten Drahtes an das im Boden von H eingeschraubte Häkchen gehängt. In diesem Zustande wird die Wage tariert, ohne daß die Größe der aufgelegten Tara (= Gewicht der beiden Zylinder samt Drähten minus Gewicht der entfernten Schalenplatte) explizit ermittelt wird, und wieder arretiert.

Durch Heben eines auf das verstellbare Tischchen gesetzten, mit Wasser gefüllten Becherglases bringt man das Wasserniveau einige mm über die obere Fläche von M und konstatiert nun, daß nach Lösung der Arretierung das Gleichgewicht gestört ist im Sinne einer scheinbaren Gewichtsabnahme des angehängten Systemes. Füllt man nun (bei wieder arretierter Wage!)

mit der Spritzflasche den Hohlraum von H vollständig mit Wasser — man füllt zunächst etwas zu viel Wasser ein, so daß der Meniskus in H eine gewölbte Kuppe bildet, und ebnet diese durch Absaugen mittels Filtrierpapiere —, so zeigt eine abermalige Auslösung, daß das Gleichgewicht wieder hergestellt ist, daß also die Füllung von H den Auftrieb von M gerade kompensiert.

8) Bestimmung des spezifischen Gewichtes eines Senkkörpers. Man verwendet die kurzen Wagschalen, entfernt wie früher auf der einen Seite die Bodenplatte und tariert diesen Gewichtsverlust durch Zulage von Bleistücken und Schrot auf das obere kleine Schälchen. Ein Senkkörper aus Messing resp. Blei wird nun mittels dünnen Messingdrahtes am Haken des Schalenbügels befestigt und sein Gewicht K bestimmt. Eine zweite Wägung, bei der der Senkkörper analog wie im früheren Versuche in ein von unten genähertes, mit Wasser gefülltes Becherglas vollkommen eintaucht, gibt das Gewicht $(K-W)$ und damit die Daten zur Berechnung des spezifischen Gewichtes $s_k = \frac{K}{W}$.

9) Bestimmung des spezifischen Gewichtes einer Salzlösung. Der Versuch wird vollkommen analog wie der vorige ausgeführt, nur noch eine dritte Wägung angeschlossen, bei der das Becherglas mit der zu untersuchenden Salzlösung gefüllt ist und das scheinbare Gewicht $(K-F)$ erhalten wird. Das spezifische Gewicht der Lösung berechnet sich aus:

$s = \frac{F}{W}$; da das Gewicht K des Senkkörpers herausfällt, genügt für die erste Wägung (in Luft) eine bloße Tarierung. Nach Beendigung des Versuches ist der Senkkörper gut in Wasser abzuspülen und mit Filtrierpapier zu trocknen.

10) Wägung von Gasen. Zwei Glaszylinder mit Boden, am oberen Ende offen und mit abgeschliffenem Rande versehen, von etwa je 3 l Inhalt, können nach Entfernung der Bodenplatten in die Ringe der langen Wagschalen entweder eingehängt werden oder umgekehrt — mit der Mündung nach unten — auf die Ringe aufgestellt werden. Man gibt dem einen Zylinder die hängende, dem anderen die stehende Lage und tariert ein eventuell vorhandenes Übergewicht aus. Wird in einem der Zylinder die Luft durch ein schwereres oder leichteres Gas ersetzt, so ist die entsprechende Gewichtszunahme resp. Abnahme leicht zu konstatieren.

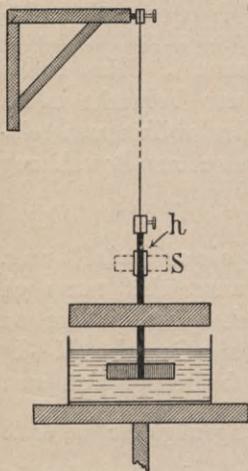
Das schwerere Gas (Kohlensäure) wird in einem sogen. »Kipp'schen Apparate« aus Marmorstückchen und Salzsäure erzeugt und mittels eines angesetzten Schlauches in das hängende Gefäß geleitet. Da die Dichte der Kohlensäure bezüglich Luft rund 1.5 beträgt und ein Liter Luft rund 1.2 g wiegt, erhält man eine Gewichtszunahme von 0.6 g pro Liter, also ca. 2 g im ganzen.

Nach Ausschwenken des vorher mit Kohlensäure gefüllten Zylinders und Wiederherstellung des Gleichgewichtes erhält man in analoger Weise eine Gewichtsabnahme der gleichen Größenordnung, indem man Leuchtgas (Dichte = 0.47) in den umgekehrt stehenden Zylinder einleitet.

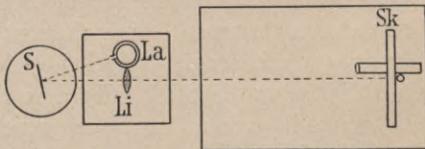
5. Apparat für Torsionsschwingungen.

Instrumentarium: Fix montierter Torsionsapparat; verstellbares Tischchen mit Öldämpfung; zweites verstellbares Tischchen; Stativ mit horizontaler Skale und Fernrohr; Auerbrenner mit Schornstein; Stopuhr; geschlitzter Eisenring.

Beschreibung des Apparates. An einer an der Wand befestigten Konsole ist eine Klemmvorrichtung angebracht, in die das obere Ende eines zirka 1 m langen vertikal herabhängenden Stahldrahtes eingespannt ist. Das untere Ende dieses Drahtes ist in analoger Weise in einer Klemme fixiert, die am oberen Ende eines Stieles sitzt, der senkrecht im Mittelpunkte einer horizontalen Holzscheibe eingelassen ist. Auf diesem Stiele sitzt eine Hülse *h* in Form eines geschlitzten und daher federnden Messingröhrchens, das um den Stiel als Achse gedreht und auch in vertikaler Richtung verschoben werden kann; auf dieser Hülse ist ein kleiner rechteckiger Spiegel *s* aufgekittet. In der Verlängerung des Drahtes und Stieles geht von der Holzscheibe ein Stift vertikal abwärts, der mit Blechflügeln versehen ist und nach Bedarf in eine mit Vaselineöl gefüllte Schale getaucht werden kann, indem man diese von unten her mittels eines verstellbaren Tischchens emporhebt.



Der Spiegel *s* befindet sich ungefähr in Gesichtshöhe eines sitzenden Menschen. Zwischen den Torsionsapparat und einen gewöhnlichen Tisch (zur Aufstellung des Fernrohres und der Skala) kann noch ein zweiter in der Höhe verstellbarer Tisch eingeschoben werden, der für die Aufnahme von einem Auerbrenner und einer Projektionslinse bestimmt ist. Der Auerbrenner ist mit einem Blechzylinder versehen, der über den Glaszylinder übergeschoben wird und einen schmalen vertikalen Schlitz besitzt.



Ausführung der Versuche. Der Hauptzweck der Versuche ist die Aufstellung einer Versuchsanordnung für objektive (durch Projektion) oder für subjektive (mittels Fernrohr) Beobachtung mit Spiegel und Skale, wie sie an zahlreichen Demonstrations- und Meßapparaten (Magnetometer, Elektrometer, Galvanometer, Drehwage etc.) üblich ist, und die hier gewissermaßen an einem in größerem Maßstabe gehaltenen und übersichtlichen Modelle eingeübt werden soll.

1) Aufstellung für objektive Ablesung. Es handelt sich zunächst darum, eine Lichtquelle *A* (durch den Auerbrenner beleuchteter Schlitz) und eine Sammellinse *L* derart vor dem drehbaren Spiegel *SOS* aufzustellen, daß

L von dem virtuellen Spiegelbilde A' ein reelles scharfes Bild auf einer in etwa 2 m Entfernung aufgestellten Skala entwirft (vgl. Grundriß Fig. S. 22).

Gemäß der Gleichung für Gegenstands- und Bildweite bei der Linse: A',

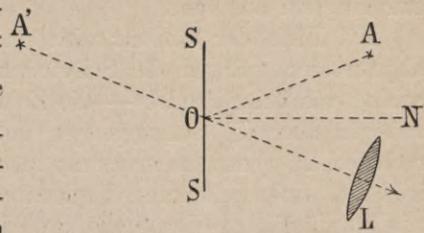
$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, muß die Gegenstandsweite

A'L etwas größer sein als die Brennweite f der Linse. Man ermittelt zunächst ungefähr die Brennweite der verwendeten Linse, indem man von einem

entfernten Gegenstand (Fenster, entfernte Glühlampe oder dergl.) ein scharfes Bild auf einem hinter die Linse gehaltenen Papierblatte entwirft; ergibt sich z. B. $f = 25$ cm, so folgt aus obiger Formel, daß $a = 29$ cm sein muß, damit das scharfe Bild in der gewünschten Entfernung von 2 m auf der Skala erscheine. In der halben Entfernung (also rund 15 cm im Beispiel) werden dann Auerbrenner und Projektionslinse nebeneinander auf das Tischchen gestellt, derart daß ihre Höhe mit der des Spiegels übereinstimmt. Die Verbindungslinie Spiegelmittelpunkt—Linse soll die Linse senkrecht durchschneiden und in ihrer Verlängerung die Mitte der in gleicher Höhe mit Spiegel und Linse aufgestellten Skala treffen. Als solche verwendet man die Skala des Ablesefernrohres, das selbst vorläufig unbenutzt bleibt und daher eventuell auch entfernt werden kann. Ebenso wird die Glühlampenbeleuchtung der Skala nicht benützt, da das Bild des Schlitzes hell auf dunklem Grunde erscheinen soll.

Durch Drehen der Hülse h (nicht den Spiegel selbst anfassen, da er leicht abbricht!) kann man nun leicht erzielen, daß in der Ruhelage die Spiegelnormale ON den Winkel zwischen den Richtungen OA und OL halbiert, so daß das reelle Bild von A' in der Mitte der Skala erscheint. Eine geringe Verschiebung (Annäherung oder Entfernung) der Linse gegen den Spiegel bewirkt nun, daß das Bild des Schlitzes auf der Skala vollkommen scharf wird und auch im nicht verdunkelten Zimmer weithin sichtbar ist. Diese Einstellungen werden natürlich vorgenommen, während das aufgehängte System in seiner Gleichgewichtslage ruht, resp. nachdem die eventuell durch den Beobachter hervorgerufenen Schwingungen wieder aufgehört haben; es ist daher zweckmäßig, die Dämpferflügel ganz in das Ölbad einzusenken.

2) Beobachtung der Schwingungsdauer bei ungedämpfter Schwingung. Das verstellbare Tischchen mit der Öldämpfung wird vorsichtig tiefer gestellt, so daß bloß eine praktisch zu vernachlässigende Dämpfung durch Luftreibung vorhanden ist. Die Holzscheibe wird nun — möglichst ohne seitliche Verrückung, die Schwingungen nach Art eines gewöhnlichen Pendels hervorruft — um die durch ihren Mittelpunkt gehende Achse um einen kleinen Winkel gedreht und losgelassen, derart daß die nun erfolgenden Torsionsschwingungen das Bild des beleuchteten Schlitzes



nicht über die Enden der Skala hinausschwanke lassen. Man überzeugt sich, daß die Größe des Ausschlages der geringen Dämpfung entsprechend nur langsam abnimmt.

Mit Hilfe der Stopuhr wird nun die Zeit für z. B. 10 Schwingungen abgemessen; erfolgen die Schwingungen rasch, so wird am bequemsten — analog wie beim Pendel — die Zeit von einem Umkehrpunkt an gerechnet; erfolgen aber die Schwingungen langsam, so ist der Moment der Umkehr nicht scharf genug zu erfassen; in diesem Falle stellt man sich eine Marke in Form eines schwarzen Papierstreifens her, der über die Skale gehängt wird, beiläufig an der Stelle, wo sich die Ruhelage des Lichtstreifens befindet, und wo er daher die größte Geschwindigkeit besitzt. Man bestimmt dann die Zeit zwischen dem 0^{ten} und zehnten Durchgang des Lichtstreifens.

3) Bestimmung des Trägheitsmomentes und des Direktionsmomentes. Die im vorigen Versuche ermittelte Schwingungsdauer τ_0 ist bestimmt durch das Direktionsmoment Δ des Drahtes und das Trägheitsmoment K_0 der Scheibe samt Nebenbestandteilen. Unter Direktionsmoment versteht man dabei den konstanten Proportionalitätsfaktor zwischen dem Drehungsmomente D , welches der tordierte Draht ausübt, und dem (im Bogenmaße gemessenen) Drehungswinkel α , indem $D = \Delta \alpha$ gesetzt wird. Die Schwingungsdauer (Dauer der Halbschwingung) ist dann:

$$\tau_0 = \pi \sqrt{\frac{K_0}{\Delta}}$$

Vergrößert man das Trägheitsmoment durch Zulegen weiterer Massen auf den Wert K' , so vergrößert sich auch die Schwingungsdauer und es gilt:

$$\frac{\tau'^2}{\tau_0^2} = \frac{K'}{K_0}$$

Dadurch, daß man einen Körper bekannten (aus Masse und Dimensionen berechenbaren) Trägheitsmomentes K_1 hinzulegt, also $K' = K_0 + K_1$ setzt, kann man aus den beobachteten Werten von τ_0 und τ' den Wert K_0 und auch Δ berechnen. Als Zusatzkörper wird hier ein eiserner Ring (rechteckigen Querschnittes) verwendet, der einen Schlitz besitzt, damit der konzentrisch auf die Holzscheibe aufgelegt werden kann. Die Beobachtung der Schwingungsdauer τ' erfolgt analog wie früher. Das Trägheitsmoment K_1 berechnet sich zu

$$K_1 = M \frac{r_a^2 + r_i^2}{2}$$

wenn M die Masse (in g), r_a und r_i der äußere bzw. innere Radius des Ringes (in cm) bezeichnen.

4) Untersuchung gedämpfter Schwingungen. Nach Entfernung des Zulagekörpers (eisernen Ringes) wird die Öldämpfung wieder gehoben; es ist dabei darauf zu achten, daß die Dämpferflügel die Wand des Gefäßes nicht berühren. Analog wie vorher aus der Ruhelage gedreht und losgelassen, führt die Scheibe gedämpfte Schwingungen aus. Man beobachtet an der Skala die aufeinanderfolgenden Umkehrpunkte $u_0, u_1, u_2 \dots u_n$;

die Ruhelage R wird nachträglich beobachtet, wenn die Schwingungen unmerklich klein geworden sind. $u_1 - R = a_1$ gibt dann die Größe (abwechselnd positiv und negativ) des i^{ten} Ausschlages und das angenähert konstante Verhältnis zweier aufeinanderfolgenden Ausschläge $k = \frac{a_i}{a_{i+1}}$ das sogenannte »Dämpfungsverhältnis«.

6) Subjektive Ablesung. Auerbrenner und Projektionslinse werden entfernt und das Fernrohr auf demselben Stativ befestigt, das die früher verwendete Skala trägt. Beide sind vertikal verschiebbar, das Fernrohr steht unterhalb der Skala.

Man dreht nun den Spiegel des Torsionsapparates derart, daß in seiner Ruhelage die Normale in jene Richtung fällt, in welcher man Fernrohr und Skala aufzustellen wünscht. Diese vorläufig zur Seite stellend, sucht man mit freiem Auge die Lage dieser Normalen genauer zu ermitteln, indem man jenen Punkt aufsucht, von dem aus man im kleinen Spiegel das Bild des eigenen Auges erblickt. Eventuell kann das Spiegelbild einer neben dem Gesichte gehaltenen Flamme (Kerze, Zündhölzchen) gesucht werden, die Normale liegt dann in der Halbierungslinie des Winkels Auge—Spiegel—Flamme. Nun wird das Stativ mit Fernrohr und Skala so aufgestellt, daß die durch die Spiegelnormale gehende Vertikalebene ungefähr die Mitte der Skala schneidet und daß die Skala beiläufig ebenso hoch über der Normalen als das Fernrohr unterhalb liegt. Knapp neben dem Fernrohr vorbeivisierend, findet man dann durch geringe vertikale Verschiebungen der — nun zu beleuchtenden — Skala leicht eine Stellung, in der ihr Spiegelbild sichtbar wird. Nachdem das Fernrohr auf den Spiegel gerichtet wurde, zieht man den Tubus aus, bis das Skalenbild scharf erscheint. Nachträglich können nun noch feinere Verstellungen von Fernrohr und Skala vorgenommen werden, die z. B. einen bestimmten runden Teilstrich in die Mitte des Gesichtsfeldes bringen.

Analoge Einstellungen bei Meßapparaten mit drehbarem Spiegel sind häufig erforderlich.

6. Das Toricelli'sche Ausflußgesetz.

Instrumentarium: Toricelli'sche Ausflußröhre; Stativ; Schale; Trichter; Quecksilber, Wasser, Äthyläther; Stopuhr.

Theorie des Versuches. Befindet sich in einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Gefäße eine Öffnung in der Tiefe h unter dem freien Niveau, so ergibt sich für die Geschwindigkeit, mit welcher die Flüssigkeit diese Öffnung passiert, der Wert $v = \sqrt{2gh}$, also derselbe Wert, den ein Körper im freien Falle durch die Strecke h erreicht hätte. Man erhält dieses Resultat unmittelbar aus dem Prinzip von der Erhaltung der Energie, indem man die kinetische Energie $\frac{m v^2}{2}$ eines eben austretenden Volumelementes

gleich dem Verluste an potentieller Energie mgh setzt. Die kinetische Energie der Strömung und Wirbelbewegung der noch im Gefäße zurückgebliebenen Flüssigkeit und die gegen die Kräfte der inneren Reibung geleistete Arbeit ist hierbei vernachlässigt. Das Toricelli'sche Gesetz stellt also einen idealen Grenzfall dar, der mit um so größerer Annäherung realisiert ist, je dünner die Wand des Gefäßes und je kleiner die Ausflußöffnung ist.

In der Formel $v = \sqrt{2gh}$ ist keine Materialkonstante der Flüssigkeit enthalten, da die innere Reibung eben vernachlässigt ist, das spezifische Gewicht aber den hydrostatischen Druck, die den Ausfluß hervorbringende Kraft, und die Größe der in Bewegung zu setzenden Masse im gleichen Verhältnis beeinflusst; die Ausflußgeschwindigkeit ist also unabhängig von der Natur der Flüssigkeit.

Beschreibung des Apparates. Der Apparat zum Nachweis obigen Gesetzes besteht aus einer Glasröhre, die am unteren Ende in eine Spitze ausgezogen ist; der Winkel des Konus ist aber ein ziemlich stumpfer, damit nicht bei der Strömung durch eine längere verengte Partie der Röhre — wie dies bei schlanker Spitze der Fall wäre — der Einfluß der inneren Reibung zu sehr hervortritt. An der Röhre sind zwei Marken in Form kleiner Papierstreifen angebracht, welche dasjenige Volum abgrenzen, für welches die Ausflußzeit bestimmt werden soll. Die Beobachtung der Zeit, welche zur völligen Entleerung des Gefäßes notwendig ist, wäre unangemessen, da für den Ausfluß der letzten Reste (bei geringer Druckhöhe) die Form der Oberfläche und damit die Kapillarkonstante der Flüssigkeit von Einfluß ist.

Ausführung des Versuches. Die Röhre wird vertikal stehend in ein Stativ geklemmt und ihr unteres Ende nur wenige cm über den Boden der Auffangschale eingestellt, damit — speziell bei Quecksilber — der auffallende Strahl nicht zu stark zerspritze. Falls die Glasröhre nicht rein sein sollte, ist sie mit verdünnter Salzsäure und mit Wasser auszuspülen und hierauf mit Alkohol und Äther zu trocknen (vergl. S. 159).

Über eventuelle Herstellung einer neuen Röhre vergl. S. 160.

Der Versuch, welcher die Unabhängigkeit der Ausflußdauer von der Natur der Flüssigkeit zeigen soll, wird mit Quecksilber, Wasser und Äthyläther (spezifische Gewichte 13·6, 1 und 0·7, also bedeutend verschieden) ausgeführt, und zwar am besten mit Quecksilber zuerst, damit die Röhre nicht nochmals getrocknet werden muß. Das Quecksilber ist eventuell vorher zu reinigen (vergl. S. 158).

Die Flüssigkeiten werden durch einen Trichter bis über die obere der beiden Marken eingegossen. Mit der Stopuhr wird dann die Zeit aufgenommen zwischen den Momenten, in denen der Flüssigkeitsspiegel die 1. und die 2. Marke passiert. Die so erhaltenen Ausflußzeiten erweisen sich innerhalb der Beobachtungsfehler für alle drei Flüssigkeiten als gleich; da sie sich auf dasselbe Volum beziehen, ist auch die Geschwindigkeit des Ausflusses in allen drei Fällen dieselbe.

7. Vergleich der inneren Reibung verschiedener Flüssigkeiten.

Instrumentarium: 3 Apparate für innere Reibung auf gemeinsamem Stativ; Stopuhr; Wasser, Quecksilber, Petroleum, Vaselineöl.

Theorie des Versuches. Im Gegensatz zum Ausfluß durch eine Öffnung in einer dünnen Wand ist beim Strömen durch eine lange enge Röhre (Kapillare) die innere Reibung wesentlich für die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsbewegung. Quantitativ formuliert wird dies durch das sogenannte Poiseuille'sche Gesetz:

$$v_t = \frac{1}{8\pi\eta} \cdot \frac{q^2}{l} p t$$

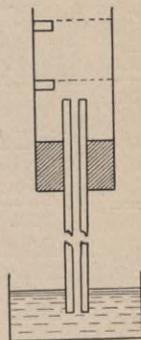
wobei v_t das in der Zeit t die Röhre passierende Volum, q und l Querschnitt und Länge des Kapillarrohres, p den Druck, unter dem der Ausfluß erfolgt, und η der Koeffizient der inneren Reibung der betreffenden Flüssigkeit ist. Der Druck p ist bei der später beschriebenen Form des Apparates einfach der hydrostatische Druck der Flüssigkeit, also durch $h \cdot s$ beziehungsweise durch $h s g$ darzustellen, je nachdem der Druck in g -Gew oder in Dyn pro cm^2 ausgedrückt wird. Verwendet man daher für verschiedene Flüssigkeiten in ihren Dimensionen identische Apparate, so gilt

$$\frac{s t}{\eta} = \text{Const. oder } \frac{\eta'}{\eta} = \frac{s' t'}{s t}$$

Beschreibung des Apparates. Der Apparat besteht aus drei gleichbeschaffenen Einzelgefäßen, die auf einem gemeinsamen Stativ montiert sind. Eine weitere, mit 2 Marken versehene Röhre ist am unteren Ende mit einem durchbohrten Kautschukstopfen verschlossen, durch welchen ein vertikal stehendes Kapillarrohr geführt ist. Unterhalb steht eine Auffangsschale.

Ausführung der Versuche. Die drei Ausflußgefäße werden beziehungsweise mit Wasser, Quecksilber und Petroleum bis über die obere Marke gefüllt, und es wird analog wie im vorigen Versuch die Ausflußzeit für das zwischen den beiden Marken gelegene Volum mit der Stopuhr bestimmt. Die Produkte $s t$ ergeben die Relativwerte der inneren Reibung.

Die Ausflußzeit ist für Quecksilber am kleinsten, da $s = 13,6, \eta$ nur zirka 1,5 bezüglich Wassers ist, für Petroleum dagegen bedeutend größer als für Wasser. Füllt man statt Petroleum Vaselineöl ein, so erfordert der Ausfluß Stunden. Nach Benutzung des Vaselineöles ist die betreffende Röhre mittels Benzins zu reinigen.



8. Oberflächenspannung.

Instrumentarium: Seifenlösung, Porzellankuvette, rechteckiger Drahtrahmen mit Handgriff, Stricknadeln, Schlingen aus dünnem Seidenzwirn,

Pinzette, gestielte Drahtfiguren (Tetraëder, Würfel etc.), T-Rohr mit Hähnen und Schlauch, kleines Schälchen.

Theorie der Versuche. Infolge der Wirkung von Molekularkräften verhält sich eine Flüssigkeitsoberfläche ähnlich wie eine gespannte elastische Haut, die das Bestreben hat, sich zusammenzuziehen, und als geschlossene Fläche einen Druck nach innen ausübt. Quantitativ wird dieses Verhalten dargestellt durch Angabe einer für eine bestimmte Flüssigkeit charakteristische Materialkonstante, die sogenannte Oberflächenspannung oder Kapillarkonstante α .

Diese Größe ist von der Dimension einer Kraft pro Längeneinheit oder — was dasselbe ist — einer Arbeit pro Flächeneinheit; sie kann definiert werden entweder als die Kraft, welche längs einer in der Flüssigkeitsoberfläche gedachten Linie senkrecht zu dieser pro Längeneinheit angebracht werden muß, damit die Molekularkräfte auf der entgegengesetzten Seite im Gleichgewicht gehalten werden, oder als die Arbeit, welche zu leisten ist, um die Oberfläche um die Flächeneinheit zu vergrößern.

Denkt man sich eine Flüssigkeitshaut, z. B. eine Lamelle einer Seifenlösung, von einem rechteckigen Drahtrahmen begrenzt, dessen eine Seite von der Länge b beweglich ist, so muß eine Kraft P angebracht werden, um das Gleichgewicht zu erhalten. Mit Rücksicht darauf, daß die Haut zwei Begrenzungsflächen besitzt, ist $P = a \cdot 2b$ beziehungsweise die Arbeit, welche zu leisten ist, um den beweglichen Querstift in die Entfernung $(a + x)$ zu bringen: $A = a \cdot 2b \cdot x = a(F_1 - F_0)$. Bei Anwendung des absoluten Maßsystemes ist a in $\frac{\text{Dyn}}{\text{cm}}$, resp.

$\frac{\text{Erg}}{\text{cm}^2}$ zu rechnen, bei Anwendung der Gewichtseinheit als Krafteinheit wird a gewöhnlich in $\frac{\text{mg-Gew}}{\text{mm}}$ angegeben; für Wasser ist z. B. $a = 7.7 \frac{\text{mg-Gew}}{\text{mm}} = 75.5 \frac{\text{Dyn}}{\text{cm}}$.

Denkt man sich eine solche Flüssigkeitshaut zu vernachlässigender Dicke in Form einer geschlossenen Kugel vom Radius r , so wäre die Arbeit bei Vergrößerung des Radius auf $(r + dr)$ gegeben durch:

$$A = a \cdot d [8 \pi r^2] = 16 \pi a r dr$$

andererseits durch:

$$A = 4 \pi r^2 p dr$$

wenn p den aus der Oberflächenspannung resultierenden Druck nach innen darstellt. Es ist also $p = \frac{4a}{r}$.

Ausführung der Versuche. 1) Herstellung einer Seifenlösung. Da Seifenlösungen in der Regel nicht lange haltbar sind, ist es eventuell erforderlich, eine solche frisch zu bereiten. Vergleiche hierüber S. 159.

2) Versuch mit Drahtrahmen. Die Seifenlösung wird einige mm

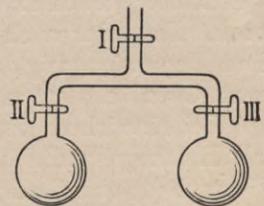
hoch in eine rechteckige Porzellankuvette eingefüllt und ein mit Handgriff versehener rechteckiger Drahtrahmen hineingestellt, so daß die vorher durch Abwischen mit in Benzin getauchtem Wattebausch gereinigten Drähte vollkommen benetzt werden. Bei vorsichtigem Herausheben bildet sich dann eine längere Zeit haltbare Seifenwasserlamelle. Eine ebenfalls vorher gereinigte Stricknadel wird mittels einer Pinzette (es ist zu vermeiden, die Seifenlösung mit den Fingern in Berührung zu bringen) in der Lösung benetzt und quer über den horizontal gehaltenen Rahmen gelegt. Stößt man nun eine der beiden Hälften der Haut mittels eines Holzstäbchens (Zündhölzchen) durch, so daß sie zerplatzt, so zieht sich die übrigbleibende Hälfte zusammen. Bei schief gehaltenem Drahtrahmen kann man bei einiger Übung jene Neigung erzielen, bei welcher die längs der schiefen Ebene wirkende Komponente des Gewichtes der Nadel gleich der von der Oberflächenspannung herrührenden Kraft $2ba$ ist und bei der daher Gleichgewicht eintritt.

3) Versuch mit Faden. Eine aus dünnem Seidenzwirn hergestellte Schlinge (von etwa 6 cm Umfang) wird mittels der Pinzette in die Lösung getaucht und dann vorsichtig auf die wie früher im horizontal gehaltenen Rahmen hergestellte Lamelle aufgelegt. Diese zerreißt nicht, sondern trägt den Faden, der eine unregelmäßige geschlossene Kurve bildet. Zerstört man wieder durch Durchstoßen den innerhalb des Fadens gelegenen Teil der Lamelle, so nimmt der Faden durch die Wirkung der am Umfange gleichmäßig verteilten, nach außen gerichteten Kräfte Kreisform an, und zwar um so exakter, je geringer seine Steifigkeit ist.

Nach Beendigung des Versuches sind Drahtrahmen, Pinzette und Faden in Wasser abzuspülen und zu trocknen.

4) Minimalflächen. Die Seifenlösung wird einige cm hoch in ein Becherglas gefüllt, so daß die — vorher gereinigten — gestielten Drahtfiguren (Würfel, Tetraëder u. a.) vollkommen eingetaucht werden können. Beim Herausziehen bilden sich Seifenwasserlamellen, die nicht einfach den Flächen des betreffenden Polyëders entsprechen, sondern von den Drahtkanten zu im Innern gelegenen Linien verlaufen, längs derer je drei Lamellen unter gleichen Winkeln (von 120°) zusammenstoßen. Diese sehr regelmäßigen Figuren genügen der Bedingung, daß die Gesamtoberfläche der Seifenlamellen ein Minimum ist.

5) Druck in Seifenblasen. Ein T-förmiges Rohr, dessen drei Schenkel mit Hähnen versehen sind, wird in der gezeichneten Lage vertikal stehend in ein Stativ geklemmt. Indem man zunächst die Hähne I und II öffnet, III schließt und die Mündung bei II in ein Schälchen mit Seifenlösung taucht, stellt man durch Blasen in den bei I angesetzten Schlauch eine Seifenblase von etwa 5 cm Durchmesser her. Läßt man nun das Schlauchende offen, so zieht sich diese Blase zusammen, und



zwar anfangs langsam, später immer rascher, da der Druck der Blase nach innen ihrem Radius umgekehrt proportional ist (vergl. S. 28).

Direkt kann die Abhängigkeit des Druckes vom Radius gezeigt werden, indem man zwei Blasen verschiedener Größe gegeneinander wirken läßt. Zunächst wird bei II wie früher eine Blase hergestellt und dann Hahn II geschlossen; nun wird Hahn III geöffnet und in analoger Weise bei III eine Blase hergestellt, die merklich größer als die bei II ist. Zuletzt wird Hahn I geschlossen und Hahn II geöffnet, so daß die in den Blasen eingeschlossenen Luftmengen nach außen abgesperrt sind, aber miteinander kommunizieren. Infolge des größeren Druckes in der kleinen Blase ändern beide ihr Volumen derart, daß die kleinere sich zusammenzieht, die größere noch mehr aufgeblasen wird.

9. Kapillarität.

Instrumentarium: 2 U-Rohre mit kapillarem Schenkel; U-Rohr mit verkürztem kapillarem Schenkel; Trichter; Glastrog mit 4 geraden Kapillaren verschiedenen Durchmessers; Spritzflasche; Quecksilber; Filtrierpapier.

Theorie der Versuche. Die im vorigen Abschnitte (vergl. S. 28) behandelte Theorie der Oberflächenspannung ergab für eine Hohlkugel zu vernachlässigender Dicke (Seifenblase) einen Druck nach innen in der Größe

$p = \frac{4a}{r}$; für eine Massivkugel (also bei bloß einer Begrenzungsfläche der

Flüssigkeit) erhält man für den Druck den halben Wert $p = \frac{2a}{r}$ und für

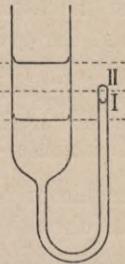
eine beliebig gekrümmte Begrenzungsfläche den Wert $p = a \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$, wobei die Größen r_1 und r_2 die beiden Hauptkrümmungsradien an dem betreffenden Punkte darstellen und positiv bei konvexen, negativ bei konkaven Flächen zu rechnen sind.

Von der Form der Oberfläche (Meniskus), die eine Flüssigkeit in einem Rohre bildet, hängt daher der Wert des auf der Oberflächenspannung beruhenden Druckes ab; diese Form ist aber im allgemeinen wieder bestimmt durch die zwischen der Flüssigkeit und dem begrenzenden festen Körper wechselseitig wirkenden Molekularkräfte. So gibt Wasser und andere sogenannte »benetzende« Flüssigkeiten in einem Rohre einen konkav gekrümmten Meniskus, daher negativen Druck und kapillare Elevation, Quecksilber gewöhnlich konvexen Meniskus und daher kapillare Depression. Daß aber auch eine benetzende Flüssigkeit, wie z. B. Wasser, kapillare Depression zeigt, wenn durch irgendwelche Umstände eben eine konvexe Oberfläche erzwungen wird, beweist Versuch (2).

Bei hinreichend engen Röhren kann der Meniskus angenommen werden als Halbkugel vom Radius des Röhrchens, und dementsprechend kann der Versuch (4) quantitativ zur Bestimmung von a ausgestaltet werden.

Ausführung der Versuche. 1) Kapillarelevation und -depression. In einem gemeinsamen Standbrette sind 2 U-Rohre befestigt, deren innere Schenkel von kapillaren Dimensionen sind, während die äußeren Schenkel etwa 1 cm Durchmesser besitzen. Das eine U-Rohr wird etwa zur Hälfte mit Wasser, das andere mit Quecksilber gefüllt; in den Kapillarröhren zeigt sich dann bei Wasser Elevation, bei Quecksilber Depression; um diese Erscheinung einem größeren Zuschauerkreise sichtbar zu machen, werden die beiden Röhren projiziert (vergl. S. 162).

2) Abhängigkeit des Kapillardruckes von der Form des Meniscus. Ein U-Rohr ähnlicher Konstruktion wie im vorigen Versuche wird verwendet, nur ist jetzt der kapillare Schenkel verkürzt, etwa bis zur halben Höhe des weiteren reichend. Zunächst füllt man mittels der Spritzflasche das weitere Rohr nur teilweise mit Wasser, so daß in normaler Weise kapillare Elevation eintritt, etwa in der Lage I des Niveaus (vergl. Figur). Durch weiteres Zugießen steigt das Wasser im Kapillarrohr bis zum oberen Ende und fließt teilweise aus; da die zurückbleibende Kuppe konvexe Krümmung besitzt, steht nun im Gleichgewichtsfalle das Niveau II im weiten Rohre höher, analog wie beim Quecksilber im ersten Versuche. Durch Absaugen mittels Filtrierpapiertes kann man den Meniskus nahezu zu einer Ebene machen, in diesem Falle steht das Niveau in beiden Röhren gleich hoch.



3) Steighöhe in Kapillaren verschiedenen Durchmessers. Ein parallelepipedischer Glastrog wird mit einer Korkplatte bedeckt; durch einige nebeneinanderliegende Löcher werden mehrere Kapillarröhren gleicher Länge, aber verschiedenen Durchmessers gesteckt. Da trockenes Glas häufig von Wasser nicht gut benetzt wird, schiebt man zunächst die Röhren so tief als möglich und bringt durch leichtes Klopfen mit einem Holzstäbchen die Meniski möglichst hoch; werden nun die Röhren etwas hinausgezogen, aber natürlich nur so weit, daß ihr unteres Ende eingetaucht bleibt, so senkt sich der Meniskus relativ zum Rohr, erhöht aber gewöhnlich seine Niveaudifferenz gegen die Oberfläche im Glastrog, da er nun an eine vorher unter Wasser befindliche und daher gut benetzte Stelle der Rohrwand zu liegen kommt.

Die Steighöhe (proportional $\frac{1}{r}$, genauer $h = \frac{2a}{rs}$) ist in den verschiedenen Röhren verschieden groß, was im projizierten Bilde wieder für ein Auditorium sichtbar gemacht werden kann. Eine Messung von h und r würde auf Grund obiger Formel zu einer Bestimmung von a führen.

10. Ausströmung von Gasen durch enge Öffnungen.

Instrumentarium: Ausströmungsapparat; Glasschale; Stativ; Fluoreszeinlösung; Stopuhr; Kipp'scher Apparat für Kohlensäure.

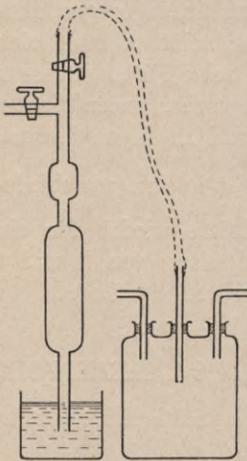
Theorie der Versuche. Es handelt sich um die dem Toricelli'schen Ausflußgesetze für Flüssigkeiten (vergl. S. 25) entsprechende Erscheinung bei Gasen. Befindet sich ein Gas unter einem Überdruck p in einem geschlossenen Gefäße und strömt es durch eine enge Öffnung in der — wieder als sehr dünn vorausgesetzten — Gefäßwand aus, so ist die Geschwindigkeit, beziehungsweise das ihr proportionale per Zeiteinheit ausströmende Volum, umgekehrt proportional der Wurzel aus der Dichte des Gases. Man erhält diese Beziehung in analoger Weise wie beim Toricelli'schen Gesetze, indem man — unter Vernachlässigung der inneren Reibung und der kinetischen Energie der Strömung im Innern des Gefäßes — die kinetische Energie eines eben austretenden Volumelementes Δv gleichsetzt der geleisteten Arbeit.

Allgemein ist bei einer Volumänderung eines Gases die geleistete Arbeit gleich $p \Delta v$, wenn p den Druck im Innern des Gefäßes bezeichnet. Es ist also $\frac{m c^2}{2} = \frac{1}{2} \rho \Delta v c^2 = p \Delta v$ oder $c = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$, wobei ρ die Dichte des Gases ist. Da alle Gase durch Druck- und Temperaturänderungen im gleichen Verhältnis ihre Dichte ändern, ist für zwei gegebene Gase der Quotient ihrer absoluten (auf Wasser von 4^0 C bezogenen) Dichten konstant, wenn beide für die gleichen, im übrigen aber beliebigen Werte von Druck und Temperatur gemessen werden.

Durch die Beobachtung der Ausflußzeit τ für ein bestimmtes Volum, bei zwei Gasen, die auf gleicher Temperatur sind und unter gleichem Überdruck ausströmen, ist daher die relative, gewöhnlich auf Luft bezogene, Dichte zu berechnen nach der Formel:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \quad \text{oder} \quad \frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^2$$

Beschreibung des Apparates. Ein Glasrohr besitzt zwei zylindrische Erweiterungen, von denen die obere kleinere als Reservoir dient, die untere größere das bezüglich seiner Ausflußzeit zu untersuchende Volum enthält. Das obere Ende des Rohres ist mit einem Hahne I versehen, ebenso das seitlich angesetzte Rohr mit einem Hahne II. Vom oberen Ende führt eine Schlauchverbindung zu einem Metallröhrchen, dessen unteres Ende mit einem aufgelöteten dünnen Blechplättchen verschlossen ist. Ein mit feiner Nadel gestochenes Loch stellt die kleine Ausflußöffnung dar.



Das Metallröhrchen ist mittels eines durchbohrten Korkes in ein mit drei Hälse versehenes Gefäß (sogenannte Wulf'sche Flasche) eingesetzt. Die beiden anderen Hälse gestatten die Ein- beziehungsweise Durchleitung eines beliebigen Gases.

Ausführung der Versuche. 1) Das Glasrohr wird in vertikaler Stellung in ein Stativ geklemmt; das untere Ende taucht in eine Schale, die mit durch einige Tropfen Fluoreszeïnlösung gefärbtem Wasser gefüllt ist. Die Wulf'sche Flasche wird ausgeblasen, damit eventuell von früheren Versuchen zurückgebliebene Reste anderer Gase entfernt werden, und die Schlauchverbindung hergestellt. Schließt man den Hahn I und öffnet II, so kann durch Saugen an dem bei II angesetzten Schlauche das Wasser bis etwa in die Mitte des Reservoirgefäßes gebracht werden.

Wird nun Hahn II geschlossen und dann I geöffnet, so strömt das in der Wulf'schen Flasche enthaltene Gas, also zunächst Luft, durch die feine Öffnung ein, da der Druck im Innern des Glasgefäßes gegenüber dem Atmosphärendruck um den hydrostatischen Druck der aufgesaugten Flüssigkeitssäule verringert ist. Der Wasserspiegel sinkt, und während der Entleerung des halbgefüllten Reservoirgefäßes hat man Zeit, sich zur Messung der Ausflußzeit für das Hauptgefäß B vorzubereiten, welche analog wie bei den Versuchen über innere Reibung der Flüssigkeiten (vergl. S. 27) vorgenommen wird. Man wiederholt den Versuch einige Male (mindestens drei Beobachtungen) und bildet den Mittelwert τ_1 der Ausflußzeit für Luft.

2) Man verbindet den einen Tubus der Wulf'schen Flasche mit der Gasleitung und läßt Leuchtgas einströmen. Sobald man annehmen kann, daß die Flasche mit nahezu reinem Leuchtgas und nicht mehr mit einem explosiblen Luft-Leuchtgasgemisch erfüllt ist (nach etwa $\frac{1}{2}$ Minute), zündet man das aus dem Abflußrohr ausströmende Gas an, damit einerseits während des Versuches die Flasche sicher reines Leuchtgas enthält (bei Absperren des Zuflusses würde eine rasche Durchmischung mit Luft eintreten), andererseits die Zimmerluft nicht durch das ausströmende Gas verunreinigt werde. Die Druckdifferenz zwischen dem Innern der Wulf'schen Flasche und der äußeren Luft ist praktisch zu vernachlässigen.

Die Messung der Ausflußzeit τ_2 für Leuchtgas erfolgt ganz analog wie früher; bei der Wiederholung kann man auch eine Wasserstrahlpumpe zum Saugen verwenden, um nicht das bei der ersten Messung in das Innere des Gefäßes eingedrungene Leuchtgas in den Mund zu bekommen. Der Quotient $\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^2$ ergibt die auf Luft bezogene Dichte des Leuchtgases zu etwa 0.47.

3) Mittels des Kipp'schen Apparates wird Kohlensäure in die Flasche eingeleitet; aus der in die Kugel des Kipp'schen Apparates eingedrungenen Säuremenge läßt sich das Volum der ausgetretenen Kohlensäure schätzen, und man sperrt den Hahn des Kipp'schen Apparates ab, sobald ein etwas größeres Quantum ausgetreten ist, als dem Volum der Wulf'schen Flasche entspricht. Unnötige Beanspruchung des Kipp'schen Apparates ist zu vermeiden, da sonst die Gasentwicklung bald aufhört. Da Kohlensäure schwerer als Luft ist und die Diffusion nur sehr langsam vor sich geht, bleibt

die Flasche auch bei offenem Abflußrohr mit diesem Gase gefüllt. Bei der Wiederholung des Versuches wird jedesmal das aus der Flasche in den Ausflußapparat übergegangene Kohlensäurequantum durch neuerliches Einleiten aus dem Kipp'schen Apparat ergänzt. Man erhält für die Dichte von CO_2 aus $\left(\frac{\tau_3}{\tau_1}\right)^2$ den Wert 1.53.

11. Diffusion der Gase durch poröse Scheidewände.

Instrumentarium: Tonzylinder; Stativ; Manometer; Becherglas; Kipp-scher Apparat für Kohlensäure.

Theorie der Versuche. Mit der im vorigen Abschnitte besprochenen Ausströmungsgeschwindigkeit eines Gases durch eine enge Öffnung stehen die Diffusionsvorgänge durch poröse Scheidewände in Zusammenhang.

Sind zwei durch ein poröses Diaphragma getrennte Räume I und II mit Gasgemischen derart erfüllt, daß der Gesamtdruck p in beiden Teilen den gleichen Wert hat, daß aber die Partialdrucke der beiden Gase verschiedene Werte p'_I und p'_{II} , resp. p''_I und p''_{II} besitzen, so tritt durch das Diaphragma Diffusion ein, bis die Partialdrucke jedes Gases auf beiden Seiten gleiche Werte erreicht haben. Die Größe des Diffusionsstromes ist für jedes Gas proportional der Differenz seiner Partialdrucke und ceteris paribus wieder der reziproken Wurzel aus seiner Dichte.

Sind also ursprünglich zwei reine Gase in I und II vorhanden, so dringt jedes durch Diffusion in die andere Hälfte ein, aber mit einer von seiner Dichte abhängigen Geschwindigkeit. Das ursprüngliche Gleichgewicht des Gesamtdruckes wird daher durch den Diffusionsvorgang gestört, und es erfolgt eine Druckzunahme auf jener Seite, welche zuerst das schwerere Gas enthielt, eine Druckabnahme auf der anderen Seite. Da die Diffusion schließlich zu Gleichheit des Gesamtdruckes auf beiden Seiten führen muß, steigt die Druckdifferenz zunächst bis zu einem Maximum an und sinkt dann wieder auf Null.

Beschreibung des Apparates. Die poröse Scheidewand ist gebildet aus einem Tonzylinder, wie solche bei galvanischen Elementen Verwendung finden. Das offene Ende ist durch einen Kork- oder Kautschukstöpsel verschlossen, ein dessen Bohrung durchsetzendes Glasrohr ist durch einen Schlauch mit einem als Manometer dienenden U-Rohr verbunden; als Füllung verwendet man gefärbtes Wasser.

Ausführung der Versuche. 1) Der Tonzylinder wird mit dem Ansatzrohre nach abwärts in ein Stativ geklemmt und mit dem Manometer verbunden. Ein Becherglas wird nun mit der Mündung nach unten über den Zylinder gestülpt und von unten her mit Leuchtgas gefüllt. Entsprechend der größeren Diffusionsgeschwindigkeit des Leuchtgases zeigt das Manometer zunächst wachsenden Überdruck im Innern des Zylinders, hierauf allmählichen Ausgleich. Wird dann das mit Leuchtgas gefüllte Becherglas ent-

fernt, so erfolgt nun Diffusion zwischen der reinen Luft außen und dem Leuchtgas-Luftgemisch innen; das Manometer zeigt zuerst Sinken des Druckes und dann wieder Ausgleich.

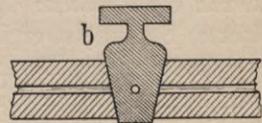
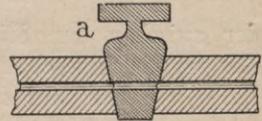
2) Das Becherglas wird mit der Mündung nach oben auf den Tisch gestellt und mittels des Kipp'schen Apparates mit Kohlensäure gefüllt. Stellt man nun den Tonzylinder hinein, so ergibt sich das umgekehrte Verhalten wie früher: zunächst Sinken des Druckes und Ausgleich; nach dem Herausnehmen des Zylinders aus dem Becherglase Steigen des Druckes.

12. Die Luftpumpe.

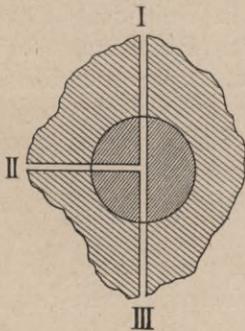
Instrumentarium: Zweistiefelige Luftpumpe (Ventilluftpumpe System Deleuil); Glasteller mit Glocke; Dasymer; Schubleere; Handwage; Draht.

Beschreibung des Apparates. Die Konstruktion der Luftpumpe mit ihren Hauptbestandteilen: Pumpentiefel mit Ventil, Barometerprobe, Rezipient, im allgemeinen kann als bekannt vorausgesetzt werden. Eingehendere Beschreibungen finden sich in den meisten Lehrbüchern der Physik. Hier sei speziell nur die Beschreibung der Hähne im Detail durchgeführt, da hierin verschiedene Systeme voneinander abweichen.

Einfach durchbohrte Hähne sind bei den inländischen oder deutschen Fabrikaten stets derart angefertigt, daß die Bohrung der Längsrichtung des Griffes parallel ist (Figur a); Hähne an Apparaten französischer Provenienz (Figur b) haben dagegen die Bohrung senkrecht zu dieser Richtung, so daß die Stellungen, welche einer Verbindung oder einer Absperrung entsprechen, gerade umgekehrt wie bei dem früheren uns gewohnten Typus sind.



Dreiweghähne, die drei Räume I, II, III in verschiedenen Kombinationen in Verbindung setzen, sind in zwei Arten der Ausführung verbreitet:



a) T-förmig durchbohrter Hahn.

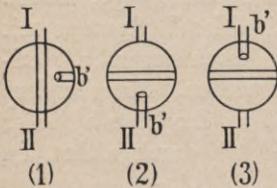
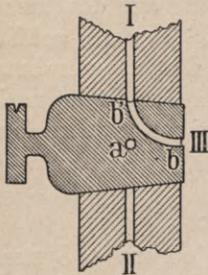
In leicht ersichtlicher Weise kann Drehung des Hahnes in 4 um je 90° voneinander abweichende Stellungen hergestellt werden: I, II, III verbunden; I, II verbunden, III abgesperrt; I, III verbunden, II abgesperrt; II, III verbunden, I abgesperrt; endlich bei Schiefstellung Absperrung aller drei Räume.



Die Lage der Bohrungen soll durch Kerben am Griff des Hahnes (analog liegendes T) markiert sein; ist dies nicht der Fall, so kann man durch Ausprobieren

diese Lage leicht finden und die Marke mittels einer Feile selbst anbringen.

b) Senguerd'scher Hahn. Dieser Hahn besitzt eine gerade Bohrung a wie ein gewöhnlicher Hahn und eine zweite mit dieser nicht in Verbindung stehende gekrümmte Bohrung bb', die einerseits in der Längsachse des Konus, andererseits senkrecht zu dieser und zur Bohrung a verläuft. Die Seite, nach welcher die Öffnung b' geht, soll wieder am Griffe des Hahnes markiert sein. Der Raum III ist hier die freie Atmosphäre, I und II sind abschließbare Räume. In den 3 gezeichneten Stellungen ist I, II verbunden und von III abgesperrt; I abgesperrt und II, III verbunden; II abgesperrt und I, III verbunden.



Babinet'scher Hahn. Mit komplizierter in der Figur dargestellter Bohrung ist

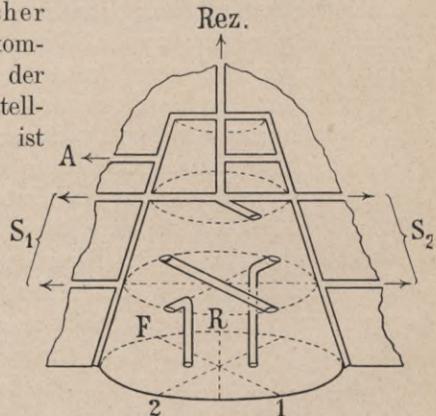
der zwischen den Stiefeln und dem Rezipienten eingeschaltete Babinet'sche Hahn versehen, der sukzessive um je 60° gedreht folgende (am Umfange durch die Zeichen: 1, 2, F, R markierte) Stellungen ergibt:

Stellung 1): Der Rezipient R ist mit beiden Stiefeln SI und SII verbunden; die beiden Stiefel wirken also alternierend bei jedem Pumpenzuge saugend auf den Rezipienten.

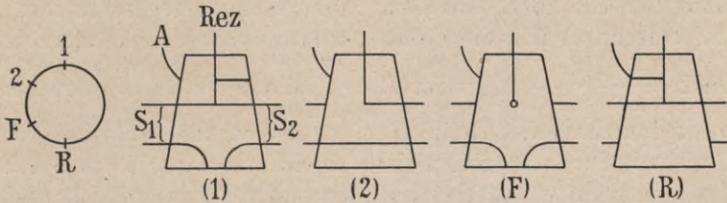
Stellung 2), um 60° gedreht; R ist mit SII in Verbindung, dieser mit Stiefel I. Direkt saugt nur II bei jedem zweiten Pumpenzuge Luft aus dem Rezipienten ab, die in seinem »schädlichen Raume« zurückbleibende Luft wird aber bei den geradzahlig Pumpenzügen von I abgesaugt. Die Evakuierung geht langsamer vonstatten als in Stellung 1, aber die erreichte Grenzverdünnung ist eine höhere. Man verwendet daher Stellung 1 zum Vorpumpen, Stellung 2 am Ende, wenn möglichst hohe Verdünnung beabsichtigt ist.

Stellung F (Fermé); der Rezipient ist vollkommen abgesperrt, die beiden Stiefel sind mit der äußeren Atmosphäre in Verbindung gesetzt, daher luftgefüllt.

Stellung R (Rentrée): ganz analog der Stellung 1, nur daß die Seitenverbindung zum Lufterinlaß A, der einstweilen luftdicht verstößelt ist, offen ist, so daß man durch Öffnen von A die Luft in den Rezipienten und in die Stiefel einlassen kann; die Bohrung bei A ist so enge, daß der Wieder-



eintritt der Luft (daher die Bezeichnung «Rentrée») nicht zu plötzlich erfolgt und daher eine Beschädigung der Barometerprobe hintangehalten wird.



Falls nicht eine direkt auf den Teller der Luftpumpe gestellte Glocke den Rezipienten bildet, sondern ein separates Gefäß ausgepumpt werden soll, wird die Luftpumpe mit diesem durch einen Kautschukschlauch verbunden. Hierzu wählt man Schläuche von etwa 2 mm lichtigem Durchmesser und 4—5 mm dicker Wand, damit sie durch den Druck der äußeren Luft nicht zusammengequetscht werden. Die Ansatzstücke, über welche sie übergeschoben werden, sind vorher mit Vaseline einzufetten, einerseits wegen der leichteren Durchführung des Überschiebens und Abziehens, andererseits zur besseren Dichtung. Ebenso wird der geschliffene Rand von Glocken oder Zylindern, die als Rezipienten auf den Teller gesetzt werden, mit Vaseline stark eingefettet.

Ausführung der Versuche. 1) Prüfung des Funktionierens der Pumpe und der Hahnstellungen. Um die Herstellung der Verdünnung bei der Probe zu beschleunigen, setzt man ein mit zugeschmolzenem Glasrohr verstopftes Schlauchstück an das Ansatzrohr der Pumpe, so daß das auszupumpende Volum möglichst klein ist. Man stellt den Babinet'schen Hahn auf Stellung (1) und beobachtet an der Barometerprobe, die durch einen einfach durchbohrten Hahn (eventuell französischen, vergl. S. 35) mit der Zuleitung zum Rezipienten verbunden ist, das erreichbare Minimum des Druckes. Dasselbe geschieht dann unter Anwendung der Hahnstellung (2).

Will man die Güte der Dichtung prüfen, so sperrt man den Rezipienten ab, durch Hahnstellung F; daß hierbei die Stiefel wieder mit Luft gefüllt werden, ist beabsichtigt und soll verhüten, daß das über dem Stempel befindliche Öl zwischen diesem und der Kolbenwandung durch den äußeren Luftdruck in den luftverdünnten Raum hineingepreßt werde und so allmählich in die Verbindungskanäle eindringe.

2) Nachweis des Archimedischen Auftriebes in Luft mittels des Dasymeters. Auf den Teller, der an der Luftpumpe selbst angebracht ist, oder auf den mittels Schlauchverbindung angeschlossenen separaten Teller (Achtung auf die Stellung des T-Hahnes!) wird ein sogenanntes »Dasymeter« gestellt, d. i. eine kleine Wage, die einerseits eine hohle zugeschmolzene Glaskugel, andererseits ein diese äquilibrierendes Messinggewicht trägt. Die gut eingefettete Glocke wird über das Dasymeter gestellt, und in Stellung (1) die eingeschlossene Luft verdünnt. Entsprechend der Verringerung des Auftriebes in der Luft, welche für das große Volum der Glaskugel

mehr beträgt als für das kleine Volum des Messinggewichtes, wird das Gleichgewicht gestört, und die Glaskugel sinkt. Eine angenäherte Volumbestimmung der Glaskugel (aus dem mittels Schubleere bestimmten Durchmesser zu berechnen) läßt die Größe der Auftriebsverminderung berechnen:

$$\Delta = 0.0012 \frac{B-p}{B} (v_1 - v_2),$$

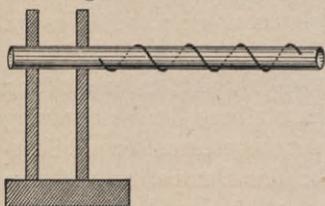
wenn B den Barometerstand, p den erreichten

Grenzdruck innerhalb des Rezipienten, v_1 und v_2 die Volumina von Glaskugel, beziehungsweise Messinggewicht bezeichnen. Aus einem Stück Draht kann man daher ein entsprechendes Übergewicht Δ verfertigen, welches das Gleichgewicht im luftverdünnten Raume wiederherstellt.

13. Demonstration einer fortschreitenden transversalen Welle durch Projektion einer Schraubenlinie.

Instrumentarium: Glasröhre auf Holzgestell; weicher Kupferdraht; Projektionslinse; Projektionslampe; Schirm; Siegellack.

Beschreibung des Apparates und Ausführung des Versuches. Auf einem gemeinsamen Fußbrette befinden sich zwei vertikal stehende Bretchen mit Löchern in gleicher Höhe. Eine dünnwandige Glasröhre von etwa 2 dm Länge und 15 mm Durchmesser kann durch diese Löcher gesteckt werden und läßt sich mit mäßiger Reibung um ihre Längsachse drehen. Auf die Glasröhre wickelt man einen ausgeglühten, daher nicht steifen Kupferdraht von etwa 1 mm Dicke



in Form einer Schraubenlinie auf, derart, daß ihre Ganghöhe etwa 2 cm beträgt. Die Enden des Drahtes werden mittels Siegellacks an der Glasröhre festgekittet; ebenso wird ein Punkt in der Mitte durch ein kleines Siegellacktröpfchen markiert.

Eine Projektionslinse von etwa 20 cm Brennweite entwirft von der Glasröhre und dem Draht auf einem zirka 3 m entfernten Schirm ein etwa 15-fach vergrößertes Bild, und zwar bildet sich die Schraubenlinie auf dem Schirme als Wellenlinie (Sinuslinie) ab. Wird die Röhre um ihre Längsachse mit möglichst gleichförmiger Winkelgeschwindigkeit gedreht, so zeigt das Projektionsbild eine mit konstanter Geschwindigkeit fortschreitende transversale Welle. Die markierte Stelle (Siegellacktröpfchen) führt dabei eine vertikale hin und her gehende Bewegung (Schwingung) aus und demonstriert so die dem Schüler nicht geläufige Tatsache, daß die Bewegungsrichtung der Welle (horizontal) als geometrischer Form verschieden ist von der Bewegungsrichtung der materiellen Punkte (vertikal), welche an der Wellenbewegung teilnehmen.

Theorie des Versuches. Bezeichnet r den äußeren Radius der Glasröhre, λ die Ganghöhe der Schraubenlinie, x die horizontal parallel der Röhrenachse gemessene Koordinate eines Punktes der Schraubenlinie und z

die vertikale Ordinate, so ist: $x = \frac{\lambda}{2\pi} \alpha$, wenn α das Azimut des zugehörigen Punktes bedeutet.

Die Projektion der Schraubenlinie auf eine vertikale Ebene liefert dann eine Kurve, deren Gleichung gegeben ist durch:

$$z = r \sin \alpha = r \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$$

also eine Sinuslinie mit der Amplitude r und der Wellenlänge λ gleich der Ganghöhe der Schraube.

Wird die Röhre mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit $\frac{2\pi}{\tau}$ ($\tau =$ Umdrehungsdauer) in Rotation versetzt, so beschreibt jeder Punkt eine vertikale Kreisbahn und seine Projektion eine Bewegung:

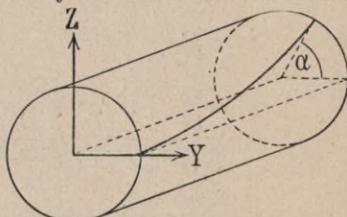
$$z = r \sin \left(\frac{2\pi t}{\tau} + \alpha_0 \right).$$

Die Bewegung des Systemes aller Punkte läßt

sich also, unter Einsetzung von $\alpha_0 = \frac{2\pi x}{\lambda}$, darstellen durch:

$$z = f(x, t) = r \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} t + \frac{2\pi}{\lambda} x \right)$$

d. i. die Gleichung einer transversalen Welle mit der Amplitude r und der Wellenlänge λ , die mit der Geschwindigkeit $\pm \frac{\lambda}{\tau}$ (je nach dem Sinne der Drehung) in horizontaler Richtung fortschreitet.



14. Mach'sche Wellenmaschine.

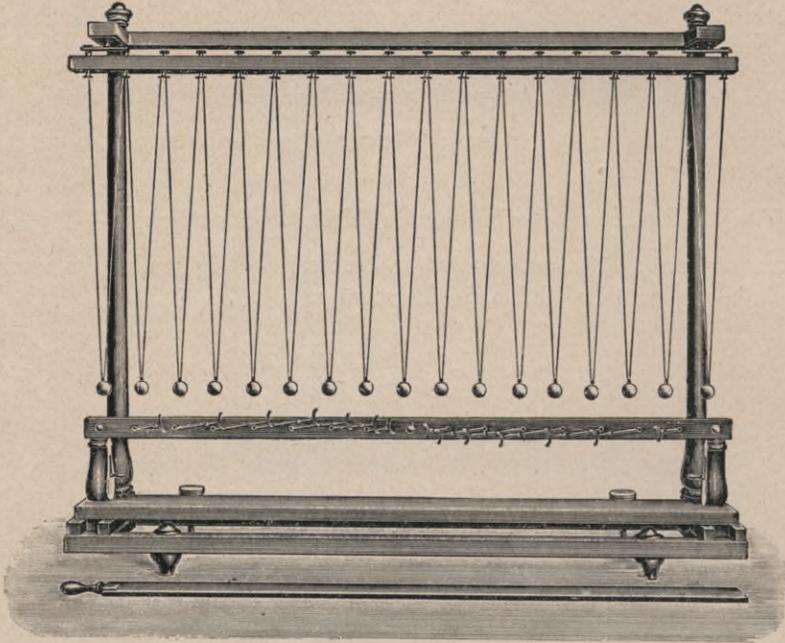
Instrumentarium: Mach'sche Wellenmaschine; dazu Lineal und Schlitten.

Beschreibung des Apparates. Auf einem Rahmen ist eine Anzahl von Pendelkörpern bifilar aufgehängt. Die Doppelleiste, an welcher die Enden der Aufhängeschnüre befestigt sind, läßt sich entweder so stellen, daß die Ebene der beiden Schnüre jedes Einzelpendels parallel der Verbindungslinie der Pendelkugeln ist, oder so, daß sie darauf senkrecht steht. Da die Schwingungen parallel der Schnürebene rasch, die auf ihr senkrechten Schwingungen aber nur wenig gedämpft werden, verwendet man die erste Stellung für Transversalwellen, die zweite für Longitudinalwellen.

Die Enden der Schnüre sind an Schrauben befestigt, mit denen die Länge jedes einzelnen Pendels variiert werden kann.

Unterhalb der Pendelkugeln befindet sich eine Leiste, welche in 2 verschiedenen Stellungen auf ihre Träger aufgesteckt werden kann: a) mit der Schmalseite, welche eine Nut besitzt, nach oben, für Erzeugung fort-

schreitender Wellen; b) mit der Breitseite, welche eine Anzahl von Drahthältern trägt, nach oben, für Erzeugung stehender Wellen. Die Leiste wird durch federnde Hemmungen in erhöhter Lage festgehalten und fällt



durch ihr eigenes Gewicht tiefer, sobald man rechts und links gleichzeitig die aus den Trägern herausragenden Knöpfe herauszieht. Außerdem ist die Leiste samt ihren Trägern horizontal senkrecht zur Kugelreihe verschiebbar.

Theorie der Versuche. Die einzelnen Pendelkörper stellen eine Reihe materieller Punkte dar, deren jeder eine schwingende Bewegung gleicher Periode τ ausführen kann, und zwar je nach Wahl eine transversale:

$$y = A \sin \frac{2\pi t}{\tau} \text{ oder eine longitudinale: } x = B \sin \frac{2\pi t}{\tau}.$$

Zur Erzeugung fortschreitender Wellen (transversal oder longitudinal) gibt man jedem Punkte die gleiche Amplitude, bewirkt aber für je zwei aufeinanderfolgende Punkte die gleiche Phasendifferenz. Zur Erzeugung stehender Wellen läßt man alle Punkte in gleicher Phase schwingen, gibt ihnen aber bezüglich ihrer x -Koordinate periodische Amplituden:

$$A(B) = A_0(B_0) \sin \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

Ausführung der Versuche. 1) Justierung. Man stellt die Doppelreihe so, daß die Schnurebenen parallel der Verbindungslinie liegen (Transversalstellung), schiebt mittels des angelegten Lineales alle Kugeln zugleich aus ihrer Ruhelage und läßt sie durch plötzliches Zurückziehen des Lineales

gleichzeitig los. Bei gleicher Schwingungsdauer würden alle Kugeln identische Bewegungen ausführen und daher stets in einer Front schwingen. Sind aber die Pendellängen nicht exakt gleich, so eilen bald die kürzeren Pendel vor und treten dadurch aus der Front heraus, während die längeren zurückbleiben.

Mittels der Schrauben, an denen die Schnurenden befestigt sind, justiert man die Längen so, daß alle Pendel ziemlich gleiche Schwingungsdauer erhalten, also bei Wiederholung des obigen Versuches nach etwa 20 Schwingungen noch nicht merklich von einer geradlinigen Front abweichen.

2) Fortschreitende transversale Welle. Die untere Leiste wird samt ihren Trägern seitlich verstellt und das Lineal in die Nut eingesetzt, nachdem man die Pendelkugeln mit ihm aus ihrer Ruhelage verschoben hat. Wird nun das Lineal, das in der Nut eine Führung, aber nur mäßigen Reibungswiderstand findet, möglichst gleichmäßig abgezogen, so beginnen die aufeinanderfolgenden Pendelkugeln ihre schwingende Bewegung mit je gleichen Phasendifferenzen; die Schwingungsdauer τ ist durch die Pendellänge gegeben, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Welle ist gleich der Geschwindigkeit der Linealbewegung; somit ist die Wellenlänge $\lambda = c\tau$.

Bei zu raschem Abziehen (große Wellenlänge) prägt sich die Sinusform in der Kugelreihe nicht deutlich genug aus, ebenso bei zu langsamem Abziehen (kleine Wellenlänge); am geeignetsten ist eine Geschwindigkeit, bei der die Wellenlänge etwas kleiner ist als die Distanz der ersten und der letzten Kugel, so daß jederzeit mehr als eine ganze Welle (Berg + Tal) von der Kugelreihe abgebildet wird. Ungleichmäßiges (beschleunigtes oder verzögertes) Abziehen führt zu einer Verzerrung der Wellenform, bei der Berg und Tal nicht mehr symmetrisch sind. Die richtige Form des Wellenzuges erhält sich bei gleichmäßigem Abziehen so lange, als die durch ungleiche Schwingungsdauer der Pendel bewirkten Phasendifferenzen unmerklich bleiben, also um so länger, je sorgfältiger die Justierung (1) vorgenommen wurde.

3) Fortschreitende longitudinale Welle. Um in ganz analoger Weise longitudinale Schwingungen konstanter Phasendifferenz herzustellen, kann man zwei Methoden anwenden:

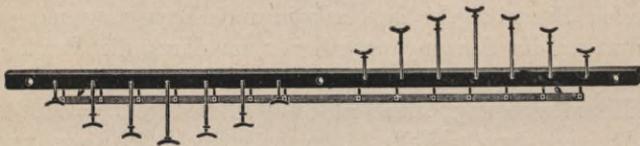
a) Es wird in derselben Weise wie früher zunächst eine transversale fortschreitende Welle erzeugt; hierauf wird die Doppelleiste, an welcher die Pendel befestigt sind, langsam in die Longitudinalstellung (Schnurebenen senkrecht zur Kugelreihe) gedreht; die transversale Komponente der Schwingung wird rasch gedämpft, die longitudinale bleibt erhalten. Bei raschem Umklappen wird zufolge der Tendenz zur Erhaltung der Schwingungsebene die longitudinale Komponente überhaupt nur in zu geringer Größe erzeugt.

Die so entstandene longitudinale fortschreitende Welle erscheint als horizontales Fortschreiten von Stellen, an denen die Kugeln längs ihrer Verbindungslinie zusammengedrängt oder auseinandergezerrt sind.

b) Man stellt die Doppelleiste von vornherein in die Longitudinalstel-

lung und erzeugt an der ruhenden Kugelreihe die Longitudinalwelle, indem man einen in die Nut der unteren Leiste eingesetzten Schlitten gleichmäßig unter ihnen vorbeizieht, so daß er die Kugeln parallel zu ihrer Verbindungslinie um gleiche Strecken aus ihrer Ruhelage heraushebt und dann losläßt. Selbst wenn die Amplitude der Schwingungen anfangs so groß ist, daß die benachbarten Kugeln aneinanderstoßen, wird bald (nach einigen Schwingungen) durch Abnahme der Amplitude eine longitudinale Welle entstehen; regelmäßiger aber ist der Vorgang, wenn man die Stellung der Leiste und damit des Schlittens in der Höhe derart reguliert, daß die Anfangsamplitude nicht zu Zusammenstoßen führt.

4) Transversale stehende Welle. Die Doppelleiste wird in die Transversalstellung gebracht, die untere Leiste wird um 90° gedreht aufgesteckt und die Träger so zurückgestellt, daß ihre Mittellinie vertikal unterhalb der Kugelreihe liegt. Den Drahhältern wird die in der Figur gezeichnete Stellung gegeben. Die erste, mittlere und letzte Pendelkugel bleiben in ihrer Ruhelage,



die andern werden der Reihe nach in die Drahhälter gelegt, so daß die Kugelreihe in der Form einer Sinuslinie fixiert ist.

Durch gleichzeitiges Ziehen an den Knöpfen der beiden Träger löst man die Arretierung aus, so daß die Leiste, parallel zu sich selbst, fällt und alle Kugeln gleichzeitig freigibt. Man erhält so eine stehende transversale Welle mit Knotenpunkten am Anfang, Mitte und Ende, also gerade eine ganze Wellenlänge.

Die Operation des Auslösens der Hemmung erfordert einige Übung.

5) Longitudinale stehende Welle. Die Doppelleiste wird in die Longitudinalstellung gebracht, die Drahhälter für die Kugeln in die in der Figur gezeichnete Lage umgestellt. Im



übrigen ist das Verfahren ganz analog wie früher; man erhält eine stehende longitudinale Welle, an deren drei Knotenpunkten ($x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda$) abwechselnd »Verdichtungen« und »Verdünnungen« auftreten, während an den Bäuchen ($x = \frac{\lambda}{4}$ und $\frac{3\lambda}{4}$) die Kugeldistanzen unverändert bleiben. Man ersieht also unmittelbar den für viele akustische Probleme wichtigen Satz, daß bei einer stehenden longitudinalen Welle die Knotenpunkte (Amplitude = 0), resp. Bäuche (Amplitude = Maximum) um $\frac{\lambda}{4}$ verschoben sind, je nachdem diese Begriffe auf die Bewegung (periodisch wechselnde Elongation aus der Ruhelage) oder auf die periodisch wechselnde Dichtenänderung angewandt werden.

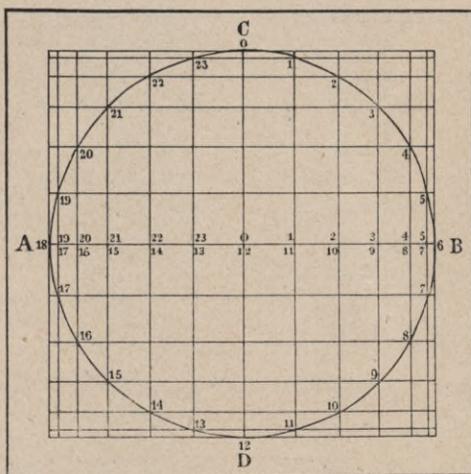
15. Zusammensetzung aufeinander senkrechter Schwingungen.

Instrumentarium: Zirkel; Millimeterpapier; Wheatstones Kaleidophon; Universalkaleidophon; Modell eines Lissajon'schen Apparates; Bogenlampe; Blende; Projektionslinse; Schirm.

Theorie der Versuche. Wenn ein Punkt in zwei aufeinander senkrechten Richtungen Sinusschwingungen um seine Ruhelage ausführt, so können die beiden Komponenten allgemein durch: $x = a \sin \frac{2\pi t}{\tau}$ und $y = a' \sin \left(\frac{2\pi t}{\tau'} + \Delta \right)$ dargestellt werden, wobei Δ die in Bruchteilen von 2π ausgedrückte Phasendifferenz zur Zeit $t = 0$ ist.

Rechnungsmäßig erhält man durch Elimination von t eine Gleichung $f(x, y) = 0$, welche die Kurve, die der Punkt tatsächlich beschreibt, darstellt. Ihre Form hängt ab vom Amplitudenverhältnis $\frac{a}{a'}$, dem Verhältnis der Schwingungsdauern $\frac{\tau}{\tau'}$ und der Phasendifferenz Δ .

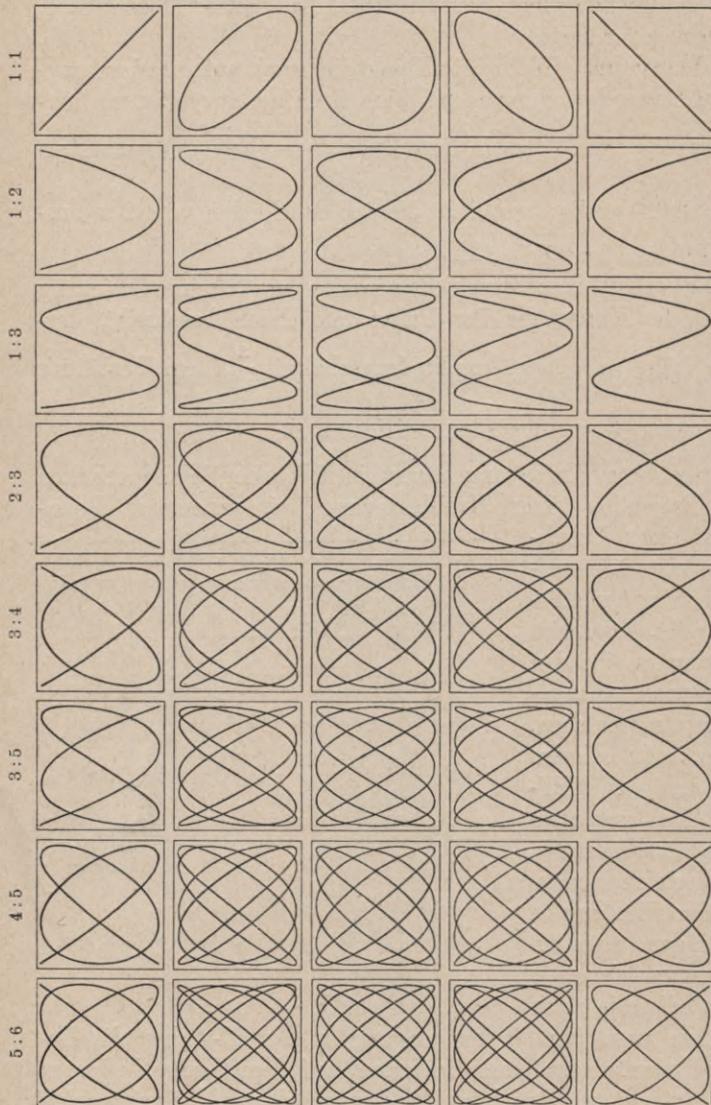
Konstruktiv kann diese Kurve angenähert in folgender Weise erhalten werden: Da die Projektion einer Kreisbewegung mit konstanter Bahngeschwindigkeit auf einen Durchmesser des Kreises eine harmonische Schwingung mit der Umlaufdauer als Periode ergibt, kann man die x - und y -Koordinaten, die den Komponenten der zusammengesetzten Schwingung entsprechen, leicht konstruieren. Zu diesem Zwecke zeichnet man auf Millimeterpapier einen Kreis von etwa 5 cm Radius (die Amplituden a und a' werden als gleich vorausgesetzt) und teilt den Umfang in 24 gleiche Teile, indem man ihn zunächst in bekannter Weise in sechs Teile teilt und diese je zweimal halbiert. Indem man für die Schwingung in der X -Achse die Periode τ gleich der Umlaufdauer eines fingierten, auf dem Kreise bewegten Punktes setzt, erhält man durch Projektion der oben erhaltenen Teilungspunkte auf die X -Achse sofort die x -Koordinaten für die Zeiten $0, \frac{\tau}{24}, 2 \frac{\tau}{24} \dots \tau$.



Nimmt man nun an, daß ein zweiter Punkt den Kreis in der Zeit τ' durchlaufe, die zu τ in einem einfachen Zahlenverhältnis steht, zum Bei-

spiel $\tau' = \tau, \frac{1}{2}\tau, \frac{2}{3}\tau, \frac{3}{4}\tau, \dots$, so erhält man in analoger Weise eine Anzahl von Werten der y-Koordinate zu bestimmten, in $\frac{\tau}{24}$ ausdrückbaren Zeiten.

Durch Einzeichnung der Punkte, deren gleichzeitig gültige Koordinaten



nun ermittelt sind (durch Markierung mit Kreuzchen), und Verbindung dieser Punkte durch einen Kurvenzug, erhält man angenähert die Bahn des Punktes. Nebenstehende Figur stellt für einige einfache Zahlenverhältnisse von τ und τ' und für verschiedene Phasendifferenzen die resultierenden Schwingungskurven dar.

Je größer die Zahlen des Bruches $\frac{\tau'}{\tau}$ sind, um so komplizierter wird die Figur. Stehen τ und τ' angenähert, aber nicht exakt in einem einfachen Verhältnis, zum

Beispiel

$\tau' : \tau = 1 : (2 + \varepsilon)$, so kann man formal die Kurve

auffassen als entstanden durch Zusammensetzung zweier Komponenten, deren Verhältnis $\frac{\tau'}{\tau}$ exakt gleich 2 ist, deren Phasendifferenz Δ aber kontinuierlich sich ändert.

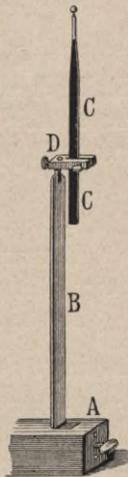
Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche.

1) Wheatstone'sches Kaleidophon. In einem gemeinsamen Grundbrette sind mehrere vertikal stehende Stahlstäbe verschiedener Querschnittsformen eingelassen, die am oberen freien Ende einen runden glänzenden Knopf tragen. Wird ein solcher Stab zur Seite gebogen, so kann die Verschiebung in zwei Komponenten (parallel den Seiten bei rechteckigem, resp. den Halbachsen bei elliptischem Querschnitte) zerlegt werden, und je nach der zugehörigen Dimension parallel der Verschiebungsrichtung sind die Schwingungsdauern verschieden. Bei kreisförmigem oder quadratischem Querschnitt haben beide Komponenten gleiche Schwingungsdauer.

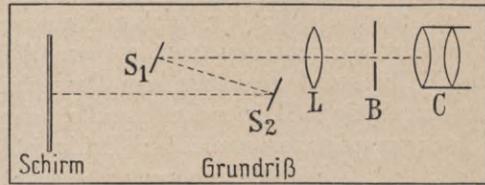
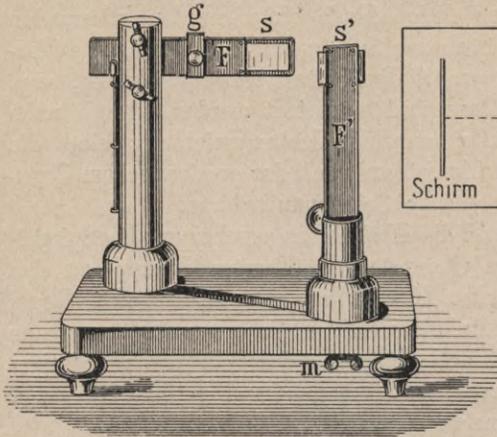
Sieht man vertikal von oben auf die Knöpfe, so erscheinen die Spiegelbilder eines entfernten leuchtenden Gegenstandes (Fenster, Lampe) zu den der Schwingungsform entsprechenden Kurven ausgezogen. In der Regel ist das gewünschte einfache Verhältnis der beiden Schwingungsdauern nur ziemlich ungenau hergestellt, so daß die Kurvenbilder sehr rasch zwischen den den verschiedenen Phasendifferenzen entsprechenden Figuren schwanken.

2) Universalkaleidophon nach Lippich und Melde. Im Prinzip ist dieser Apparat dem vorigen analog, gestattet aber eine genaue Justierung auf rationales Verhältnis der beiden Schwingungsdauern. Zwei Stahlfedern B und C, deren Breitseiten senkrecht aufeinanderstehen, lassen sich in mit einer Klemmvorrichtung versehenen Hülsen A und D verschieben, so daß die Länge des herausragenden Stückes willkürlich variabel ist. Gewöhnlich sind die Stellungen, welche einfache Verhältnisse von τ und τ' ergeben, durch Marken angedeutet. Die genauere Justierung zur Herstellung einer möglichst ruhigen, ihre Form nur langsam ändernden Schwingungskurve erfordert einige Geduld. Die Beobachtung erfolgt wie früher am spiegelnden Knopfe am Ende der oberen Feder.

3) Modell eines Lissajon'schen Apparates. Die an den früher besprochenen Apparaten nur für wenige Beobachter gleichzeitig sichtbaren Figuren werden hier einem größeren Auditorium durch Projektion auf einen Schirm sichtbar gemacht. Der Apparat besteht wieder aus zwei Stahlfedern, die, auf getrennten Stativen befestigt, in einer horizontalen, beziehungsweise vertikalen Ebene schwingen; ihre Schwingungsdauer läßt sich sowohl durch Längenänderung, wie beim Universalkaleidophon, als auch durch Aufsetzen von Laufgewichten variieren; am Ende tragen die Federn Spiegelchen s und s'. Die Aufstellung erfolgt entsprechend dem in Figur S. 46 gezeichneten Grundriß. C stellt den Kondensator der Projektionslampe dar, B eine Blende mit kreisförmiger Öffnung von wenigen mm Durchmesser, die etwas vor dem Konvergenzpunkte des aus dem Kondensator austretenden Strahlenbündels gestellt wird. Die Projektionslinse L steht dann in solcher Entfernung von der Blende (etwas größer als ihre Brennweite), daß auf einem einige Meter entfernten Schirme



ein scharfes Bild der kreisförmigen Öffnung entworfen wird. Die beiden Spiegel s und s' werden derart orientiert, daß zweimalige Reflexion des von der Linse ausgehenden Strahlenbündels stattfindet. Durch Anschlagen in



Schwingungen versetzt, erteilen die Federn der Spiegelnormale von s eine Bewegung in horizontalen, von s' in vertikaler Ebene. Die Größe der am Schirme erscheinenden Figur nimmt infolge der Dämpfung rasch ab.

Komplizierter, aber vollkommener ist ein Apparat, der an Stelle der Stahlfedern mit Spiegeln versehene Stimmgabeln verwendet, die elektromagnetisch angeregt und auf konstanter Amplitude der Schwingung erhalten werden.

16. Kundt'sche Staubfiguren.

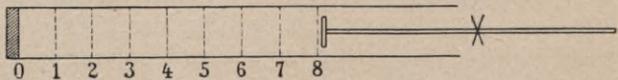
Instrumentarium: Stäbe aus Glas und aus Messing; Klemmvorrichtung; Filzlappen; Kolophonium; Glasröhre; Teilung.

Theorie der Versuche. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in einem festen Körper ist gegeben durch: $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, wobei E der Elastizitätsmodul, ρ die Dichte des Stoffes ist. Ein Stab von der Länge l , der in der Mitte fixiert ist, gibt — durch Reiben in der Längsrichtung zu longitudinalen Schwingungen angeregt — einen Grundton, bei dem die Mitte ein Knoten, die beiden freien Enden Bäuche der stehenden longitudinalen Welle sind; also ist die Wellenlänge im Stabe:

$$\lambda = 2l \text{ und daher die Schwingungszahl: } n = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}$$

d. h. nur abhängig von Material und Länge, dagegen unabhängig vom Querschnitt des Stabes.

Wird das eine Ende des Stabes mit einer leichten Platte versehen und in ein einseitig verschlossenes Glasrohr geführt, so wirkt die Platte wie ein Stempel und erzeugt in der Luft innerhalb des Rohres ebenfalls stehende Longitudi-



nalwellen. Das verschlossene Ende ist für die Luftbewegung ein Knoten (No. 0), die weiteren Knoten folgen in Distanzen, die gleich $\frac{\lambda'}{2}$ sind, wobei λ' die Wellenlänge des Tones in Luft ist. Da $\lambda:\lambda' = c:c'$, kann aus der als bekannt vorausgesetzten Schallgeschwindigkeit in Luft $c' = 332 [1 + \alpha t] \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ und der beobachteten Wellenlänge λ' die Schwingungszahl n des Longitudinaltones und die Schallgeschwindigkeit c im Material des Stabes bestimmt werden.

Füllt man die Röhre mit einem anderen Gase als Luft, so ändert sich die Knotendistanz $\frac{\lambda''}{2}$ im Verhältnisse der Schallgeschwindigkeiten, und man erhält den Wert c'' aus: $\frac{c''}{c} = \frac{\lambda''}{\lambda'}$.

Beschreibung des Apparates und Ausführung der Versuche. Der zu untersuchende Stab wird in seiner Mitte zwischen einem Unterlagsklötzchen und einer Schraubenzwinde festgeklemmt, derart, daß der Stab horizontal steht und das Scheibchen an seinem Ende innerhalb des Rohres liegt, aber ohne dessen Wand zu berühren. Zur Erzeugung des Longitudinaltones reibt man die rechte Hälfte des Stabes von der Mitte gegen das Ende mit einem Filzlappen, und zwar bei Glasstäben mit einem nassen, bei Metallstäben mit einem mit Kolophonimpulver bestreuten Lappen. Spricht der Ton beim Reiben nicht gut an, so ist entweder die Fixierung nicht an dem natürlichen Knotenpunkte, oder das Scheibchen reibt sich an der berührenden Wand.

In das Glasrohr wird feines Korkpulver (durch Feilen alter Korkstöpsel zu erhalten) gebracht und durch Schütteln möglichst gleichmäßig verteilt.

Die stehenden Schwingungen der abgeschlossenen Luftsäule entwickeln sich am besten, wenn das schwingende Scheibchen selbst in einem Knotenpunkte der Luftsäule liegt, am wenigsten, wenn es in einem Schwingungsbauche liegt. Durch Verschieben des Rohres parallel seiner Längsachse kann man stets die günstigste Stellung erreichen. Um eine Neuordnung des Korkpulvers zu erhalten, wird nach jedesmaligem Anstreichen des Stabes das Rohr um seine Achse etwas gedreht. Man setzt die Versuche so lange fort, bis möglichst scharfe Staubfiguren entstanden sind, bei denen die Knoten durch kleine Häufchen ruhigliegenden Pulvers, die zwischenliegenden Partien durch fein gekräuselte oder gerippte Pulvermassen abgebildet werden. Da die Distanz von zwei benachbarten Knoten relativ ungenau zu ermitteln ist, legt man nach Herstellung der Staubfigur das Rohr so auf die Teilung, daß das verschlossene Ende (0^{ter} Knoten) gerade auf den Nullpunkt zu stehen kommt, und liest die Lage L_k des letzten (k^{ten}) noch deutlich ausgebildeten Knotens ab; es ist dann $\lambda' = 2 \frac{L_k}{k}$.

1) Glasstab. In der beschriebenen Weise werden die Kundt'schen

Staubfiguren mittels des geriebenen Glasstabes erzeugt und aus der beobachteten Wellenlänge in Luft die Tonhöhe n und die Schallgeschwindigkeit in Glas berechnet. (NB. Wenn das am Ende des Glasstabes angebrachte Korkscheibchen schlottert, so ist der Longitudinalton unrein und stark gedämpft; in diesem Falle muß das Scheibchen frisch angekittet werden.)

2) Metallstab. In ganz analoger Weise wird n und c für den Metallstab bestimmt.

3) Schallgeschwindigkeit in Leuchtgas. Der die Glasröhre einerseits verschließende Kork wird durch einen durchbohrten, mit hindurchgestecktem Ansatzrohr versehenen ersetzt und hierauf Leuchtgas eingeleitet. Während des Durchströmens wird rasch (um unnötige Verunreinigung der Zimmerluft zu vermeiden) der Versuch wiederholt und die Wellenlänge in Leuchtgas gemessen, resp. die Schallgeschwindigkeit berechnet.

17. Chladni'sche Klangfiguren.

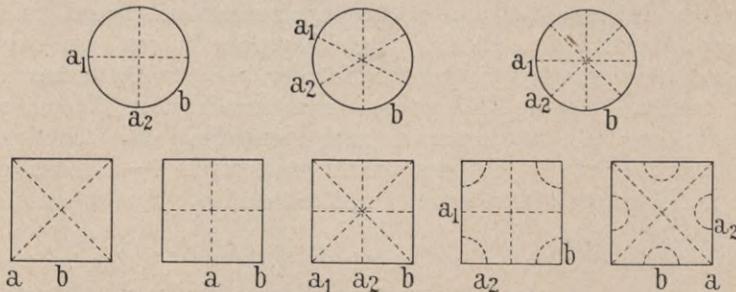
Instrumentarium: Gestell mit Metallplatten; Baßbogen; Streusand; Pinsel.

Beschreibung des Apparates und Ausführung der Versuche. Auf einem hölzernen Gestelle ist eine Anzahl von Messingplatten, teils quadratisch, teils kreisförmig, durch in ihren Zentren befindliche Schrauben fixiert. Wird der Rand der Platte mit einem Bogen gestrichen, so entstehen Schwingungen, bei denen die Platte in mehreren durch Knotenlinien getrennten Abteilungen schwingt, derart, daß benachbarte Teile zu beiden Seiten einer solchen Knotenlinie jeweils in entgegengesetzter Phase sich befinden.

Die Lage und Anzahl der Knotenlinien hängt ab von der Lage eines zweiten (eventuell mehrerer weiterer) Fixierungsstellen, die durch einfaches Auflegen des Fingers in ihrer Bewegung gehemmt werden.

Bestreut man die Platten (nicht zu dick!) mit Streusand, so wird derselbe an den Schwingungsbäuchen weggeschleudert und häuft sich längs der Knotenlinien an.

Da durch eine bestimmte Fixierungsstelle auch andere durch nicht fixierte Punkte gehende Knotenlinien bestimmt sind, muß die Stelle, an welcher mit



dem Bogen gestrichen wird, derart gewählt werden, daß sie möglichst nahe einem Schwingungsbauche liegt.

Bei den Kreisplatten sind die Knotenlinien Durchmesser, die den Kreis in eine gerade Anzahl von Sektoren teilen. Indem man die Fixierung am Rande in 2 Punkten (a_1, a_2) vornimmt, die $\frac{1}{4}, \frac{1}{6}, \frac{1}{8}, \frac{1}{10} \dots$ des Umfanges auseinanderliegen, und am Endpunkte b eines zwischen zwei Knotenlinien in der Mitte liegenden Durchmessers anstreicht, erhält man so 4, 6 \dots bis zu 12 Knotenlinien.

Bei den quadratischen Platten erhält man durch Fixierung der Ecke, resp. der Seitenmitte, ein diagonales, resp. aufrechtes Kreuz, ferner die in der Figur angedeuteten Formen, bei denen auch nicht durch den Mittelpunkt laufende Knotenlinien auftreten.

Nach Beendigung der Versuche ist der Streusand auf den Platten und der am Tisch verstreute mittels eines Pinsels zu sammeln.

18. Lochsirenen.

Instrumentarium: Elektromotor; Glühlampenwiderstand; Drähte; 5 Sirenscheiben; 2 Blasrohre; T-Rohr; Sirene nach Cagniard-Latour; Stopuhr; Blasbalg; \bar{a} -Stimmgabel; Bogen.

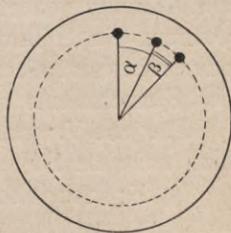
Theorie der Versuche. Auf einer rotierenden Scheibe befinden sich längs des Umfanges eines zum Mittelpunkt konzentrischen Kreises z Löcher in gleichen Abständen voneinander. Wird von der einen Seite ein Luftstrom gegen die Scheibe gerichtet, so erfolgen $n = zk$ Stöße pro Sekunde, wenn k die Tourenzahl bezeichnet. Durch Zählen von z und Bestimmung von k kann daher auch n berechnet und damit die Tonhöhe des entstehenden Tones absolut bestimmt werden.

Sind auf derselben Scheibe mehrere konzentrische Reihen von $z_1, z_2 \dots$ Löchern vorhanden, so sind unabhängig von k die Intervalle $\frac{n_1}{n_2} \dots$ konstant.

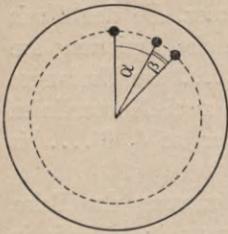
Komplizierter sind die Erscheinungen, wenn die Löcher einer Reihe nicht äquidistant sind; es entstehen dann im allgemeinen durch Anblasen einer solchen Reihe gleichzeitig mehrere übereinandergelagerte Töne. Spezielle Fälle sind folgende:

a) Die Löcher folgen abwechselnd in Winkeldistanzen α und β aufeinander, wobei α und β wenig verschieden sind. Es entstehen dann zwei Töne: erstens ein Ton, dessen Schwingungsdauer $\tau = \frac{1}{n}$ der mittleren Distanz $\frac{\alpha + \beta}{2}$

proportional ist, nämlich $\tau = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha + \beta}{360}$, zweitens ein Ton, der den regelmäßig wiederholten Distanzen $(\alpha + \beta)$ entspricht, also die tiefere Oktave des ersten Tones



liefert. Das Intensitätsverhältnis der beiden Töne hängt von der Differenz $(\alpha - \beta)$ ab; je kleiner diese ist, um so stärker ist der höhere Ton.



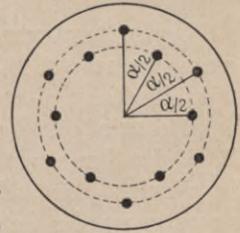
b) Die Löcher haben wieder abwechselnd die Distanzen α und β , wobei aber α bedeutend größer als β und ein Multiplum davon ist. Es entsteht dann wieder ein Ton $\tau = \frac{1}{k} \cdot \frac{\alpha + \beta}{360}$ und außerdem ein Ton $\tau' = \frac{1}{k} \cdot \frac{\beta}{360}$; der dem arithmetischen Mittel $\frac{\alpha + \beta}{2}$ entsprechende Ton ist von unmerklicher Intensität.

c) Eine für das Auge unregelmäßige Folge von Löchern, in der aber bestimmte Winkeldistanzen $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ periodisch wiederkehren, liefert einen diesen Distanzen entsprechenden Mehrklang, speziell einen harmonisch klingenden Akkord, wenn die Winkel $\alpha_1, \alpha_2 \dots$ in einfachen Verhältnissen stehen.

d) Sind auf einer Scheibe zwei konzentrische Lochreihen vorhanden, jede für sich mit der konstanten Winkeldistanz a der Löcher, gegeneinander aber um $\frac{a}{2}$ verdreht, so liefert jede Reihe, für sich allein

angeblasen, den Ton $n = k \frac{360}{a}$. Werden beide gleich-

zeitig angeblasen, und zwar von derselben Seite her und an einander nahe befindlichen Stellen, so ist die Anzahl der Luftstöße pro Sekunde verdoppelt bei ungestörter Gleichmäßigkeit der Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Stößen; es entsteht daher der Ton $2n$ (Oktave der Einzeltöne) so, als ob eine einzige Reihe der entsprechenden Lochzahl angeblasen worden wäre. Erfolgt aber das Anblasen der beiden Lochreihen an räumlich weiter auseinanderliegenden Stellen oder von entgegengesetzten Seiten der rotierenden Scheibe her, so wirken die beiden Folgen von Impulsen wie zwei selbständige Tonquellen, deren jede den Ton n gibt.



Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche. Bezüglich der Schaltung des Elektromotors vergl. S. 165.

Der Elektromotor wird so aufgestellt, daß die Achse horizontal steht und über die Tischkante vorragt, die daran sorgfältig festgeschraubten Sirenscheiben somit in einer vertikalen Ebene rotieren.

Zum Anblasen verwendet man ein Glasröhrchen mit ausgezogener Spitze und Öffnung von etwa 2 bis 3 mm Durchmesser, an dessen andere weitere Öffnung ein Schlauch angesetzt ist. Man bläst entweder mit dem Munde oder verwendet einen Blasbalg für Fußbetrieb. Über eventuelle Herstellung des Glasröhrchens vergl. S. 160.

Für jene Versuche, wo zwei Lochreihen zugleich anzublasen sind, schaltet man zwischen Blasebalg und die beiden Blasröhrchen ein T-Stück.

1) Sirenscheibe mit Tonleiter. Wie man durch Abzählen leicht feststellen kann, ist die Löcherzahl auf den 8 vorhandenen Reihen von

innen nach außen: $z = 48, 54, 60, 64, 72, 80, 90, 96$ also gleich $48 \times (1, \frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8}, 2)$. Sobald die Scheibe konstante Rotationsgeschwindigkeit angenommen hat, ergeben sich daher die Töne der Dur-Tonleiter bei willkürlichem, von der Rotationsgeschwindigkeit abhängigem Grundton.

2) Sirenenscheiben mit nicht äquidistanten Löchern. Vier Reihen A, B, C, D besitzen (von außen nach innen) 36, 36, 36 und 18 Löcher; in den Reihen C und D sind diese äquidistant, in 10° bzw. 20° Winkelabstand, liefern daher einfache Töne der Schwingungszahlen n , bzw. $2n$; in Reihe A haben die Löcher abwechselnd Distanzen von $9 \cdot 5^\circ$ und $10 \cdot 5^\circ$, in Reihe B von 9° und 11° ; beide geben denselben Ton wie die Reihe C, der mittleren Distanz 10° entsprechend, und außerdem dessen tiefere Oktave. Dieser tiefere Ton ist aber im Verhältnis zum höheren bei Reihe B von größerer Stärke (vergl. S. 50).

3) ditto. Bei 6 Reihen, von außen nach innen mit A, B, C, D, E und F bezeichnet, sind die Anordnungen der Löcher folgende:

A :	$a = 16^\circ$,	$\beta = 4^\circ$,	$a + \beta = 20^\circ$,	—
B :	$a = 4^\circ$,	—	—	$z = 90$
C :	$a = 20^\circ$,	—	—	$z = 18$
D :	$a = 20^\circ$,	$\beta = 10^\circ$,	$a + \beta = 30^\circ$,	—
E :	$a = 10^\circ$,	—	—	$z = 36$
F :	$a = 30^\circ$,	—	—	$z = 12$

Die Reihen B und C geben für sich je einen Ton, nämlich $5n$ und n (Grundton und 2. Oktave der großen Terz), die Reihe A diese beiden Töne zugleich.

Analog gibt D zugleich die Töne, welche E und F einzeln erzeugen, nämlich n' und $3n'$ (Grundton und Oktave der Quint).

4) Große Sirenenscheibe. Von innen nach außen folgen zunächst 15 Reihen mit äquidistanten Löchern, die einfache, zueinander harmonische Töne über ein Intervall von 5 Oktaven ergeben ($2:3:4: \dots 64$).

Weiterhin folgen 4 Reihen, die je 2 äquidistante Lochreihen übereinandergelagert enthalten und daher harmonische Doppeltöne geben, z. B. $n:n' = 4:5$ (große Terz) durch Anordnung der Löcher bei den Stellungen $0^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 24^\circ, 30^\circ, 36^\circ, 45^\circ, 48^\circ, 60^\circ$ usw., also in regelmäßiger Aufeinanderfolge von einerseits 12° , andererseits 15° Winkeldistanz. Die 4 äußersten Reihen bilden in analoger Weise eine Kombination von je 4 äquidistanten Reihen und ergeben daher jede einen aus 4 Tönen bestehenden Akkord, und zwar Dur-Dreiklänge mit angeschlossener Oktave des Grundtones in Form des Grundakkordes ($4:5:6:8$) und des Quart-Sext-Akkordes ($3:4:5:6$).

5) Scheibe mit zwei gleichzeitig anzublasenden Reihen. Die beiden äußersten Reihen enthalten die gleiche Anzahl von Löchern (je 12), sind aber um 15° gegeneinander verschoben. Der Effekt entspricht der S. 50 unter (d) besprochenen Theorie. Die innerste Reihe enthält 24 äquidistante Löcher und dient als Kontrolle zur Herstellung des höheren Tones (Oktave), welchen die beiden anderen Reihen gemeinsam geben.

6) Sirene nach Cagniard-Latour. Die Sirene nach Cagniard-Latour ist nach dem Prinzip einer Turbine gebaut und wird durch denselben Luftstrom (der mittels eines Blasebalges zugeführt wird) in Bewegung versetzt und zum Tönen gebracht. An der Drehungsachse ist ein Schraubengewinde eingeschnitten, das in Zahnräder eingreift und die Anzahl der vollführten Umdrehungen, bezw. von je 100 Umdrehungen, an zwei Zifferblättern anzeigt. Gewöhnlich ist dieses Zählwerk seitlich verschiebbar, so daß es durch einen Fingerdruck ein- und ausgeschaltet werden kann. Da aber das Einschalten fast immer mit einer merklichen Bremswirkung verbunden ist und daher die Tonhöhe herabgehen läßt, ist es vorteilhafter, das Zählwerk dauernd eingeschaltet zu lassen und mittels der Stopuhr die Zeit für eine größere Zahl von Umdrehungen (z. B. 1000) am laufenden Zeiger zu bestimmen.

Diese Sirene dient zur Messung der absoluten Schwingungszahl eines Tones, doch ist das Resultat meistens nur ein angenähertes.

Eine Stimmgabel wird von Zeit zu Zeit mittels des Bogens zum Tönen gebracht und gleichzeitig die Sirene in Bewegung gesetzt; das Tempo des Tretens auf den Blasebalg reguliert die Tonhöhe. Diese längere Zeit konstant und zwar gleich der Höhe des Stimmgabeltones zu erhalten, beziehungsweise die unvermeidlichen kleinen Schwankungen nach oben und unten sich gegenseitig kompensieren zu lassen, erfordert neben musikalischem Gehör auch einige Übung in der Behandlung des Blasebalges. Sobald dies gelungen ist, wird mit der Stopuhr die Zeit für eine runde Zahl von Umdrehungen ermittelt. Aus der Tourenzahl k und der abzählenden Lochzahl z ergibt sich dann die absolute Tonhöhe $n = kz$.

Da die Schwingungszahl von Stimmgabeln gewöhnlich auf ihnen vermerkt ist, erhält man ein Bild von der mittels dieser Methode erreichbaren Genauigkeit. Es sei erwähnt, daß bei Stimmgabeln französischer Provenienz die Anzahl der Halbschwingungen angeschrieben ist, also das Doppelte der Schwingungszahl nach deutscher Zählweise, z. B. 870 *v s*, d. i. »vibrations simples«, für den Normalstimmtön von 435 Schwingungen.

19. Resonanz.

Instrumentarium: 2 gleiche Stimmgabeln; Kautschukring; Glaskugel an Faden; Bogen; Vaseline; Lappen; zylindrisches Standglas; Spritzflasche; \bar{a} -Gabel ohne Resonanzkästchen; Maßstab; Glocke mit Zylinderresonatoren; Schlägel; Glasröhre für empfindliche Flammen; Schlauch; Stativ.

Ausführung der Versuche. 1) Zwei mit Resonanzkästchen versehene, genau gleichgestimmte Stimmgabeln werden in einiger Entfernung voneinander derart aufgestellt, daß die Öffnungen der Resonanzkästchen gegeneinander gerichtet sind. Wird die eine Stimmgabel durch Streichen mit einem Bogen zum Tönen gebracht, so tönt die zweite mit, was deutlicher erkennbar wird, wenn man nach einigen Sekunden die erste Gabel wieder

hemmt. Man fasse dabei die Zinken nicht direkt mit den Fingern an, sondern verwende ein trockenes Tuch oder lege den Bogen über beide Zinken.

Bei genauer Stimmung erfolgt das Ansprechen der zweiten Gabel auf mehrere Meter Distanz. Um ihr Mittönen auch sichtbar zu machen, hängt man eine leichte hohle Glaskugel an einem Faden derart an ein Stativ, daß sie durch die eine Zinke der resonierenden Gabel um einen kleinen Betrag (etwa 1 mm) aus ihrer Ruhelage verschoben ist. Wird die Gabel dann durch Resonanz zum Tönen gebracht, so wird die Kugel mehrere cm weit abgestoßen.

Schiebt man auf die eine Zinke einer der beiden Gabeln einen Kautschukring (durch Abschneiden eines etwa $\frac{1}{2}$ cm langen Stückes von einem Schlauche leicht zu erhalten), so sind die Gabeln nicht mehr gleich gestimmt, wie auch aus den Schwebungen bei gleichzeitigem Tönen erkennbar ist; die Resonanz findet dann nicht mehr statt.

Nach Beendigung der Versuche wird der vom Bogen herrührende Koloophoniumstaub abgewischt und die Stimmgabeln mit einem mit Vaseline beschriebenen Lappen leicht eingefettet, um ein Rosten hintanzuhalten.

2) Ein zylindrisches Glasgefäß, in das man bis zu einer beliebigen Höhe Wasser einfüllt, liefert eine einseitig abgeschlossene Luftsäule willkürlich variabler Länge; der Eigenton — entsprechend dem einer gedeckten Pfeife — ist dadurch gegeben, daß die Wellenlänge das Vierfache der Rohrlänge ist.

Eine \bar{a} -Stimmgabel mit Stiel, aber ohne Resonanzkästchen, wird angeschlagen und dann über den Rand des Gefäßes gehalten. Da der Stimmgabelton selbst sehr schwach ist, wird das Hinzutreten des eventuell durch Resonanz entstehenden Tones der Luftsäule leicht hörbar. Man ermittelt durch Ausprobieren jene Wasserhöhe im Gefäße, bei welcher die Resonanz am stärksten auftritt. Annähernd ist dann der Abstand des Niveaus vom oberen Rand des Gefäßes: $l = \frac{\lambda}{4}$, wenn λ die aus der Schallgeschwindigkeit und aus der Schwingungszahl der Stimmgabel (435) berechnete Wellenlänge des Tones in Luft bezeichnet.

3) In analoger Weise kann ein weites, aus Karton hergestelltes Rohr variabler Länge zur Resonanz auf den Ton einer Glocke abgestimmt werden.

Die Glocke hat die Gestalt einer Kugelkalotte und ist auf einem vertikalen Stative fix montiert; sie wird durch Anschlagen mittels eines weichen Schlegels mit elastischem Stiele zum Tönen gebracht. Ein nebenan stehender Träger enthält die Fassung für die Kartonrohre; eines ist einseitig geschlossen und gibt daher — analog wie im früheren Versuche — Resonanz, wenn $l = \frac{1}{4}\lambda$; das andere ist beiderseits offen und daher abgestimmt bei doppelter Länge $l = \frac{1}{2}\lambda$.

Die Röhren sind um den vertikalen Träger als Achse drehbar; durch periodisches Verdrehen, so daß die Rohröffnung abwechselnd der Glocke zugekehrt oder zur Seite gewendet ist, wird das Auftreten und Verlöschen des Resonanztones auch auf einige Distanz deutlich erkennbar.

4) Ein Glasröhrchen von etwa 1 cm lichtem Durchmesser ist an einem Ende in eine Spitze ausgezogen, die ein etwa 2 mm weites Loch besitzt. Über das weitere Ende wird ein Schlauch geschoben, der zur Gasleitung führt, und das Röhrchen wird vertikal in ein Stativ geklemmt. Das aus der Spitze strömende Leuchtgas liefert angezündet eine zirka 30 cm hohe schmale Flamme, sogenannte »empfindliche Flamme«. Hohe Töne und Geräusche, die hohe Teiltöne enthalten (die Vokale e und i, s-Laute, Pfeifen, Zerreißen und Zerknittern von Papier, Klopfen und dergl.), verändern, selbst in geringer Intensität und in einigen Metern Entfernung erzeugt, die Form der Flamme; sie verkürzt sich bedeutend und wird dabei breiter. Tiefe Töne ohne Nebengeräusch (die Vokale o und u, tiefe Stimmgabeln etc.) sind ohne Wirkung auf die empfindliche Flamme.

20. Schwebungen.

Instrumentarium: 2 Stimmgabeln mit Resonanzkästchen; Laufgewicht; Bogen; Stopuhr; Vaseline und Lappen.

Theorie des Versuches. Zwei Töne von den nicht sehr abweichenden Schwingungszahlen n und n' liefern durch Interferenz binnen der Zeiteinheit $(n - n')$ Maxima und ebenso viele Minima in der Amplitude der resultierenden Luftbewegung. Diese Intensitätsschwankungen sind bei nicht zu großer Anzahl als sogenannte »Schwebungen« hörbar und eventuell zählbar; sie ergeben daher unmittelbar die Differenz $(n - n')$ der Schwingungszahlen.

Das Resultat sagt aber nichts darüber aus, ob n' größer oder kleiner als n sei. Falls der Tonhöhenunterschied nicht direkt für das Ohr erkennbar ist, läßt sich der Sinn der Abweichung bestimmen, indem man die eine Stimmgabel (n') beschwert durch Aufsetzen einer verschiebbaren Masse (Blechklammer) auf die eine Zinke. Am unteren Ende der Zinke nahezu wirkungslos, setzt diese Masse beim Hinaufschieben die Schwingungszahl in steigendem Maße herab. Wird hierbei die Zahl der Schwebungen verringert, so ist $n' > n$; dagegen ist $n' < n$, wenn die Zahl der Schwebungen noch vermehrt wird.

Ausführung des Versuches. Die beiden Stimmgabeln werden nebeneinandergestellt und kurz nacheinander durch Anstreichen mit dem Bogen zum Tönen gebracht. Besonders deutlich werden die Schwebungen, wenn man die Resonanzkästchen, entsprechend dem in nebenstehender Figur gezeichneten Grundriß, mit den Öffnungen gegeneinandergekehrt, aufstellt. Die Zahl der Schwebungen pro Zeiteinheit ermittelt man durch Zählen von möglichst vielen unter Verwendung der Stopuhr.

Um den Sinn der Abweichung zu prüfen, wird in der früher besprochenen Weise auf die eine Gabel eine Blechklammer aufgesetzt. Sie soll möglichst fest sitzen, durch Schlottern dämpft sie den Ton sehr rasch und erzeugt klirrende Nebengeräusche. Hat man ermittelt, welche der beiden



Gabeln den höheren Ton gibt, so wird die Klammer auf diese aufgesetzt, und man sucht jene Stellung, bei welcher die Schwebungen verschwinden.

Durch allmähliches Verstellen, wobei Schwebungen wieder auftreten, kann man jene Differenz ($n - n'$) ermitteln, welche einen für das Ohr eben merklichen Tonhöhenunterschied gibt; natürlich ist diese Größe individuell verschieden.

Nach Beendigung der Versuche werden die Stimmgabeln gereinigt, wie Seite 53 beschrieben.

21. Wärmeausdehnung.

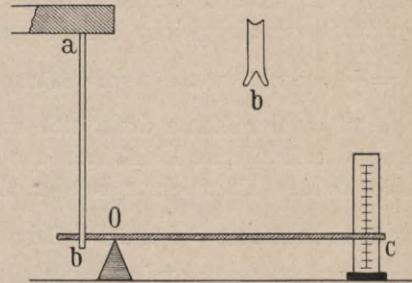
Instrumentarium: (a) Stativ; Kupferdraht; Prisma; Holzstab; Brettchen mit Teilung; Bunsenbrenner. (b) Spiegelapparat für Wärmeausdehnung; verstellbares Tischchen; Glühlampe (horizontal stehend) auf Stativ; Projektionslinse; Millimeterskala; Bandmaß; Zirkel; Maßstab; Dreifuß; Blechgefäß; Bunsenbrenner; Thermometer; Heber. (c) Großes Becherglas; Kaltwasserschwimmer; Bunsenbrenner; Dreifuß; Drahtnetz; Holzstab.

Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche.

A. Modell eines Apparates für Wärmeausdehnung. Der geringe Betrag der absoluten Ausdehnung fester Körper bei Temperaturerhöhungen erfordert für die Demonstration dieser Erscheinung eine Methode, bei welcher die absolute Verlängerung vergrößert wiedergegeben wird. Ein einfaches Modell, das die Anwendung einer Hebelübertragung veranschaulicht, kann mit primitiven Hilfsmitteln jederzeit hergestellt werden.

Ein steifer Kupferdraht von etwa 3 mm Dicke und 30 bis 40 cm Länge ist an einem Ende flachgeklopft und gabelförmig ausgefeilt. Das obere

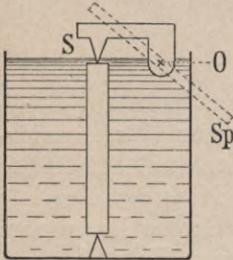
Ende a wird in der am Stativ befestigten Klemme fixiert, das gabelförmige freie Ende b berührt den kurzen Arm des Hebels, der hergestellt wird, indem man einen leichten Holzstab von etwa 50 cm Länge über ein dreikantiges Glasprisma legt; das andere Ende C des Hebels spielt vor einer Teilung, die auf einem vertikal stehenden Brettchen angebracht ist. Dadurch, daß man ursprünglich das Ende a nicht ganz festklemmt und den Kupferdraht vertikal langsam verschiebt, erreicht man es, daß der Holzstab bei Zimmertemperatur nahezu horizontal steht. Wird nun der Kupferdraht durch Bestreichen mit einer Bunsenflamme erhitzt, so wird die wahre Verlängerung des Stabes



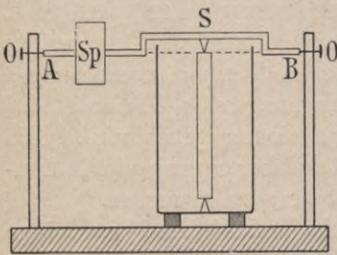
auf der Skala im Verhältnisse $\frac{OC}{OB}$ vergrößert. Da der Ausdehnungskoeffizient des Kupfers rund $16 \cdot 10^{-6}$ pro 1°C beträgt, ist die absolute Verlängerung des Stabes bei einer Temperaturerhöhung um 100° gleich:

$\Delta l = 40 \cdot 100 \cdot 16 \cdot 10^{-6} = 64 \cdot 10^{-3} \text{ cm} = 0.64 \text{ mm}$. Es ist also das Verhältnis der Hebelarme $\frac{OC}{OB}$ etwa 50:1 zu wählen, damit ein auf größere Entfernung hin sichtbarer Ausschlag entsteht. Eine quantitative Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten ist hier nicht möglich, da die Temperaturverhältnisse des ungleichmäßig erhitzten Stabes mangelhaft definiert sind.

B. Messung des Ausdehnungskoeffizienten mit Spiegelapparat. Eine bedeutend stärkere Vergrößerung erzielt man, wenn der materielle Hebel unter Anwendung eines drehbaren Spiegels durch einen Lichtstrahl ersetzt wird.



Bei dem hier zu verwendenden Apparate wird ein Metallstäbchen (Zink, Messing, Eisen) derart vertikal aufgestellt, daß sein unteres Ende auf einer fixen Spitze aufruht (um seitliches Gleiten zu verhindern, ist in der Mitte der Basisfläche eine kleine Vertiefung, sogenanntes »Korn« angebracht), während auf dem oberen, mit einem analogen Korn versehenen Ende die Spitze S eines um die fixe Achse O drehbaren Hebels aufliegt. Das Stäbchen ist umgeben von einem Metallgefäße, in das Wasser beliebiger Temperatur eingefüllt werden kann.



Auf der durch O gehenden Achse sitzt ein Spiegel Sp, der in einem beliebigen Winkel gegen die Horizontale eingestellt und festgeklammt werden kann.

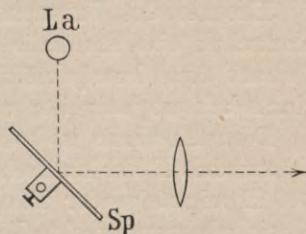
Verlängert sich der Stab bei Erwärmung um das Stück λ , so wird die Spitze S um die gleiche Strecke gehoben und der Hebel um den Winkel $\alpha = \frac{\lambda}{a}$ gedreht, wenn a die Länge des Hebelarmes OS bezeichnet. Der Spiegel an der Achse dreht sich um den gleichen Winkel α , daher ein am Spiegel reflektierter Lichtstrahl um den Winkel 2α . Die Verschiebung des Lichtstrahles längs einer in der Distanz d aufgestellten vertikalen Skale beträgt daher: $\Delta = d \operatorname{tg} 2\alpha = 2 d \alpha$ [angenähert, da α klein] $= 2 \frac{d\lambda}{a}$. Beträgt daher z. B. die Distanz $OS = a = 5 \text{ mm}$, die Skalendistanz $d = 2.5 \text{ m} = 2500 \text{ mm}$, so wird die wahre Ausdehnung λ auf der Skale in 1000-facher Vergrößerung angegeben.

Aus der Länge des Stäbchens und der Temperaturerhöhung kann dann auch der lineare Ausdehnungskoeffizient β numerisch bestimmt werden.

Ausführung: 1) Die zwischen den Spitzenlagern A und B liegende Achse wird herausgeschraubt und mittels Zirkels die Distanz $OS = a$ bestimmt; ferner wird die Länge l_0 des Stäbchens bei Zimmertemperatur bestimmt.

2) Die Achse wird wieder in ihr Lager eingesetzt und die Schraube bei B derart angezogen, daß die Achse noch leicht drehbar ist, aber nicht schlottert. Hierauf wird eines der Stäbchen eingeklemmt und der Apparat auf ein in der Höhe verstellbares Tischchen gesetzt. Die Höhe des Spiegels soll übereinstimmen mit der Höhe der Projektionslinse und der Skala, welche in etwa $2\frac{1}{2}$ m Entfernung an der Wand befestigt wird. Diese Distanz d wird genauer bestimmt mittels eines Bandmaßes.

3) Man erteilt dem Spiegel eine Neigung von zirka 45° gegen die Horizontale, stellt die Glühlampe vertikal oberhalb des Spiegels auf und die Projektionslinse vor den Spiegel (vergl. Figur). Die Herstellung eines scharfen Bildes des Glühlampenfadens auf der Skala erfolgt analog, wie S. 22 beschrieben. Durch seitliche Verschiebung der Glühlampe erreicht man leicht, daß ein horizontal liegendes Stück des Fadens die Lichtmarke auf der Skala herstellt.



4) Das Gefäß wird mit kaltem Wasser gefüllt, dessen Temperatur ϑ_1 mittels eines Thermometers gemessen und die Einstellung A_1 des Fadenbildes auf der Skala abgelesen, sobald sie einen konstanten Wert angenommen hat.

5) Das kalte Wasser wird mittels eines Hebers abgelassen (über die eventuelle Herstellung eines solchen durch Biegen eines dünnen Glasrohres vergl. S. 162) und an seiner Stelle inzwischen vorbereitetes heißes Wasser (mindestens 60°C) eingegossen. Sobald die Einstellung der Lichtmarke konstant geworden ist, wird ihr Wert A_2 und gleichzeitig die Temperatur ϑ abgelesen.

6) Man berechnet λ aus der Formel: $\lambda = \Delta \frac{a}{2d} = (A_1 - A_2) \frac{a}{2d}$ und den linearen Ausdehnungskoeffizienten β aus: $\lambda = l_0 \beta (\vartheta_2 - \vartheta_1)$.

In analoger Weise kann β auch für die beiden anderen Stäbchen bestimmt werden. Will man nur die Werte von β für die verschiedenen Stäbchen relativ ermitteln, so wird die Messung von l_0 , a und d entbehrlich.

C. Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten. Die Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten kann entweder direkt durch ihre Volumzunahme in thermometerähnlichen Gefäßen oder indirekt durch die Abnahme des spezifischen Gewichtes (= Zunahme des spezifischen Volumens) nachgewiesen werden. Bei Wasser beträgt z. B. das spezifische Volum 1.000 bei 4°C , 1.0003 bei 10°C und 1.040 bei 95°C ; es ist also die Zunahme (4%) mittels einer aräometerartigen Vorrichtung leicht nachzuweisen.

Ein aus vernickeltem Metall bestehender Schwimmkörper ist bezüglich Gewicht und Volum derart abgeglichen, daß er in kaltem Wasser schwimmt, in heißem (noch unterhalb des Siedepunktes) bereits untergeht. Wird das Wasser — in einem größeren Becherglase auf Drahtnetz über einem Bunsenbrenner — erwärmt, so setzen sich häufig Luftbläschen an das

Metallaräometer an und verhindern durch ihren Auftrieb das Untersinken; von Zeit zu Zeit sind daher diese Bläschen durch Rühren mit einem Holzstabe zu entfernen.

22. Ausdehnung des Kautschuks.

Instrumentarium: Kautschukschlauch mit Trichter und Ausflußrohr; hohes Stativ; Bleigewichte; Stäbchen; Brettchen mit Teilung; 2 Blechgefäße; Bunsenbrenner.

Theorie des Versuches. Neben Wasser und Nickelstahl zeigt auch Kautschuk eine Anomalie bezüglich seiner Wärmeausdehnung, indem der lineare Ausdehnungskoeffizient (nicht aber der kubische) für gedehnten Kautschuk negativ ist; ungedehnter Kautschuk aber verhält sich normal.

Diese Anomalie ist bedingt durch die starke Veränderlichkeit des Elastizitätsmoduls E des Kautschuks mit der Temperatur, und zwar in dem Sinne, daß E mit steigender Temperatur zunimmt, also die durch ein bestimmtes Gewicht hervorgebrachte Dehnung abnimmt. Bei Temperaturerhöhung eines gedehnten Kautschukstreifens ist daher die dadurch bewirkte Verkürzung weit größer als die der normalen Wärmeausdehnung entsprechende Verlängerung.

Ausführung des Versuches. Der Stiel des Trichters mit dem übergeschobenen Kautschukschlauch (von etwa $\frac{1}{2}$ m Länge) wird in der Klammer eines hohen Statives befestigt und an die am Ausflußrohr angebrachten Haken Bleigewichte gehängt, so daß der Schlauch auf ungefähr das Doppelte seiner ursprünglichen Länge gedehnt wird. Quer über die Haken kann ein Stäbchen gelegt werden, welches vor der Teilung des passend aufgestellten Brettchens spielt. Unter das Abflußrohr wird ein Blechgefäß gestellt. Man überzeugt sich zunächst, daß bei Eingießen von kaltem Wasser keine Verkürzung (eventuell bei hoher Zimmertemperatur sogar eine kleine Verlängerung) des Schlauches eintritt. Beim Durchfließen heißen Wassers, das inzwischen vorbereitet wurde, beträgt dann die Verkürzung mehrere cm. Wird die Belastung des Schlauches verringert und der Versuch wiederholt, so ist beim schwächergedehnten Schlauch auch die Verkürzung entsprechend verkleinert.

23. Thermoskope.

Instrumentarium: 2 Thermoskopgefäße; Looser'sches Thermoskop; Quecksilberthermometer; 2 Blechgefäße; Bunsenbrenner; Athyläther.

Theorie der Versuche. Ein Gas oder ein ungesättigter Dampf befolgt bei Erwärmung angenähert die Zustandsgleichung: $p v = p_0 v_0 (1 + a t)$, wobei a für alle Gase nahezu den gleichen Wert: $a = 0.00366 = \frac{1}{273}$ besitzt. Enthält aber ein abgeschlossener Raum eine Flüssigkeit, die bis

zur Sättigung des Volumens Dampf abgibt, so steigt der Druck mit wachsender Temperatur rascher an, entsprechend der Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur. Ist z. B. ein Gefäß bei 20° C und dem Druck von rund 1 At einmal mit Luft, ein zweitesmal mit Luft und gesättigtem Äthylätherdampf erfüllt, so berechnet sich bei Erwärmung unter konstantem Volum die Druckzunahme folgendermaßen:

1) Luft:

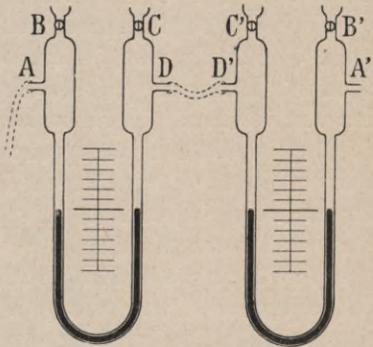
$$\begin{array}{l} \vartheta = 10^{\circ} \text{ C}; p = 724.5 \text{ mm Hg} \\ \text{,,} = 20^{\circ} \text{ ,,}; \quad = 750.0 \text{ ,,} \\ \text{,,} = 30^{\circ} \text{ ,,}; \quad = 775.5 \text{ ,,} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \vartheta = 10^{\circ} \text{ C} \\ \text{,,} = 20^{\circ} \text{ ,,} \\ \text{,,} = 30^{\circ} \text{ ,,} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \Delta p = 2.55 \text{ mm pro } 1^{\circ} \text{ C} \\ \text{,,} = 2.55 \text{ ,,} \\ \text{,,} = 2.55 \text{ ,,} \end{array}$$

2) Luft und Ätherdampf:

$$\begin{array}{l} \vartheta = 10^{\circ} \text{ C}; p = 300 + 290 = 590 \text{ mm Hg} \\ \text{,,} = 20^{\circ} \text{ ,,}; \quad = 310 + 340 = 650 \text{ ,,} \\ \text{,,} = 30^{\circ} \text{ ,,}; \quad = 320 + 650 = 970 \text{ ,,} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \vartheta = 10^{\circ} \text{ C} \\ \text{,,} = 20^{\circ} \text{ ,,} \\ \text{,,} = 30^{\circ} \text{ ,,} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \Delta p = 16.0 \text{ mm pro } 1^{\circ} \text{ C} \\ \text{,,} = 22.0 \text{ ,,} \\ \text{,,} = 22.0 \text{ ,,} \end{array}$$

Die einer Erwärmung um 1° C entsprechende Drucksteigerung ist im zweiten Falle nicht mehr konstant, aber bedeutend größer als im ersten Falle.

Beschreibung des Apparates. Auf einem Grundbrette ist ein vertikales Brett befestigt, an dem nebeneinander zwei U-Rohrmanometer, die mit gefärbtem Wasser zur Hälfte gefüllt sind und zwischen denen eine cm-Teilung liegt, angebracht sind. Am oberen Ende jedes Schenkels befinden sich Erweiterungen, von denen Ansatzröhre nach außen und überdies noch mit Hähnen versehene Röhrrchen in einen Trichter nach oben führen. Will man z. B. das linke Manometer als selbständiges Thermoskop verwenden, so wird das äußere Ansatzrohr A durch einen Schlauch mit dem eigentlichen Thermoskopgefäß verbunden und der Hahn C geöffnet, so daß im rechten Schenkel des I. Manometers Atmosphärendruck herrscht. Der Hahn B kann vorübergehend geöffnet werden, damit bei einem beliebigen Anfangszustande im linken Schenkel der Druck ebenfalls gleich dem äußeren Luftdrucke, die Druckdifferenz also Null sei. Vor Eintreten der zu beobachtenden Temperaturänderung ist aber B zu schließen und damit das Gas des Thermoskopgefäßes abzusperren. Der Druckunterschied, den das Manometer dann anzeigt, ist ein Maß der eingetretenen Temperaturänderung.



Für manche Zwecke empfiehlt sich eine Differentialmethode (vergl. S. 61), bei der bloß die Differenzen von zwei Temperaturänderungen beobachtet werden sollen. In diesem Falle werden die Ansatzröhrrchen D und D' durch einen Schlauch verbunden und A und A' mit den beiden Thermoskopgefäßen I und II verbunden. Nachdem durch vorübergehendes Öffnen der Hähne B, C, B', C' der Druckausgleich hergestellt wurde, zeigt dann

die nachträglich entstandene Höhendifferenz der beiden mittleren Schenkel die Differenz der Temperaturänderungen in den beiden Gefäßen I und II an.

Als Thermoskopgefäß dient zunächst ein Kochkolben von etwa 150 cm^3 Inhalt, der mit einem durchbohrten Kautschukstopfen verschlossen ist. Durch die Bohrung geht ein Glasröhrchen, an welches der Verbindungsschlauch zum Manometer angesetzt wird. Der Kolben enthält so viel Schrot, daß er in Wasser nicht schwimmt.

Ausführung der Versuche. 1) Prüfung der Empfindlichkeit des Luftthermoskopes. Das Thermoskopgefäß wird in ein Blechgefäß mit Wasser von Zimmertemperatur gestellt, wobei Hahn B zunächst geöffnet bleibt; nach einigen Minuten kann man annehmen, daß die eingeschlossene Luft die Temperatur des Bades erreicht hat; nun wird der Hahn geschlossen und die Temperatur des Bades an einem Quecksilberthermometer abgelesen. Dieser Temperatur ϑ_1 entspricht die Druckdifferenz $h_1 = 0$.

Durch Zugießen von inzwischen vorbereitetem warmen Wasser erhöht man die Temperatur um etwa 5° C . Man beobachtet die Temperatur ϑ_2 und den ihr entsprechenden Stand des Manometers h_2 und berechnet hieraus die Druckdifferenz (in cm einer Wassersäule gemessen), die einer Differenz von 1° C entspricht.

Nach der oben besprochenen Theorie wäre pro 1° C eine Druckdifferenz von 2.55 mm Hg , also 3.4 cm Wasser zu erwarten. Tatsächlich ist die beobachtete Differenz geringer, da die an der Erwärmung nicht teilnehmenden Luftvolumina im Manometer und im Verbindungsschlauch zu berücksichtigen sind. Daß strenggenommen die Zustandsänderung nicht bei konstantem Volum erfolgt wegen der Volumsänderung durch die Verschiebung der Manometerflüssigkeit, ist praktisch bei dem kleinen Querschnitte des Rohres zu vernachlässigen.

2) Prüfung der Empfindlichkeit des Äthylätherthermoskopes. In das zweite Thermoskopgefäß werden einige cm^3 flüssigen Äthyläthers eingegossen. Die Prüfung des einer Temperaturdifferenz von 1° C entsprechenden Manometerausschlages erfolgt in ganz analoger Weise wie bei (1). Nur ist wegen der größeren Empfindlichkeit des Ätherthermoskopes die Differenz ($\vartheta_1 - \vartheta_2$) kleiner zu wählen, etwa 2° C . Die experimentell bestimmte Empfindlichkeit ist wieder — aus den gleichen Gründen wie im vorigen Falle — kleiner als die theoretisch berechnete, aber doch merklich größer als beim Luftthermoskop.

Wird das Thermoskopgefäß auf konstanter Temperatur erhalten, so ist eine viel längere Zeit als beim Luftthermoskop erforderlich, bis auch der Stand des Manometers stationär geworden ist, da die Füllung des Verbindungsschlauches und des Manometerschenkels mit Ätherdampf durch Diffusion und daher relativ langsam erfolgt. Aus diesen Gründen und auch deswegen, weil die 1° C entsprechende Druckdifferenz nicht mehr konstant, sondern von der absoluten Höhe des untersuchten Temperaturintervalles abhängig ist (vergl. S. 59), eignet sich das Ätherthermoskop mehr für

den bloß qualitativen Nachweis kleiner Temperaturdifferenzen als für Versuche, in denen — wenn auch nur angenähert — quantitative Messungen vorgenommen werden sollen.

24. Dichtemaximum des Wassers.

Instrumentarium: Looser'sches Thermoskop; 2 Thermoskopgefäße; großes Becherglas; Eis; Quecksilberthermometer; Holzstab.

Theorie des Versuches. Eine ruhigstehende Wassermenge, deren Temperatur an verschiedenen Stellen verschieden ist, schichtet sich entsprechend dem spezifischen Gewichte des verschieden temperierten Wassers. Zwischen 0° und 4° C schwimmen daher die kälteren Partien auf den wärmeren, welche zu Boden sinken; oberhalb 4° C verhält es sich umgekehrt.

Wird daher eine Wassermenge, deren Temperatur ursprünglich gleichmäßig ist und wenig über 0° beträgt, in einer wärmeren Umgebung sich selbst überlassen, so wird die Mitteltemperatur der gesamten Masse allmählich zunehmen, aber zunächst rascher am Boden des Gefäßes als in den obersten Schichten. Sobald aber die Mitteltemperatur 4° C überschritten hat, sinken die kälteren und steigen die wärmeren Teile, und die Temperatur eilt in den oberen Schichten voraus, wie es bei einer Flüssigkeit normaler Wärmeausdehnung von Anfang an der Fall wäre.

Ausführung des Versuches. In ein größeres Becherglas, etwa 2 Liter fassend, wird kaltes Wasser gefüllt und dann zerkleinertes Eis eingebracht; durch Rühren mit einem Holzstabe wird der Temperatúrausgleich beschleunigt; man wartet, bis das Quecksilberthermometer eine Temperatur von wenig über 0° C (etwa bis zu 1° C) anzeigt.

Hierauf wird das eventuell noch vorhandene ungeschmolzene Eis entfernt und die beiden Thermoskopgefäße eingesetzt, derart, daß das eine auf dem Boden des Becherglases steht, das andere mittels eines Drahtakens am oberen Rande desselben befestigt wird. Die beiden Gefäße werden nun mit den beiden Manometern des Looser'schen Apparates verbunden und dieser differential geschaltet (vergl. S. 59).

Man läßt einige Minuten verstreichen, damit die Thermoskopgefäße die Temperatur des Wassers annehmen, und läßt einstweilen die Hähne B, C, B', C' offen. Durch zeitweiliges Rühren sorgt man dafür, daß zunächst die Temperaturverteilung im Wasser eine gleichförmige ist. Dann werden alle Hähne geschlossen und von Zeit zu Zeit der Stand der Manometer beobachtet. Die Temperatur des oberen Thermoskopgefäßes bleibt zunächst zurück, holt dann die des unteren ein und eilt voraus, entsprechend dem oben Erwähnten.

25. Unterkühlung von Thymol.

Instrumentarium: Epruvette mit Thymol; Blechgefäß; Bunsenbrenner; Vorratsfläschchen mit festem Thymol.

Ausführung des Versuches. Thymol ($C_{10}H_{14}O$) ist eine organische Verbindung von kampherähnlichem Aussehen und Thymiengeruch; sein Schmelzpunkt liegt bei zirka $50^{\circ}C$. Diese Substanz besitzt in hervorragendem Grade die Eigenschaft, sich stark unter ihren normalen Schmelzpunkt unterkühlen zu lassen (bis unter $0^{\circ}C$, also um mehr als 50°), und dabei wird das labile Gleichgewicht des flüssigen Zustandes im Gegensatze zu anderen unterkühlten Flüssigkeiten, z. B. Wasser, durch mechanische Erschütterungen (Schütteln, Umrühren) nicht gestört, sondern bloß durch einen sogenannten »Keim« festen Thymols, der — auch als ganz kleines Stäubchen — den Ansatzkern für die Kristallbildung liefert.

Eine Eprouvette wird etwa zur Hälfte mit Thymolstücken gefüllt und in ein Gefäß mit heißem Wasser (etwa 60°) gestellt. Sobald das gesamte Thymol geschmolzen ist, kann man die Eprouvette herausheben und in kaltem Wasser abkühlen; doch ist sorgfältig darauf zu achten, daß nicht die geringsten Spuren festen Thymols zurückbleiben, etwa in dem obersten, aus dem Wasserbade herausragenden Teile der Eprouvette. Das geschmolzene Thymol ist eine gelbliche öartige Flüssigkeit, die, wie bereits erwähnt, auch beim Schütteln und Umrühren bei Zimmertemperatur flüssig bleibt. Durch Einwerfen eines Stückchens festen Thymols — z. B. etwas Pulver, das mit dem Messer von einem größeren Stücke abgeschabt wird — tritt die Erstarrung ein, aber nicht plötzlich in der ganzen Masse, da schon die durch Erstarren eines Bruchteiles freiwerdende Schmelzwärme ausreicht, den ganzen Inhalt bis zur Schmelztemperatur zu erwärmen. Diese Erwärmung auf zirka $50^{\circ}C$ ist mit der Hand fühlbar; der Versuch kann daher außer zur Demonstration einer unterkühlten Flüssigkeit auch zur Demonstration der freiwerdenden Schmelzwärme verwendet werden.

Nach Beendigung des Versuches — zur Beschleunigung des Erstarrens stellt man die Eprouvette in ein Gefäß mit kaltem Wasser — wird das Röhrchen mit einem Kork verschlossen, da das relativ kostspielige Thymol auch im festen Zustande ziemlich flüchtig ist.

26. Regelation des Eises.

Instrumentarium: Blechgefäß; Eis; Kochsalz; Eprouvette; dünner Messingdraht; Gewichte; Stativ für Eiszylinder.

Theorie des Versuches. Der Schmelzpunkt des Eises hängt ab vom Drucke, und zwar erniedrigt er sich um $0.007^{\circ}C$ für je 1 At (= rund 1 kg-Gew pro cm^2) Druckzuwachs. Durch relativ kleine Gewichte, deren Wirkung auf eine sehr kleine Fläche verteilt wird, lassen sich daher merkliche Erniedrigungen des Gefrierpunktes erzielen. Verteilt sich z. B. ein Gewicht von 1 kg auf eine Fläche von $0.04 cm^2$, indem das betreffende Gewicht an eine Drahtschlinge angehängt wird, die bei 0.2 mm Drahtdurchmesser längs eines Stückes von 2 cm auf Eis aufliegt, so berechnet sich eine Erniedrigung des Gefrierpunktes um $0.18^{\circ}C$.

Nullgradiges Eis schmilzt daher unter diesem Drucke, wobei die Umgebung durch die verbrauchte Schmelzwärme unter 0° abgekühlt wird; das über der einsinkenden Schlinge befindliche Wasser gefriert daher wieder, und die Schlinge schneidet das Eis durch, ohne es in zwei Stücke zu trennen. Die Wärmeleitung von außen durch den Draht für sich allein, ohne das Phänomen des Schmelzpunkterniedrigung durch Druck, würde zwar auch ein Einsinken der Schlinge bewirken, aber nicht zur Regulation, dem Wiedertzusammenfrieren der Schnittflächen, führen.

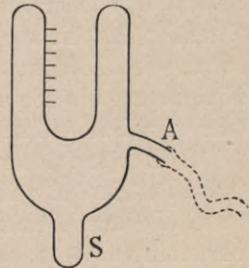
Ausführung des Versuches. Um reines Eis zu erhalten, wird eine Eprouvette mit destilliertem Wasser gefüllt und durch längeres Stehen in einem weiteren Gefäße, das mit einer aus Eis und Kochsalz hergestellten Kältemischung gefüllt ist, zum Gefrieren gebracht. Sobald dieser Vorgang beendet ist, läßt man die Eprouvette einige Zeit in einer Mischung von Eis und Wasser (ohne Salz) stehen, damit der gebildete Eiszylinder, der ursprünglich in der Kältemischung unter 0° abgekühlt wurde, eine gleichmäßige Temperatur von 0° annimmt. Nach kurzdauerndem leichten Erwärmen der Außenwand der Eprouvette (Bestreichen mit der Flamme eines Bunsenbrenners oder Eintauchen in warmes Wasser) läßt sich der Eiszylinder aus der Eprouvette entfernen; er wird auf ein Stativ gelegt, das aus einem geschlitzten Brettchen mit zwei ausgehöhlten Korkunterlagen und einem Dreifuß besteht; nun wird eine Schlinge aus sehr dünnem Messingdraht über den Zylinder gelegt und mit einem Gewichte von etwa 1 kg belastet. Das Durchschneiden des Eiszylinders erfolgt innerhalb einiger Minuten. Damit das am Ende des Versuches herabfallende Gewicht keinen Schaden anrichtet, wird ein Tuch untergelegt. Die Lage der Schnittfläche bleibt gewöhnlich im klaren Eiszylinder durch eine Schicht kleiner Bläschen kenntlich.

27. Kalorimetrische Versuche.

Instrumentarium: Looser'sches Thermoskop; 2 doppelwandige Rezeptoren; Metallkörper; Blechgefäß; Bunsenbrenner; Alkohol; Salmiak; Holzkohle; Glasstäbchen; Schlauch mit Röhrchen; Handwage mit Gewichtsatz.

Beschreibung des Apparates. Das Manometer des Looser'schen Apparates wurde bereits S. 59 besprochen. Als Thermoskopgefäße für speziell kalorimetrische Versuche dienen zwei sogenannte

»Rezeptoren«, doppelwandige Glasgefäße der in der Figur abgebildeten Form. Der Stiel S am unteren Ende paßt in kleine Stative, die an einer Leiste oberhalb des Manometers verschiebbar angebracht werden können; das Ansatzrohr A dient zur Schlauchverbindung mit dem Manometer; die becherförmige Vertiefung ist mit einer Teilung (cm^3) versehen, so daß die Menge der eingefüllten Kalorimeterflüssigkeit abgelesen werden kann.



Ausführung der Versuche. 1) Spezifische Wärme verschiedener Metalle. Eine Reihe von Metallkörpern aus verschiedenem Material (Cu, Fe, Sn, Pb) ist beigegeben, deren Gewichte untereinander gleich sind. Diese werden in einem gemeinsamen Bade auf die Siedetemperatur des Wassers erhitzt. Die als Kalorimeter dienenden Rezeptoren werden mit gleichen Mengen Wassers gefüllt, und man wartet zunächst, bis die Temperaturen der Füllung und der Außenluft gleich geworden sind, so daß beim Absperren der Hähne C und C' (vergl. S. 59) keine Änderung des Manometerstandes eintritt.

Zwei Metallkörper werden nun aus dem Bade in die Rezeptoren gebracht; da ihre Massen und ihre Anfangstemperaturen gleich sind, gibt die an den beiden Manometern abzulesende Temperaturerhöhung in den Kalorimetern ein relatives Maß der spezifischen Wärmen der beiden verwendeten Stoffe. (Es ist $c = 0.03$ für Pb, 0.05 für Sn, 0.09 für Cu, 0.10 für Fe.) Aus der Eichung der Manometerskala (vergl. Empfindlichkeitsbestimmung S. 60), der Wassermenge im Kalorimeter und dem mittels der Handwage zu bestimmenden Gewichte der Metallkörper läßt sich angenähert der Absolutwert von c berechnen.

2) Spezifische Wärme verschiedener Flüssigkeiten. Von den beiden Rezeptoren wird der eine wie früher mit Wasser, der andere mit absolutem Alkohol gefüllt, und zwar mit gleichen Volumina. Die Ausführung erfolgt ganz analog wie im vorigen Versuche, nur daß zwei gleichbeschaffene Kupferkörper verwendet werden, die also auch gleiche Wärmemengen an die Kalorimeter abgeben.

Unter Vernachlässigung des Wasserwertes der beiden Glasgefäße, die an der Erwärmung teilnehmen, sind dann die erzielten Temperatursteigerungen in den beiden Kalorimetern umgekehrt proportional den Wärmekapazitäten der beiden Füllungen, also für Alkohol größer als für Wasser. Unmittelbar werden hier die Wärmekapazitäten gleicher Volumina verglichen; da Alkohol das spezifische Gewicht rund 0.80 , die spezifische Wärme rund 0.60 besitzt, ist bei gleichem Volum seine Wärmekapazität 0.48 von der des Wassers, also etwa die doppelte Temperaturerhöhung zu erwarten.

3) Lösungswärme. Zur Demonstration des bei der Auflösung eines Salzes in Wasser stattfindenden Wärmeverbrauches und der daraus resultierenden Abkühlung eignet sich besonders Salmiak. Nachdem die Wasserfüllung des Kalorimeters die Zimmertemperatur angenommen hat, wird durch Einbringen von Salmiak und Umrühren mittels eines Glasstäbchens eine sehr merkbare Abkühlung beobachtbar.

4) Adsorptionswärme. Der eine Rezeptor wird zunächst gut getrocknet, hierauf mit zerkleinerter Holzkohle angefüllt, und ein Glasröhrchen, das durch einen Schlauch mit der Gasleitung in Verbindung steht, so eingeführt, daß es bis zum Boden des Gefäßes reicht. Nach Abwarten des stationären Temperaturzustandes bei geschlossenem Gashahn läßt man Leucht-

gas hindurchströmen und beobachtet die der Adsorption des Gases durch Holzkohle entsprechende Wärmeentwicklung.

Statt des Leuchtgases kann auch Kohlensäure aus einem Kipp'schen Apparate verwendet werden.

28. Versuche mit fester Kohlensäure.

Instrumentarium: Zylinder mit verflüssigter Kohlensäure; Holzstativ; Ansatzstück; Tuchbeutel; Hornlöffel; Äther; Holzschale; Thermometer für tiefe Temperaturen; Eproutetten; Gefäß mit Wasser; Quecksilber; Alkohol; Porzellanschale.

Theorie der Versuche. Kohlensäure besitzt eine kritische Temperatur von $+ 31^{\circ} \text{C}$ und einen kritischen Druck von $55 \text{ m Hg} = 72.4 \text{ At}$; es kann daher dieses Gas unterhalb dieser Temperatur durch hinreichend großen Druck verflüssigt, resp. flüssig erhalten werden. Bei tieferen Temperaturen sind die Sättigungsdrucke:

$+ 20^{\circ} \text{C} : 58 \text{ At}$	$- 40^{\circ} \text{C} : 10.3 \text{ At}$
$0^{\circ} \text{C} : 35.5 \text{ „}$	$- 60^{\circ} \text{C} \quad 3.8 \text{ „}$
$- 20^{\circ} \text{C} : 19.1 \text{ „}$	$- 80^{\circ} \text{C} \quad 1.0 \text{ „}$

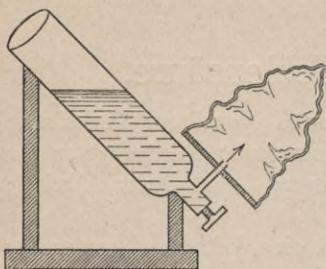
Entsprechende Werte des Druckes sind daher in einem geschlossenen Gefäße anzunehmen, das flüssige Kohlensäure enthält.

Aus der Umkehrung der einander zugeordneten Werte von Temperatur und gesättigtem Dampfdruck erhält man zugleich die Lage des Siedepunktes flüssiger Kohlensäure für verschiedene Werte des Druckes. Da nun der Schmelzpunkt fester Kohlensäure bei $- 57^{\circ} \text{C}$ liegt, erkennt man, daß ein Schmelzen der Kohlensäure nur bei Drucken von etwa 4 At aufwärts möglich ist; bei geringerem Drucke liegt der Quasisiedepunkt unterhalb des Schmelzpunktes, d. h. es ist die flüssige Form nicht existenzfähig, und es tritt ein direkter Übergang des festen in den gasförmigen Zustand ein. Wird daher Kohlensäure, die zunächst bei Zimmertemperatur unter hohem Drucke flüssig erhalten wurde, unter geringeren Druck (z. B. 1 At) gebracht, so kühlt sie sich durch die lebhaftere Verdampfung zunächst bis zum Schmelzpunkt ($- 57^{\circ}$) ab und geht in feste Kohlensäure über; diese verdampft weiter und kühlt sich bis zu jener Temperatur ab, bei der der Sättigungsdruck gleich dem tatsächlich herrschenden Drucke ist, also z. B. bei 1 At an freier Luft bis zu $- 80^{\circ}$ (genauer $- 78^{\circ} \text{C}$).

Beschreibung des Apparates und Ausführung der Versuche. Wegen ihrer vielfachen Verwendung zu industriellen Zwecken kommen Zylinder mit 2 bis 10 kg verflüssigter Kohlensäure in den Handel. Die Zylinder bestehen aus Schmiedeeisen und sind vor ihrer Füllung auf Drucke, wie sie bei normaler Temperatur als Sättigungsdrucke des Kohlensäuredampfes auftreten, also bis etwa 60 At , geprüft; immerhin ist eine allzuhohe Erwärmung, z. B. in der Nähe des geheizten Ofens, wegen der Explosionsgefahr besser

zu vermeiden, ebenso darauf zu achten, daß nicht durch mechanische Beschädigung (Herunterfallen) des Zylinders eine Explosion eintritt.

Nach Abnahme der Verschlußkappe zeigt sich am oberen Ende des Zylinders ein mit Gewinde versehenes Stück, an welches ein Ausflußrohr angeschraubt werden kann. Ein nach Art eines Wasserleitungshahnes gebauter Hahn schließt vorläufig die Ausflußöffnung ab.



Will man dem Zylinder gasförmige Kohlensäure entnehmen, so wird er in aufrechter Stellung verwendet. Zur Erzeugung fester Kohlensäure wird er dagegen in einem entsprechenden Holzstativ mit dem oberen Ende schief nach unten gelegt (vergl. Figur), so daß bei Öffnen des Hahnes die flüssige Kohlensäure unter großem Druck herausgetrieben wird und erstarrt; gewöhnlich ist dieser Vorgang mit kräftiger Elektrizitätserregung (infolge Reibung) verbunden, so daß einige mm-lange Funken entstehen. Man fängt den gebildeten Kohlensäureschnee in einem Tuchbeutel auf, dessen hölzerne durchbohrte Bodenplatte auf das Ausflußrohr gesteckt wird und dessen oberes Ende vorher zugebunden wird. Nach Zudrehen des Hahnes wird dann der Beutel entfernt und geöffnet und der in ihm enthaltene Schnee in eine Schale aus schlecht wärmeleitendem Material (Holz) geschüttet. Leichtes Anfassen des Schnees mit den Fingern ist vollkommen unschädlich, bei festem Drücken zwischen den Fingern entstehen aber Brandwunden.

Durch Einsenken eines für tiefe Temperaturen bestimmten Thermometers (mit Alkohol-, Toluol- oder Petrolätherfüllung) kann die Temperatur des Kohlensäureschnees zu etwa -80° ermittelt werden.

Auf einer erwärmten Platte verflüchtigt sich der Schnee rasch, ohne zu schmelzen (vergl. oben); dieser Vorgang kann daher zur Demonstration der »Verflüchtigung« benutzt werden.

In Wasser von Zimmertemperatur gebracht (mittels eines gestielten Drahtkörbchens untergetaucht), geht die feste Kohlensäure rasch in Dampf über, so daß die aufsteigenden Blasen ein Sieden des Wassers vortäuschen; natürlich kühlt sich dabei in Wirklichkeit das Wasser ab, eventuell bis zur beginnenden Eisbildung.

Um ein Kältebad herzustellen, füllt man Kohlensäureschnee in ein Becherglas und setzt so viel Äthyläther hinzu, daß eine breiartige Masse entsteht. Diese ist keine Kältemischung im eigentlichen Sinne des Wortes — ihre Temperatur ist nicht tiefer als die des Schnees allein —, aber wegen ihrer besseren Wärmeleitfähigkeit geeigneter, um eingetauchte Körper rasch abzukühlen.

Die Eprouvetten, jede etwa zur Hälfte mit Quecksilber, beziehungsweise Alkohol und Äthyläther gefüllt, werden einige Minuten in das Kältebad getaucht; es zeigt sich, daß der Erstarrungspunkt des Quecksilbers (-38.8°C)

überschritten, die von Alkohol (-110°) und Äther (-118°) noch nicht erreicht sind.

Wird die Eprouvette mit dem erstarrten Quecksilber einige Sekunden in Wasser von Zimmertemperatur getaucht, so kann man den Quecksilberzylinder in eine Porzellanschale gleiten lassen und hämmern, wobei er sich etwa ähnlich wie Blei verhält. Auffallend ist das rasche Schmelzen des Quecksilbers an der Zimmerluft, verglichen mit der Haltbarkeit eines gleich großen Stückes Eis in Luft, deren Temperatur etwa gleich hoch (rund 60° C) über der Schmelztemperatur liegt. Die Ursache hiervon liegt zum Teil in der guten Wärmeleitung des metallischen Quecksilbers, zum Teil in seiner geringen Schmelzwärme (2.8 cal pro Gramm gegen 80 bei Eis).

29. Wärmeleitung.

Instrumentarium: Eprouvette mit Halter; Wachsstückchen; Bleidraht; Bunsenbrenner; großes Blechgefäß; Dreifuß; Differentialthermoskop für Wärmeleitung; Petroleum.

Ausführung der Versuche. 1) Wärmeleitung und Konvektion. Wird eine Flüssigkeit normaler Wärmeausdehnung von unten her erwärmt, so steigen die erwärmten Partien infolge ihres verminderten spezifischen Gewichtes auf und werden durch herabsinkende kalte ersetzt. Der Temperaturengleich innerhalb der Flüssigkeit wird also zum Teil durch Konvektion (Fortführung der Wärmeenergie im Raume zugleich mit der Materie) bewirkt und daher beschleunigt. Bei Erwärmung der Flüssigkeit von oben bleibt das mechanische Gleichgewicht ungestört, und die Temperatursteigerung pflanzt sich allein durch Wärmeleitung nach unten fort, also langsamer als im früheren Falle, besonders wenn das Wärmeleitungsvermögen der Flüssigkeit klein ist, wie z. B. beim Wasser.

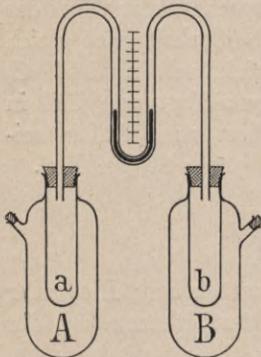
Zur Demonstration der geringen Wärmeleitung bringt man ein Stückchen einer leicht schmelzbaren Substanz, z. B. Wachs, auf den Boden einer mit Wasser gefüllten Eprouvette; damit das Wachsstückchen nicht schwimmt, umwickelt man es mit Bleidraht. Wird die mittels eines zangenartigen Halters gefaßte Eprouvette in schiefer Stellung am oberen Ende durch eine Bunsenflamme erwärmt, so gerät dort das Wasser rasch ins Sieden, doch dauert es lange, bis auch die unteren Partien auf die Schmelztemperatur des Wachses erwärmt werden.

Wenn dagegen das Wachsstückchen schwimmt und das untere Ende erhitzt wird, tritt das Schmelzen sehr rasch ein.

2) Demonstration der Differenz der Wärmeleitung verschiedener Stoffe. Zwei Luftthermoskope sind analog wie beim Looser'schen Apparate differential geschaltet. Die Thermoskope bestehen aus doppelwandigen Gefäßen, bei denen aber — im Gegensatz zu den S. 63 beschriebenen Rezeptoren — der innere Raum (a, b) das eigentliche Thermoskopgefäß darstellt, während die äußeren Räume (A, B) durch die An-

satzröhren mit verschiedenen Stoffen gefüllt werden, und zwar entweder mit 2 Gasen, z. B. Luft und Leuchtgas, oder mit 2 Flüssigkeiten, z. B. Wasser und Petroleum.

Die Kautschukstopfen, welche die beiden Thermoskopgefäße verschließen, sind doppelt durchbohrt, einerseits für das Manometerrohr, andererseits für kurze Röhren, die einen Schlauch mit Quetschhahn tragen und zum Druckausgleich bestimmt sind.



Nach der Füllung der beiden Gefäße A und B mit den zu vergleichenden Stoffen läßt man zunächst den ganzen Apparat so lange stehen, bis vollkommener Temperaturengleich (auf Zimmertemperatur) eingetreten ist; ein eventueller Überdruck auf der einen Seite wird durch vorübergehendes Öffnen der beiden Quetschhähne behoben.

Taucht man nun die beiden Gefäße A und B gleichzeitig in einen größeren Blechtopf, in dem man vorher Wasser bis etwa 50° oder 60° C erwärmt hat, so steigt die Temperatur in den beiden inneren Gefäßen a und b an, aber mit verschiedener Geschwindigkeit, entsprechend dem Wärmeleitungsvermögen der in A und B befindlichen Stoffe. Die Temperaturdifferenz wird am Manometer angezeigt, das auf der Seite des besseren Wärmeleiters sinkt. Nach hinreichend langer Zeit kommen beide Gefäße auf die Temperatur des Bades, der Manometer-Ausschlag sinkt daher nach Überschreiten eines Maximums wieder auf Null.

Wird dann der Apparat aus dem Bade herausgehoben und in kaltes Wasser gesenkt, so ist der Vorgang der umgekehrte wie früher, die Temperatur sinkt rascher auf der Seite des besseren Leiters, und das Manometer steigt daher hier.

30. Wärmestrahlung.

Instrumentarium: Looser'sches Thermoskop; 3 Schlitten; diverse Metallbüchsen; Weingeistlampe mit Drahtnetz; Blenden; Platten aus Glas, Hartgummi und Steinsalz; Lederlappen; Bunsenbrenner; Blechgefäß; Trichter.

Beschreibung des Apparates. Das Looser'sche Thermoskop wurde bereits S. 59 beschrieben. Auf die oberhalb des Manometers angebrachte mit Teilung versehene Schiene werden drei Schlitten aufgesetzt, die den wärmestrahlenden Körper und die beiden Rezeptoren aufnehmen. Als Quelle der Strahlung dient entweder eine Weingeistlampe, in der ein glockenförmiges Drahtnetz zum Glühen gebracht wird, oder — wenn bloß die Wirkung dunkler Wärmestrahlen untersucht werden soll — scheibenförmige Metallbüchsen, die so gestellt werden, daß sie den Rezeptoren ihre Basisflächen zuwenden. Für die Versuche über die Abhängigkeit der Emission von der Oberflächenbeschaffenheit sind mehrere solcher Strahlungsbüchsen vorhan-

den, deren Flächen teils blank (vernickelt und auf Hochglanz poliert), teils matt, mit weißem oder mit schwarzem Anstrich versehen sind. Diese Büchsen besitzen zwei Ansatzrohre; mittels eines Schlauches und Trichters wird durch das untere Rohr heißes Wasser eingefüllt, während die Luft durch das obere Ansatzrohr entweicht; nach Füllung wird der Schlauch vom Trichter abgezogen und über dieses obere Rohr gestreift, so daß das Gefäß verschlossen ist.

Die Rezeptoren (Thermoskopgefäße) sind ganz analog konstruierte Metallbüchsen, ebenfalls mit verschiedenartiger Oberflächenbeschaffenheit, die aber nur ein Ansatzrohr haben, das durch einen Schlauch mit dem Manometer verbunden wird.

Zwischen die Strahlungsquelle und die Rezeptoren kann man noch je einen Schlitten stellen, welcher eine Blende trägt, bestehend aus zwei Blechplatten mit rechteckigem Fenster; werden diese mit Platten verschiedenen Materiales (Glas, Steinsalz, Hartgummi etc.) überdeckt, so läßt sich die verschiedene Absorption der Wärmestrahlen in diesen Substanzen zeigen.

Ausführung der Versuche. 1) Abhängigkeit der Emission von der Oberflächenbeschaffenheit. Als Strahler dient eine mit heißem Wasser gefüllte Büchse, deren eine Fläche geschwärzt, deren andere blank ist. Als Rezeptoren werden zwei gleiche Büchsen verwendet mit schwarzen Flächen.

Vor Aufsetzen des Strahlers wird das Temperaturgleichgewicht abgewartet und die eventuellen Druckunterschiede ausgeglichen. Der mittlere Schlitten mit dem Strahler wird auf den Nullpunkt der Teilung gestellt, die beiden Rezeptoren symmetrisch rechts und links in gleicher, nicht zu großer Entfernung (etwa 10—15 cm).

Der der schwarzen strahlenden Fläche zugekehrte Rezeptor erwärmt sich stärker, so daß die größere Emission der schwarzen Fläche gegenüber der blanken demonstriert wird. Die blanke Oberfläche ist vor Füllung des Strahlers mittels eines Lederlappens und Polierrot möglichst blank zu putzen; nach Beendigung des Versuches wird die Strahlungsbüchse entleert und außen gut getrocknet.

2) Abhängigkeit der Absorption von der Oberflächenbeschaffenheit. Die Aufstellung ist analog wie früher, der Strahler aber auf beiden Seiten gleich: also entweder Büchse mit zwei schwarzen Flächen oder auch die Weingeistlampe mit Drahtnetz (in diesem Falle ist darauf zu achten, daß dieses gleichmäßig erhitzt wird). Von den Rezeptoren wendet der eine die schwarze, der andere die blanke Seite dem Strahler zu. Analog wie früher für die Emission ergibt sich die größere Wärmeabsorption durch die schwarze Fläche.

Über die Behandlung der blanken Fläche vergl. oben.

In analoger Weise kann man die Emission und Absorption der matten und der weißen Flächen an Strahlern und Rezeptoren untersuchen. Die

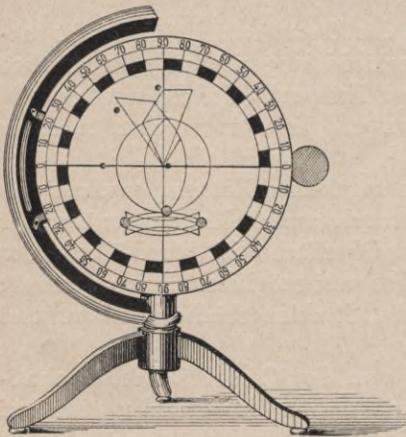
Resultate sind aber viel weniger deutlich; die weißen Flächen sind nur in optischer Beziehung »weiß«, d. h. alle Strahlen diffus reflektierend und fast gar nicht absorbierend; bezüglich der langwelligen dunklen Wärmestrahlen besitzen sie ein schon ziemlich hohes Emissions- und Absorptionsvermögen.

3) Absorption in verschiedenen Stoffen. Als Strahler verwendet man die Lampe mit Drahtnetz; als Rezeptoren solche mit schwarzen Flächen; zwischen Rezeptor und Strahler wird je einer der oben erwähnten Doppelschirme eingeschaltet. Das eine Fenster wird mit einer Glasplatte, das andere mit einer Steinsalzplatte gleicher Dicke bedeckt. Trotz ihrer Trübung, also mangelhaften Durchlässigkeit in optischer Beziehung, erweist sich die Steinsalzplatte als für Wärmestrahlen sehr gut durchlässig, während die Glasplatte merklich absorbiert. Eine dünne Hartgummiplatte erweist sich trotz ihrer Undurchlässigkeit für Licht ebenfalls als ziemlich durchlässig für Wärmestrahlen.

31. Optische Scheibe nach Hartl.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensor; Optische Scheibe samt Zubehör.

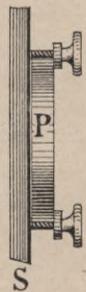
Beschreibung des Apparates. Die optische Scheibe von Hartl dient zur Demonstration der elementaren Gesetze der geometrischen Optik.



Auf einem eisernen Dreifuß befindet sich eine um eine horizontale Achse drehbare Scheibe (mit Papier überzogenes Blech), die längs des Umfanges eine Gradteilung trägt — in jedem Quadranten von 0° bis 90° beziffert —; die Intervalle von je 10° sind durch abwechselnd weiße und schwarze Felder auch auf größere Entfernung hin sichtbar gemacht.

In die Scheibe sind mehrere mit Gewinde versehene Löcher gebohrt; die im folgenden beschriebenen Aufsatzstücke (P) können mittels 2 resp. 3 Schrauben in der in der Figur angedeuteten Weise auf der Scheibe (S) befestigt werden.

Von solchen Aufsatzstücken sind vorhanden: ein Holzstreifen mit ebenem Spiegel aus Glas; ein gebogener Holzstreifen mit Konkav- und Konvexspiegel aus Metall; eine trapezförmige Glasplatte, als planparallele Platte, als Prisma von 30° und von 45° zu verwenden; eine halbkreisförmige Glasscheibe; eine kreisförmige



Glasscheibe; 3 Modelle von Konvexlinsen verschiedener Brennweite; ein Modell einer Konkavlinse.

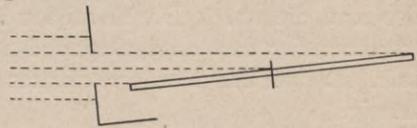
Die Stellungen, in welchen die verschiedenen Stücke aufzuschrauben sind, werden auf der Scheibe durch entsprechende Figuren angezeigt. Die oben erwähnten Glaskörper sind auf der einen Seite matt geschliffen, auf der anderen glatt; man legt die matte Seite auf die Scheibe, damit die Spur des streifend einfallenden Lichtes auch innerhalb des Glaskörpers sichtbar wird. Bei der Befestigung ist darauf zu achten, daß nicht durch zu festes Anziehen der Schrauben eine Beschädigung der Kanten eintritt; um dies zu verhüten, werden zwischen die Platte P und den vorstehenden Rand des Schraubenkopfes durchbohrte (zur Aufnahme der Schraubenspindel) Lederscheibchen eingelegt.

Die Hälfte des Umfanges der Scheibe ist von einer halbzyklindrischen Blende aus geschwärztem Blech umgeben, die mittels einer zur Scheibenachse konzentrischen, von dieser unabhängig beweglichen Achse gedreht werden kann. Beide Drehungen sollen mit mäßiger Reibung erfolgen; zu geringe oder zu große Beweglichkeit ist eventuell an den Schrauben beim Achsenlager zu korrigieren.

Die Blende ist in der Mitte mit einem rechteckigen Ausschnitte versehen, in welchen zwei Spaltbleche mit 3 resp. 7 Spalten eingesetzt werden können. Soll nur ein Spalt verwendet werden, so werden die beiden äußeren Spalten des dreispaltigen Bleches mit beigegebenen Plättchen überdeckt. Für Versuche, in denen die Dispersion störend wirkt, kann dann noch der mittlere Spalt mit einem gelben Glasplättchen überdeckt werden.

Ausführung der Versuche. 1) Aufstellung des Apparates. Bezüglich der Behandlung der Bogenlampe vergl. S. 162. Man verwendet entweder nur eine Kondensorlinse, die ein paralleles Strahlenbündel austreten läßt, oder beide Linsen, die ein erst konvergierendes, dann divergierendes Bündel liefern; im letzteren Falle ist der Apparat mindestens 2 m von dem Konvergenzpunkte des Lichtkegels entfernt aufzustellen, damit bei Verwendung mehrspaltiger Bleche die einzelnen Strahlen angenähert parallel bleiben. Nach Einschieben des 3-spaltigen Bleches mit verdeckten äußeren Spalten dreht man die Blende derart, daß das den mittleren Spalt passierende Bündel durch den Mittelpunkt der Scheibe geht.

Steht die Scheibe parallel der durch das Lichtbündel gelegten Vertikalenebene, so ist die auf der Scheibe erscheinende Lichtspur verhältnismäßig lichtschwach; man dreht daher den Apparat um eine vertikale Achse derart (vergl. den Grundriß in der Figur), daß die Helligkeit des Streifens sich steigert, aber nur so weit, daß dieser noch über die ganze Länge der Scheibe hinreicht.



Grundriß

2) Reflexionsgesetz. Der ebene Spiegel wird derart aufgeschraubt, daß seine Ebene in den Durchmesser $90^\circ - 90^\circ$ fällt, also die Normale in

Durchmesser $0^{\circ} - 0^{\circ}$. Unter Anwendung eines einzigen Spaltes (vergl. oben) läßt man den einfallenden Strahl gerade gegen den Mittelpunkt der Scheibe gehen; durch Drehung der Scheibe bei fixer Blende kann man den Einfallswinkel zwischen 0° und 90° beliebig variieren und zeigen, daß die an der Kreisteilung unmittelbar abzulesenden Werte des Einfallswinkels und des Reflexionswinkels gleich sind.

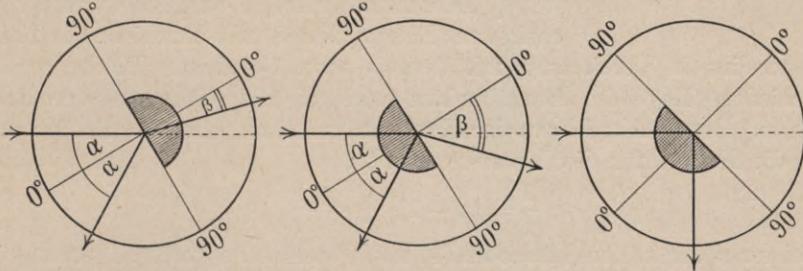
3) Sphärische Spiegel. Der mit spiegelnden Metallblechen belegte gebogene Holzstreifen wird aufgeschraubt, nachdem vorher die spiegelnden Flächen mit einem Lederlappen, eventuell unter Verwendung von Polierrot oder Schlemmkreide, auf möglichst hohen Glanz gebracht worden sind; andernfalls sind die reflektierten Strahlen zu lichtschwach, um auf größere Entfernung sichtbar zu sein. Unter Verwendung des 3-spaltigen Bleches ergibt sich beim Hohlspiegel der Brennpunkt als Schnittpunkt der drei reflektierten Strahlen; durch Ausmessen der Entfernung und des Krümmungsradius kann die Formel $f = \frac{r}{2}$ geprüft werden (der Krümmungsradius des Hohlspiegels ist gleich dem Radius der kreisförmigen Glasplatte und daher auch des auf der Scheibe eingezeichneten Kreises).

Bei Anwendung des 7-spaltigen Bleches zeigt sich die Abweichung der Randstrahlen, bei ganz entferntem Spaltblech andeutungsweise die Brennfläche.

4) Brechungsgesetz und Totalreflexion. Es wird wieder das 3-spaltige Blech mit verdeckten Seitenspalten eingesetzt und die halbkreisförmige Glasplatte derart aufgeschraubt, daß die ebene Fläche parallel dem Durchmesser $90^{\circ} - 90^{\circ}$ steht und dem einfallenden Strahle zugekehrt ist. Dieser — genau im Mittelpunkte der Scheibe auf die Trennungsfäche Luft-Glas auffallend — wird hier gebrochen und durchsetzt die zweite zylindrische Trennungsfäche Glas-Luft senkrecht, also unabgelenkt; es ist daher Einfallswinkel α und Brechungswinkel β unmittelbar an der Teilung abzulesen. Durch Drehen der Scheibe bei fixer Blende kann wieder α zwischen 0° und 90° variiert werden; aus einer Reihe zugeordneter Werte von α und β (z. B. für $\alpha = 0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ} \dots$) berechnet man den Quotienten $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ und demonstriert hiermit die Gültigkeit des Brechungsgesetzes, beziehungsweise bestimmt den Wert des Brechungsquotienten für die verwendete Glassorte (es ist nahezu $n = 1.5$). Zum Nachschlagen der Sinuswerte genügt die Tabelle 31 in Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik, der man die auf 3 Dezimalstellen abgerundeten Werte entnimmt; die Verwendung der dort angegebenen 4-stelligen Zahlen oder einer Logarithmentafel ist bei der hier erreichbaren Genauigkeit der Winkelablesung überflüssig.

Wendet man dem wieder genau gegen den Mittelpunkt gerichteten Strahl die Zylinderfläche zu, so ergibt sich in analoger Weise wie früher die Demonstration des Brechungsgesetzes für Brechung vom Lot ($\beta > \alpha$).

Bei der Brechung zum Lot entspricht einem Einfallswinkel von nahezu 90° (streifende Inzidenz) ein Brechungswinkel von zirka 41° ; bei der Brechung vom Lot erhält man daher bereits bei $\alpha = 41^\circ$ streifenden Austritt ($\beta = 90^\circ$), mit schon merklicher Dispersion des gebrochenen Strahles, der übrigens bei wachsendem α immer lichtschwächer geworden ist, während der ebenfalls sichtbare reflektierte Strahl an Intensität zugenommen hat.



1. Brechung zum Lot, 2. Brechung vom Lot, 3. Totale Reflexion.

Bei Überschreitung des Wertes $\alpha = 41^\circ$ erhält man dann totale Reflexion an der Grenzfläche Glas-Luft.

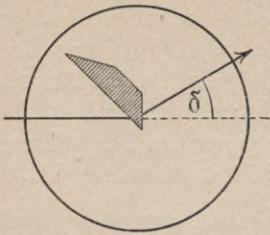
Wird bei dieser Stellung ein Streifen nassen Filtrierpapiers auf die ebene Fläche des Glaskörpers geklebt, so erfolgt die Reflexion an einer Trennungsfläche Glas-Wasser, für die der Grenzwinkel der totalen Reflexion noch nicht erreicht ist; ein Teil des Lichtes tritt daher durch Brechung in das Wasser über und wird durch das Papier diffus zerstreut, so daß dieses aufgehellt erscheint, während gleichzeitig die Intensität des reflektierten Strahles abnimmt. Wird dagegen trockenes Filtrierpapier in der gleichen Weise aufgelegt, so bleibt es infolge der Totalreflexion unbeleuchtet.

6) Strahlengang in planparallelen Platten und in Prismen. Das trapezförmige Glasstück kann derart aufgesetzt werden, daß der einfache Lichtstrahl (ein Spalt) die beiden parallelen Flächen durchsetzt; dann ergibt sich die der Theorie entsprechende Parallelverschiebung des austretenden Strahles gegen den einfallenden.

Es kann aber auch eine der beiden Spitzen etwas über den Mittelpunkt der Scheibe geschoben werden, so daß der Strahlengang in einem Prisma von 30° resp. 45° brechendem Winkel dargestellt wird. Da der Strahl nahezu durch den Mittelpunkt der Scheibe geht, liefert die Differenz der Ablesungen an der Teilung direkt den Ablenkungswinkel δ . Man kann hierbei leicht das Minimum der Ablenkung zeigen, indem die Scheibe bei fixer Blende gedreht wird, und aus der für die Minimumstellung gültigen

Formel
$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}}$$
 den Brechungsquotienten der verwendeten Glassorte

nach der Prismenmethode bestimmen.



Bei hinreichender Intensität des einfallenden weißen Lichtes ist auch die Dispersion deutlich sichtbar; Überdecken des Spaltes mit einem roten und mit einem blauen Glasplättchen läßt die Unterschiede der Ablenkungen für rotes und blaues Licht quantitativ ermitteln.

7) Linsenmodelle. Drei Modelle von Sammellinsen (Bikonvexlinsen) mit verschiedenem Krümmungsradius in Verbindung mit dem 3- resp. 7-spaltigen Bleche ergeben verschiedene Lage des Brennpunktes sowie die Abweichungen der Randstrahlen. Durch Abzeichnen der Konturen und Ausmessen der Radien prüft man die Formel für die Linsenbrennweite:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

wobei für n der in den Versuchen (4) und (6) ermittelte Wert eingesetzt wird.

Es ist zu beachten, daß die hier verwendeten Glaskörper Zylinderlinsen sind, die nur den Strahlengang in der Vertikalebene einer sphärischen Linse darstellen, damit aber eben der üblichen Zeichnung des Strahlenganges entsprechen.

Die in Versuch (4) verwendete halbkreisförmige Glasplatte kann ebenfalls als Modell einer plankonvexen Sammellinse verwendet werden. Bei entferntem Spaltblech (breites Bündel parallel einfallender Strahlen) zeigt sich deutlich die durch die sphärische Aberration der Randstrahlen entstehende Katakaustika.

Die Bikonkavlinse demonstriert in analoger Weise den Strahlengang in einer Zerstreulinse.

8) Die zur Demonstration der Entstehung des Regenbogens bestimmte kreisförmige Glasplatte liefert bei Verwendung kleinerer Bogenlampen nicht hinreichend deutliche Strahlen für Demonstration vor einem größeren Auditorium, immerhin ist für den Experimentator selbst das dem Hauptregenbogen entsprechende dispergierte Bündel erkennbar.

32. Optische Homogenität und Inhomogenität.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; Projektionslinse; Schirm; Glastrog; Glasstab; Benzol; Schwefelkohlenstoff; gelbe Glasplatte; Bunsenbrenner; Äthyläther; Blende auf Stativ.

Ausführung der Versuche. 1) Ein parallelepipedischer Glastrog mit planparallelen Wänden wird vor die Kondensatorlinsen gestellt. In den Trog bringt man einen Glasstab. Mittels der Projektionslinse entwirft man auf dem Schirme (in etwa 2—3 m Distanz) ein Bild, derart, daß die Konturen des Glasstabes scharf erscheinen.

Wird der Glastrog nun mit einer farblosen Flüssigkeit gefüllt, deren Brechungsquotient exakt gleich dem des Glasstabes ist, so verhält er sich

in optischer Beziehung wie ein homogener Körper von der Form einer planparallelen Platte, und die Konturen des Stabes verschwinden sowohl bei direkter Daraufrsicht als im projizierten Bilde. Angenähert wird dies erreicht durch Eingießen von Benzol ($n = 1.50$); genauer nach Zugabe von etwas Schwefelkohlenstoff ($n = 1.63$ für Na-Licht) zum Benzol, wodurch eine homogene klare Mischung entsteht, die bei richtigem Verhältnis der Bestandteile gerade den Brechungsquotienten der Glassorte (n zwischen 1.51 und 1.52) besitzt.

Wegen der in Glas und in Benzol, beziehungsweise Benzol-Schwefelkohlenstoffmischung, verschiedenen Dispersion läßt sich exakte Gleichheit von n nicht für alle Farben zugleich herstellen; unter Einschaltung einer gelben Glasplatte (zwischen Kondensator und Trog) stellt man die Gleichheit für gelbes Licht her.

2) Optische Inhomogenitäten innerhalb eines ausgedehnten durchsichtigen Körpers, beruhend auf Differenzen des Wertes von n an verschiedenen Stellen, werden in geeigneter Beleuchtung als sogen. »Schlieren« sichtbar, auch bei sehr geringem Absolutbetrage dieser Differenzen.

Zur bloßen Demonstration dieser Erscheinung genügt an Stelle der komplizierteren Schlierenapparate die Verwendung eines intensiven Lichtbündels, das nahezu von einem Punkte ausgeht, und die Einschaltung des optisch inhomogenen Körpers zwischen den Konvergenzpunkt des Bündels und einen in 2—3 m Entfernung aufgestellten Schirm. Zu diesem Zwecke verwendet man die Bogenlampe mit beiden Kondensorlinsen und stellt etwas vor dem Konvergenzpunkt des Bündels eine Blende mit kreisförmiger Öffnung von etwa 1 cm Durchmesser, so daß die — meistens gefärbten — Randstrahlen des nicht exakt in einen Punkt konvergierenden Bündels abgeblendet werden.

Die passende Stellung des zu prüfenden Körpers zwischen Lichtquelle und Schirm, welche einerseits genügende Deutlichkeit der Schlieren, anderseits hinreichende Vergrößerung im Schattenbilde liefert, wird leicht durch Ausprobieren gefunden. Diese Anordnung ist empfindlich genug, die geringen Differenzen des Brechungsquotienten zu zeigen, welche zwischen verschiedenen Gasen und Dämpfen sowie zwischen Luftmassen verschiedener Temperatur bestehen.

Im Schattenbilde eines angezündeten Bunsenbrenners ist nicht bloß die Flamme, sondern auch die von ihr aufsteigende erhitzte Luft sichtbar; ebenso sieht man von einem in der beiseitegestellten Flamme erhitzten Glas- oder Metallstabe solche Schlieren aufsteigen. Die der Oberfläche des erhitzten Körpers unmittelbar anliegende Schicht erscheint dabei im Schattenbild als heller Saum.

Ein in Äther getauchter Wattebausch läßt die infolge ihres größeren spezifischen Gewichtes abwärtssinkenden Ätherdämpfe als Schlieren erscheinen. Auch das aus einem Bunsenbrenner unangezündet ausströmende Leuchtgas wird sichtbar.

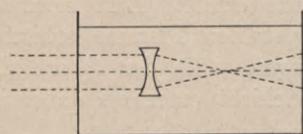
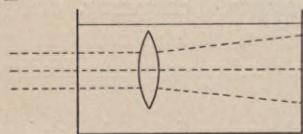
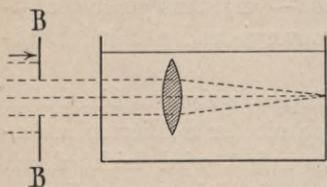
33. Luftlinsen.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; großer Trog mit Glaswänden; Blende; Fluoreszeinlösung; Sammellinse; bikonkave Luftlinse; bikonvexe Luftlinse.

Theorie der Versuche. Die Linsenformel: $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ gibt allgemein die Brennweite einer sphärischen Linse beliebiger Form an, wenn r_1 und r_2 die Krümmungsradien bezeichnen, und zwar mit positivem Vorzeichen für konvexe, mit negativem für konkave Flächen; für Konkavlinsen ergibt sich dementsprechend ein negativer Wert der Brennweite. In dieser Formel bedeutet n den relativen Brechungsquotienten des Linsenmaterials bezüglich des umgebenden Mediums, also einfach den Wert des Brechungsquotienten n_L der betreffenden Glassorte, wenn die Linse in Luft ist, dagegen den Wert $\frac{n_L}{n_M}$, wenn das die Linse umgebende Medium den Brechungsquotienten n_M besitzt.

Wird daher eine Glaslinse in Wasser ($n_M = 1.33$) getaucht, so ist ihre Brennweite (positiv oder negativ) im Absolutbetrag vergrößert. Ist $n_L < n_M$, so wird der Ausdruck $(n-1)$ negativ und der Zusammenhang zwischen geometrischer Form und optischer Wirkung kehrt sich um: Konvexlinsen werden Zerstreuungslinsen, Konkavlinsen werden Sammellinsen.

Ausführung der Versuche. Ein größerer Trog, dessen Seitenwände aus Glas bestehen, wird mit Wasser gefüllt; einige Tropfen Fluoreszeinlösung werden hinzugesetzt. Unter Verwendung bloß einer Kondensorlinse läßt man ein horizontales Bündel paralleler Strahlen den Trog durchsetzen, nachdem eine Blende mit kreisförmiger Öffnung von etwa 4 cm Durchmesser vorgeschaltet wurde.



Der in der Flüssigkeit durchstrahlte Zylinder ist von der Seite her in grünlichem Fluoreszenlichte leuchtend deutlich sichtbar.

a) Eine Sammellinse aus Glas von ziemlich kurzer Brennweite (etwa 10 cm) wird zunächst auf ihre Brennweite in Luft geprüft, für Demonstrationszwecke am einfachsten, indem man sie in das Parallelstrahlenbündel stellt und die Luft hinter ihr durch Rauch trübt, so daß der Brennpunkt als Spitze des entstehenden Lichtkegels sichtbar wird. In den Trog eingetaucht, bewirkt diese Linse nur eine schwache Konvergenz des Lichtes; aus obiger Formel berechnet sich die Brennweite in Wasser zu: $f' = f \frac{n-1}{\frac{3}{4}n-1} = 4f$, wenn

man den Näherungswert $n = 1.5$ für den Brechungsquotienten des Glases einsetzt.

b) Zwei Uhrgläser sind mittels Siegelacks zu einer Bikonvexlinse zusammengekittet. Die Uhrgläser selbst sind — als von parallelen Flächen begrenzte Platten — in erster Annäherung optisch wirkungslos. In Wasser getaucht, wirkt die bikonvexe Luftlinse als Zerstreulinse.

c) Zwei analog auf eine Messingfassung aufge kittete Uhrgläser, die eine Bikonkavlinse aus Luft abgrenzen, wirken in der gleichen Stellung als Sammellinse.

34. Objektive Darstellung der Dispersionserscheinungen.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensor; Spalt auf Stativ; Projektionslinse; Schirm; verstellbares Tischchen; diverse Glasprismen; Hohlprisma mit Wasser; Hohlprisma mit Schwefelkohlenstoff; geradsichtiges Prisma; achromatisches Prisma; Maßstab.

Theorie der Versuche. Ein Spektrum für objektive Demonstration wird auf einem Schirm entworfen, indem von einem intensiv beleuchteten Spalte durch eine Projektionslinse ein scharfes Bild auf dem mehrere Meter entfernten Schirm erzeugt wird und ein Prisma, resp. eine Prismenkombination in das aus der Linse austretende Lichtbündel gestellt wird.

Jeder im physikalischen Sinne einfachen Farbe (Lichtsorte bestimmter Wellenlänge) entspricht dann im Spektrum ein Streifen von der Größe (Höhe und Breite) des scharfen Spaltbildes. Längs einer Vertikallinie des auf dem Schirme sichtbaren Spektrums sind daher infolge des Übergreifens der endlich breiten Spaltbilder verschiedene Farben gemischt; je schmaler der Spalt und somit auch das Spaltbild ist, um so reiner, aber auch um so lichtschwächer ist das erzielte Spektrum.

Entsprechend der für das Minimum der Ablenkung gültigen Formel:

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \quad (\text{vergl. S. 73})$$

ist die Differenz der Ablenkung für rotes und

violettes Licht und damit die Breite des Spektrums abhängig vom brechenden Winkel φ des Prismas und von der Differenz $n_v - n_r$, dem sogenannten »Dispersionsvermögen« der Prismensubstanz. Im allgemeinen wächst das Dispersionsvermögen einer Substanz zugleich mit dem Brechungsquotienten für mittlere Strahlen, doch nicht proportional, wie folgende Tabelle zeigt (n_r bezieht sich genauer auf die A-Linie, n_v auf die H-Linie):

Wasser	$n_r = 1.329$	$n_D = 1.333$	$n_v = 1.344$	$n_v - n_r = \Delta = 0.015$
Kronglas	$= 1.510$	$= 1.515$	$= 1.531$	$= 0.021$
Flintglas	$= 1.599$	$= 1.608$	$= 1.640$	$= 0.041$
Schwefelkohlenstoff	$= 1.610$	$= 1.629$	$= 1.702$	$= 0.092$

Das Dispersionsvermögen des Schwefelkohlenstoffes ist also etwa sechsmal so groß als das des Wassers und dementsprechend das Spektrum verbreitert. Durch Kombination zweier entgegengesetzter Prismen von verschiedenem brechenden Winkel φ und verschiedenem Dispersionsvermögen kann man erzielen, entweder daß für mittlere Strahlen des Spektrums die Ablenkungen δ gleich sind, so daß diese in der Kombination nicht abgelenkt werden, während für rote und violette Strahlen eine der Differenz des Dispersionsvermögens entsprechende Ablenkung (im entgegengesetzten Sinne für rot und violett) restiert (geradsichtige Prismenkombination), oder, umgekehrt, daß die Differenzen $(\delta_v - \delta_r)$ und $(\delta'_v - \delta'_r)$ in beiden Prismen gleiche Werte besitzen, während der absolute Betrag der Ablenkungen δ und δ' in beiden Prismen verschieden ist; die Kombination lenkt dann noch das Strahlenbündel ab bei aufgehobener Dispersion (achromatische Prismenkombination).

Ausführung der Versuche. 1) Dispersion in verschiedenen Prismen. Zur Beleuchtung des vertikal stehenden Spaltes verwendet man entweder paralleles Licht (bloß eine Linse im Kondensator) oder konvergentes. Im ersten Falle ist die Beleuchtung des Spaltes weniger intensiv, aber das von der Projektionslinse entworfene Spaltbild schärfer; im zweiten Falle ist bei geringerer Schärfe die Lichtintensität größer. Je nachdem daher im speziellen Falle mehr Wert auf Reinheit und Schärfe oder auf Lichtstärke des Spektrums gelegt wird, ist die eine oder andere Aufstellung vorteilhafter.

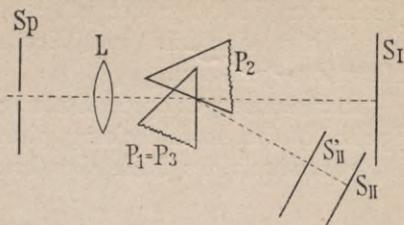
Im ersten Falle wird der Spalt dicht vor den Kondensator gestellt, so daß die Blende, in welche er eingesetzt ist, das Nebenlicht abhält, und das Prisma an jene Stelle gebracht, wo die auf die Projektionslinse ursprünglich parallel einfallenden Strahlen sich schneiden, also im Brennpunkt der Linse, damit auch mit einem Prisma kleiner Fläche das ganze Lichtbündel ausgenutzt werden kann. Im zweiten Falle stellt man den Spalt vor dem Konvergenzpunkt des Strahlenbündels an eine Stelle, wo der Durchmesser des Kegels noch etwas größer ist als die Spaltlänge, so daß die gefärbten Randstrahlen abgeblendet werden; das Prisma steht dicht hinter der Linse.

Die Entfernung des Schirmes von der Linse soll nicht zu klein sein, damit eine hinreichende Vergrößerung des Spaltbildes und damit des Spektrums erzielt wird; mit allzu starker Vergrößerung wird aber das Spektrum auch lichtschwach; für kleinere Bogenlampen ist etwa 2—3 m die günstigste Schirmdistanz. Die Umgebung ist dabei durch Schließen der Fensterläden und Ablöschen der Zimmerbeleuchtung möglichst zu verdunkeln.

Da das Spektrum eine Reihenfolge nebeneinanderliegender scharfer Spaltbilder verschiedener Farbe sein soll, muß die Linse derart aufgestellt werden, daß sie den Spalt eben an jener Stelle, wo das Spektrum entsteht, scharf abbildet. Um dies zu erreichen, verfährt man folgendermaßen:

Zunächst wird ohne Prisma auf dem zirka 2 m entfernten Schirme (S_1) ein scharfes weißes Spaltbild entworfen, also die Linse L beiläufig in die Distanz ihrer Brennweite vom Spalt gebracht. Hierauf wird das Prisma

aufgestellt und provisorisch ermittelt, in welcher Richtung das dispergierte Strahlenbündel beim Minimum der Ablenkung verläuft (Stellung P_1 des Prismas). Dem Resultate entsprechend wird dann der Schirm in die Stellung S_{II} gebracht, wobei eventuell infolge Raummangels die ursprüngliche Distanz



nicht eingehalten werden kann, sondern der Schirm näher gerückt werden muß (Stellung S'_{II}). Man erteilt nun dem Prisma eine Stellung P_2 , bei der die eine Fläche als Spiegel wirkt und wieder ein weißes Spaltbild auf den Schirm S_{II} reflektiert, an jene Stelle, wo vorher das provisorische Spektrum vorhanden war. Durch geringe Verschiebung der Linse läßt sich nun das reflektierte Spaltbild auf möglichste Schärfe einstellen, worauf das Prisma in seine ursprüngliche Stellung ($P_3 = P_1$) zurückgedreht wird. Hiermit ist die definitive Aufstellung gegeben.

Der Versuch wird der Reihe nach ausgeführt: mit einem Hohlprisma mit Wasser (geringe Ablenkung und geringe Dispersion, daher schmales Spektrum); mit diversen Glasprismen (je nach Glassorte geringere oder größere Ablenkung und Dispersion); mit einem Hohlprisma mit Schwefelkohlenstoff (Ablenkung etwas größer als beim Flintglasprisma, Dispersion aber bedeutend größer, besonders im Blau und Violett); infolge dieser starken Dispersion im kurzwelligen Teile des Spektrums, teilweise aber auch, weil Schwefelkohlenstoff nach längerem Stehen etwas gelblich wird, also die blauen und violetten Strahlen absorbiert, erscheint dieser Teil des Spektrums ziemlich lichtschwach.

2) Geradsichtige Prismenkombination. Die komplizierte Ermittlung der Scharfeinstellung entfällt hier. Das Spektrum entsteht an derselben Stelle, resp. zu beiden Seiten des direkten weißen Spaltbildes. Die brechende Kante der Prismenkombination ist dem Spalte parallel zu stellen; durch Drehung um 180° in der Fassung wird die Farbenfolge umgekehrt.

3) Achromatische Prismenkombination. Auf einem gemeinsamen Stativ sind 2 Prismen verschiedenen Materials (Kronglas und Flintglas) und verschiedenen brechenden Winkels (größer beim Kron-, kleiner beim Flintglas) angebracht, die entweder einzeln als ablenkende und dispergierende Prismen oder zusammengeklappt mit entgegengesetzt liegenden brechenden Kanten als achromatische Kombination in den Gang des Lichtbündels gestellt werden können.

Das Stativ wird in der Höhe derart reguliert, daß nur die untere Hälfte des aus der Linse tretenden Lichtbündels die Prismen passiert, das oberhalb vorbeistreichende Licht dagegen noch immer das direkte unabgelenkte weiße Spaltbild erzeugt.

Die von den beiden Prismen einzeln entworfenen Spektren sind verschieden stark abgelenkt (und zwar stärker vom Kronglasprisma, dessen

brechender Winkel größer ist), aber von gleicher Breite. Abstand vom un-abgelenkten Spaltbild und Breite des Spektrums werden mittels eines Maßstabes gemessen.

In zusammengeklappter Stellung gibt die Prismenkombination ein weißes Spaltbild, dessen Ablenkung gleich der Differenz der Einzelablenkungen ist, was mittels des Maßstabes kontrolliert wird.

35. Spektralanalyse.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensor; Spalt auf Stativ; Schirm; Projektionslinse; geradsichtiges Prisma; Schachtel mit Zn-Drahtstückchen; Pinzette; farbige Gläser; Glastrog; Kaliumbichromat-, Kupfersulfat-, Kaliumpermanganatlösung; langer Glastrog; Chlorophylllösung; Bunsenbrenner; Bromnatrium.

Theorie der Versuche. Bezüglich der Verteilung der ausgestrahlten Energie über verschiedene Wellenlängen unterscheidet man bekanntlich die Emissionsspektren selbstleuchtender Körper in kontinuierliche und in Banden- und Linienspektren. Erstere werden von glühenden festen und flüssigen Körpern sowie von glühenden Gasmassen hinreichender Dichte und Schichtdicke geliefert, letztere von glühenden Gasen und Dämpfen unter normalen Bedingungen des Leuchtens (Flammen, von elektrischen Entladungen durchsetzte Gase). Das Emissionsspektrum ist in letzterem Falle charakteristisch für die emittierende Substanz, aber von Druck und Temperatur noch abhängig; demzufolge unterscheiden sich Funken- und Bogenspektren untereinander und vom Flammenspektrum bei der gleichen Substanz. Man erwarte daher nicht bei Demonstration eines Emissionsspektrums (Bogenspektrum) mittels der Bogenlampe (vergl. Versuch 1, S. 81) genaue Übereinstimmung mit den üblichen Spektraltafeln, die die Flammenspektren abbilden.

In analoger Weise wie die Emission ist auch die Absorption des Lichtes in verschiedenen Stoffen eine verschiedene Funktion der Wellenlänge. Nimmt die Absorption von einem Ende des Spektrums gegen das andere kontinuierlich zu oder ab, so spricht man von einseitiger Absorption (z. B. bei Kaliumbichromat, Kupfersulfat etc.). Es kann aber auch innerhalb des sichtbaren Spektrums ein Maximum der Absorption liegen (Absorptionsband), resp. mehrere durch Minima getrennte Maxima (Bandenabsorptionsspektrum, z. B. bei Kaliumpermanganat, Chlorophyll u. a.).

Speziell bei glühenden Gasen ist Anstieg und Abfall des Maximums ein sehr scharfer, und zwar liegen — dem Kirchhoff'schen Gesetze von der Proportionalität des Emissionsvermögens und des Absorptionsvermögens einer Substanz bestimmter Temperatur für Strahlen bestimmter Wellenlänge entsprechend — die nun entstehenden Absorptionslinien an denselben Stellen wie die Emissionslinien des betreffenden Gases oder Dampfes (vergl. Versuch 2e, S. 83).

Die Absorption des Lichtes bestimmter Wellenlänge erfolgt entsprechend der Formel $J_{x,\lambda} = J_{0,\lambda} \cdot e^{-kx}$, wobei $J_{0,\lambda}$ die Intensität des einfallenden Lichtes, x die durchstrahlte Schichtdicke, $J_{x,\lambda}$ die Intensität des austretenden Lichtes bezeichnet; k ist dann der für die betreffende Wellenlänge geltende Koeffizient der Absorption. Je nach der Form der Funktion $k = f(\lambda)$ wechselt die Farbe eines Stoffes im durchfallenden weißen Lichte mit der Schichtdicke.

Bei einseitiger Absorption nimmt mit wachsender Schichtdicke die Sättigung der Färbung zu, zugleich mit einer Verschiebung des Farbtones gegen das weniger absorbierte Ende des Spektrums zu. So ist z. B. Kaliumbichromat in geringer Schichtdicke (resp. Konzentration) gelblichgrün, bei größerer Schichtdicke der Reihe nach gelb, orange, rot.

Bei unregelmäßiger Verteilung der Maxima der Funktion $k = f(\lambda)$ können überraschende Farbenwechsel auftreten, z. B. beim Chlorophyll, vergl. S. 83. Fingiert man einen Körper, der nur zwei Streifen A und B des Spektrums teilweise hindurchläßt, alle anderen Strahlen aber vollkommen absorbiert, und macht man weiter die Voraussetzung, daß A weniger stark als B absorbiert werde, daß aber infolge der größeren Breite des Streifens B anfänglich die Intensität dieser Lichtsorte überwiege, so berechnet sich z. B. folgende Tabelle (unter der willkürlichen Annahme, daß längs einer gewissen Schichtdicke A um 10%, B um 50% verringert werde und daß $B_0 = 4 A_0$ sei):

d = 0	A = 1000	B = 4000
1	900	2000
2	810	1000
3	729	500
4	656	250
5	590	125
6	431	62·5
7	388	31·2
8	349	15·6
9	314	7·8
10	283	3·9

Für kleine Schichtdicken überwiegt B, für mittlere werden A und B gleich, für größere überwiegt A. Sind die Lichtarten A und B zufällig komplementär, so erfolgt ein vollständiger Farbenwechsel über eine farblose Zwischenstufe bei mittlerer Schichtdicke. Analoge Erscheinungen können natürlich unter weniger einfachen Verhältnissen, als hier beispielsweise angenommen wurde, auftreten.

Ausführung der Versuche. 1) Emissionsspektrum von Zink. Die beiden Kohlen der Bogenlampe (vergl. S. 163) werden vertauscht: die positive Dochtkohle unten, die negative Homogenkohle oben eingesetzt und die Zuführung der Kabel entsprechend umgelegt. Die positive Kohle hat vorher durch vorsichtiges Ausbohren des Dochtes eine konische Vertiefung er-

halten, in welche ein kleines Stückchen Zinkdraht gelegt werden kann; der Schluß des Stromes durch Berührung der Kohlen ist durch langsames Näher- und Auseinanderschrauben herbeizuführen, damit das Zinkstückchen nicht herausgeschleudert werde. Eventuell notwendiges Neueinlegen von Zink erfolgt bei abgelöschter Lampe und Unterbrechung des Stromkreises noch an einer zweiten Stelle (Stromschlüssel), damit die Pinzette keinen Kurzschluß herstelle. Die Beobachtung des Bogens ist — wie sonst — nur durch die farbigen Fenster des Lampenkastens, nie direkt vorzunehmen wegen des blendenden Lichtes.

Während bei der Herstellung der kontinuierlichen Spektren der weißglühende Krater der positiven Kohle die Hauptlichtquelle ist, soll hier der Bogen selbst auf seine Lichtemission geprüft werden. Man zieht daher die Kohlen weiter auseinander als gewöhnlich — so weit, als es das mit zunehmender Bogenlänge auftretende unruhige Flackern zuläßt —, wählt die lichtstärkere Aufstellung mit 2 Kondensorlinsen und konvergentem Lichtkegel und stellt den Spalt so, daß er möglichst Licht vom Bogen, nicht von den Kohlenelektroden erhält; zu diesem Zwecke sucht man in der Nähe des Konvergenzpunktes auf einem Papierstreifen (mattschwarzes, nicht weißes Papier!) das Bild auf, welches das Kondensorsystem von der Lichtquelle entwirft, und bringt den Spalt an die Stelle des Bogenbildes; er wird relativ weit gemacht und die geradsichtige Prismenkombination zu Erzeugung des Spektrums verwendet. Man erhält das Bogenspektrum von Zink, eventuell überlagert über ein schwächeres kontinuierliches Spektrum des Elektrodenlichtes.

2) Absorptionsspektren. Die Herstellung des gewöhnlichen kontinuierlichen Spektrums erfolgt bei normal geschalteter Bogenlampe mit parallelem Lichte (1 Kondensorlinse) und geradsichtigem Prisma, im Interesse der Lichtstärke bei ziemlich weitem Spalte und bei gut verdunkeltem Zimmer.

a) Zwischen Spalt und Linse wird ein parallelepipedischer Glastrog gestellt und mit Kupfersulfatlösung gefüllt; es zeigt sich einseitige Absorption des roten Endes.

b) Trog mit Kaliumbichromatlösung; analog einseitige Absorption des blauen Endes.

c) Trog mit Kaliumpermanganatlösung; man setzt die konzentrierte Lösung der Wasserfüllung des Troges tropfenweise zu, rührt mit einem Glasstäbchen; es taucht zunächst der stärkste Absorptionsstreifen auf, dann mehrere (günstigsten Falles 6) durch hellere Zwischenräume geschiedene Streifen in Grün, bis bei wachsender Konzentration die Absorptionsstreifen sich zu einem breiten schwarzen Bande vereinigen.

c) Verschiedenfarbige Glasplatten ergeben verschiedene Arten des Absorptionsspektrums; rotes Glas (Rubinglas) läßt tatsächlich nur einen Streifen roten Lichtes hindurch, ist daher als Farbenfilter für physikalisch angenähert homogenes Licht brauchbar; gelbe und grüne Gläser lassen die der subjektiv wahrgenommenen Farbe benachbarten Teile des Spektrums

(rot und grün resp. gelb und blau) in merklicher Intensität hindurch; blaues Glas (Kobaltglas) liefert ein Bandenspektrum; neben Blau und Violett wird noch ein Streifen im Rot hindurchgelassen.

d) Alkoholische Chlorophylllösung wird in einen Trog mit langgestreckter rechteckiger Basis gefüllt; in der direkten Durchsicht gegen eine weiße Lichtquelle (Glühlampe) erscheint die Lösung grün durch die kleinere, rot durch die größere Schichtdicke betrachtet; bei mittlerer Schichtdicke (nach Eingießen in ein Standglas bei vertikaler Durchsicht durch Ausprobieren zu ermitteln) tritt als Übergangsfarbe ein schmutziges Olivgrün auf.

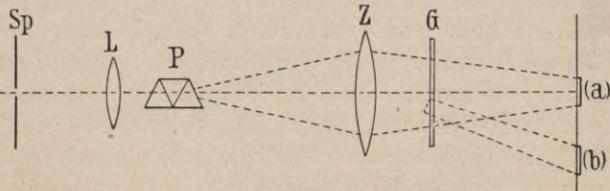
e) Umkehrung der Natriumlinie. Unter Anwendung parallelen Lichtes zur Spaltbeleuchtung und bei engem Spalte wird mittels der geradsichtigen Prismenkombination ein kontinuierliches Spektrum erzeugt; zwischen Spalt und Linse stellt man einen Bunsen- resp. Teclubrenner in solcher Höhe auf, daß das aus dem Spalt austretende Licht die Flamme oberhalb der Spitze des grünlich leuchtenden Kegels passiert; die Flamme wird durch Steigerung der Luftzufuhr in jenes Stadium gebracht, wo sie — nahe am Durchschlagen — lebhaft rauscht und ihre höchste Temperatur erreicht; die Flammenfärbung erfolgt mit Bromnatrium (statt Chlornatrium) in möglichst intensiver Weise, indem man das Salz mit Wasser zu einem dicken Brei mischt und ein etwa erbsengroßes Stück hiervon mittels eines eisernen Löffelchens gerade in die Spitze des inneren grünlichen Flammenkegels (also etwas unterhalb der Stelle, wo das weiße Licht hindurchgeht) bringt. Man erhält im Spektrum eine dunkle Linie an jener Stelle, die der D-Linie des Sonnenspektrums resp. der Emissionslinie des Natriumflammspektrums entspricht.

36. Wiedervereinigung der Spektralfarben zu Weiß; Komplementärfarben.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; Spalt; Projektionslinse; Schirm; geradsichtiges Prisma; Stativ mit Zylinderlinse und Glaskeil.

Ausführung des Versuches. Man stellt zunächst mittels Spalts (Sp), Linse (L) und geradsichtigen Prismas (P) ein Spektrum in der früher beschriebenen Weise her.

Zwischen Prisma und Schirm bringt man eine Zylinderlinse (Z) mit vertikaler Zylinderachse und reguliert ihre Entfernung derart, daß auf dem Schirme statt des Spektrums ein breiter weißer Streifen (a) mit möglichst ungefärbten Rändern entsteht. Auf demselben Stativ wie die Zylinderlinse be-



findet sich, an einem gelenkigen Arm beweglich, eine Glasplatte G, auf die ein schmaler Glaskeil aufgekittet ist.

Einige cm hinter der Zylinderlinse, wo die durch das Prisma dispergierten Spektralfarben noch getrennt voneinander sind, führt man die Glasplatte mit dem Keil durch das Lichtbündel hindurch. Die jeweils auf den Keil auffallende Spektralfarbe wird durch diesen abgelenkt und bildet auf dem Schirm einen Streifen b, der angenähert homogen gefärbt ist, entsprechend dem aufgefangenen Spektralbezirke. Der ursprünglich weiße Streifen a enthält nun alle übrigen Spektralfarben und liefert eine Mischfarbe, die zu der des Streifens b gerade komplementär ist. Indem man den Glaskeil allmählich durch das Spektrum hindurchführt, erhält man also die Farbenpaare: rot-blaugrün, orange-blau, gelb-violett, grün-purpur, blau-orange, violett-gelb.

37. Addition und Subtraktion von Farben.

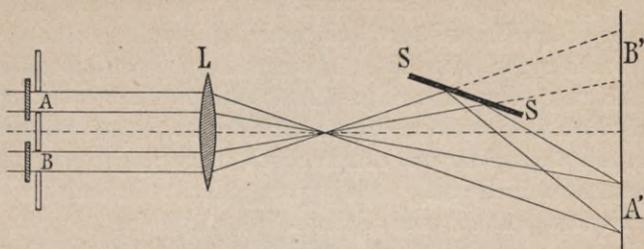
Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; Blende mit 2 Öffnungen; Projektionslinse; Schirm; farbige Glasplatten.

Theorie der Versuche. Geht weißes Licht durch einen durchsichtigen Körper A, so ist das austretende Licht dessen Absorptionsspektrum entsprechend gefärbt. Werden zwei Bündel weißen Lichtes durch je einen Körper A resp. B geschickt und dann zur Beleuchtung eines gemeinsamen Feldes verwendet, so addieren sich die von A und von B durchgelassenen Farben zu einer entsprechenden Mischfarbe. Werden dagegen die beiden Körper A und B hintereinander in den Gang desselben weißen Lichtbündels gestellt, so gehen nur jene Strahlen hindurch, für welche beide Körper zugleich durchlässig sind; es findet also gewissermaßen durch das Farbenfilter B eine Subtraktion von den Strahlen statt, welche A durchdrungen haben.

Derartige Farbensubtraktionen finden im allgemeinen bei der Mischung zweier Pigmente statt, so daß Pigmentmischung von eigentlicher Farbmischung zu unterscheiden ist. Vermöge des Umstandes, daß die meisten gelben Körper neben Gelb auch Rot und Grün, die meisten blauen noch Violett und Grün durchlassen, erklärt es sich, daß die Pigmentmischung von Gelb und Blau im allgemeinen Grün gibt, während die Mischfarbe von Gelb und Blau entweder Weiß oder Blaugrün oder Blauviolett ist, je nachdem exakt komplementäre Nuancen oder etwas davon abweichende gemischt werden.

Ausführung des Versuches. Eine Blende, die mit 2 kreisförmigen Löchern A und B versehen ist, wird mittels des Kondensators mit parallelem Lichte beleuchtet; eine Projektionslinse L entwirft auf einem entfernten Schirme zwei scharfe (umgekehrt liegende) Bilder A' und B' dieser Öffnungen. Durch Vorsetzen zweier verschieden gefärbter Glasplatten werden dann auch diese Bilder entsprechend gefärbt. Mittels eines Spiegels S, der

in den Weg des einen Strahlenbündels gehalten wird, kann man die beiden Bilder zur Deckung bringen, wobei die der Farbenaddition entsprechende Mischfarbe auftritt.



Indem man dieselben beiden Gläser aufeinanderlegt und gegen eine helle weiße Fläche blickt, erhält man die Subtraktionsfarbe. (Für die objektive Darstellung durch Projektion ist das Bild gewöhnlich zu lichtschwach.)

a) Rotes und grünes Glas gibt als Additionsfarbe ein weißliches Gelb, als Subtraktionsfarbe nahezu Schwarz, da nur wenige Strahlen von beiden gemeinsam durchgelassen werden.

b) Blaues und orangefarbenes Glas; die Additionsfarbe ist bei der verwendeten Kombination Lila, die Subtraktionsfarbe dagegen Grün.

38. Fluoreszenz und Phosphoreszenz.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; Uranglas; Fluoreszeinlösung konzentriert und verdünnt; ätherische Lösung von Chlorophyll; Aesculin; Magdalarot; Chininsulfat; Petroleum; Mensur für 500 cm³; ditto für 5 cm³; farbige Gläser; Trog; Kupferoxydammoniak; Projektionslinse; Spalt; Quarzprisma; Bariumplatinocyanür-Schirm; Balmain'sche Leuchtfarbe; Kollektion phosphoreszierender Substanzen; Sidotblende-Schirm.

Zur Theorie der Versuche. Die durch Licht hervorgerufene Fluoreszenz besteht in der Umwandlung der absorbierten Lichtenergie in die Energie einer vom fluoreszierenden Körper diffus emittierten Strahlung, deren Wellenlänge von der auffallenden im allgemeinen abweicht; es ist also zu unterscheiden das fluoreszenzerregende Licht und das Fluoreszenzlicht selbst.

Im allgemeinen wirken die kurzwelligeren Strahlen stärker erregend als die langwelligeren, doch ist die obere Grenze der Wellenlänge noch wirksamen Lichtes und die Wellenlänge maximaler Wirksamkeit bei den einzelnen fluoreszierenden Substanzen verschieden. Mit geeigneten Stoffen können daher auch die unsichtbaren ultravioletten Strahlen nachgewiesen werden (vergl. Versuch 4).

Das Fluoreszenzlicht selbst besitzt in den meisten Fällen größere Wellenlänge als das erregende Licht (Stokes'sche Regel, von der aber durch Lommel auch Ausnahmen nachgewiesen wurden).

Infolge der Verschiedenheit der Wellenlänge des erregenden und des Fluoreszenzlichtes ist es bei Fluoreszenzerscheinungen nicht mehr gleich-

gültig, an welcher Stelle zwischen Lichtquelle und Auge ein absorbierender Körper (»Farbenfilter«) eingeschaltet wird. Während bei allen Farbenerscheinungen, die durch Absorption, Dispersion oder Interferenz (dünne Blättchen, Beugungsringe und -spektren, Farben in doppeltbrechenden oder die Polarisationssebene drehenden Körpern) entstehen, das Farbenfilter seinem Absorptionsspektrum entsprechend unabhängig von seiner Stellung (z. B. zwischen Lichtquelle und Spalt, oder zwischen Spalt und Prisma, oder zwischen Prisma und Schirm, oder zwischen Schirm und Auge) gewisse Strahlen ausscheidet oder schwächt, wirkt bei der Fluoreszenz das Farbenfilter verschieden, je nachdem es zwischen Lichtquelle und fluoreszierendem Körper auf die erregende Strahlung oder zwischen Körper und Auge auf das Fluoreszenzlicht absorbierend wirkt. Unter Umständen kann das Farbenfilter die erregenden Strahlen vollkommen abschneiden, das Fluoreszenzlicht aber ungehindert hindurchlassen oder umgekehrt (vergl. Versuch 3).

Da das Fluoreszenzlicht auf Kosten der absorbierten Energie des einfallenden erregenden Lichtes entsteht, schneidet jede fluoreszierende Substanz in hinreichender Schichtdicke die sie selbst zur Fluoreszenz erregenden Strahlen ab und wird daher in einem sie durchsetzenden Bündel weißen Lichtes nur längs einer gewissen Strecke leuchtend.

Während die Emission des Fluoreszenzlichtes zugleich mit dem Aufhören der erregenden Belichtung erlischt, überdauert die nahe verwandte Erscheinung der Phosphoreszenz die erregende Belichtung mehr oder weniger lange.

Phosphoreszenzerregend wirken ebenfalls hauptsächlich die kurzwelligen Strahlen; die Geschwindigkeit, mit der das erregte Phosphoreszenzlicht abnimmt, hängt ab vom physikalischen Zustande des betreffenden Körpers (z. B. der Temperatur) und kann durch Bestrahlung verändert werden. Rote und ultrarote Strahlen, auf eine bereits vorbelichtete und daher phosphoreszierende Substanz auftreffend, erhöhen vorübergehend die Intensität des Prozesses, bei dem die während der erregenden Belichtung gewissermaßen aufgespeicherte Energie in Phosphoreszenzlicht umgewandelt wird, so daß nach Aufhören der langwelligen Belichtung die von ihr getroffenen Partien dunkler erscheinen als die vor ihr geschützten (vergl. Versuch 6).

Ausführung der Versuche. 1) Fluoreszenz verschiedener Substanzen in weißem Lichte. Mittels der Bogenlampe und beider Kondensorlinsen wird im verdunkelten Zimmer ein konvergentes Strahlenbündel erzeugt; nahe dem Brennpunkte werden die verschiedenen Substanzen aufgestellt, so daß der kegelförmige intensiv durchstrahlte Teil von der Seite her in der Farbe des Fluoreszenzlichtes gesehen wird. Auf diese Weise wird ein Uranglaswürfel, eine verdünnte Lösung von Chininsulfat, gewöhnliches Petroleum, Magdalarot, Fluoreszeinlösung in starker und in geringer Konzentration, ätherische Chlorophylllösung und eine Aesculinlösung untersucht und die Farbe des Fluoreszenzlichtes mit der Farbe des durchfallenden Lichtes verglichen.

Es ergibt sich:

Substanz:	Absorptionsfarbe:	Fluoreszenzlicht:
Uranglas	gelb	grün
Chlorophyll	grün	rot
Magdalarot	rot	braungelb
Fluoreszein, verdünnt	gelbgrün	grün
„ konzentriert	braunrot	„
Aesculin	wasserhell (bräunlich)	blau
Chininsulfat	wasserhell	„
Petroleum	gelblich	violett

Bei den wenig absorbierenden, daher ungefärbten oder schwachgefärbten Flüssigkeiten (Chininsulfat, Aesculin, verdünnte Fluoreszeinlösung) erfolgt die Fluoreszenzerregung längs des ganzen durchstrahlten Lichtkegels, bei den stark absorbierenden Körpern (Magdalarot, konzentrierte Fluoreszeinlösung) nur in der Oberflächenschicht.

Die Aesculinlösung ist eventuell herzustellen durch Auslaugen von Roßkastanienrinde in Wasser, die Chlorophylllösung durch Extrahieren von Pfefferminztee in Äthyläther mit nachfolgendem Filtrieren.

2) Fluoreszenzerregung in gefärbtem Lichte. Das weiße Licht der Bogenlampe wird gefärbt, indem man entsprechende Farbenfilter (rotes, gelbes, grünes, blaues Glas, Trog mit Kupferoxydammoniak) vor den Kondensator stellt. Rotes Licht erregt an keiner der oben verwendeten Substanzen Fluoreszenz, gelbes und grünes Licht an einigen (Chlorophyll, Magdalarot), blaues Licht an allen.

3) Einfluß der Stellung des Farbenfilters. Rotes Glas, zwischen Lichtquelle und Chlorophyll gebracht, schneidet die fluoreszenzerregenden Strahlen ab, läßt dagegen — zwischen Substanz und Auge gebracht — das rote Fluoreszenzlicht hindurchgehen. Umgekehrt schneidet Kupferoxydammoniak das grüne Fluoreszenzlicht des Fluoreszeins und das braungelbe des Magdalarots ab, läßt aber die erregenden Strahlen passieren.

4) Nachweis ultraviolettten Lichtes durch Fluoreszenz. In der auf S. 78 beschriebenen Weise wird ein möglichst lichtstarkes Spektrum mittels eines Quarzprismas erzeugt. An jene Stelle des Schirmes, auf der das Spektrum erscheint, hält man einen mit Bariumplatinocyanür überzogenen Schirm. Der blaue und der violette Teil des Spektrums erregt grüne Fluoreszenz, aber auch jenseits des — auf dem weißen Papierschirme erkennbaren — violetten Endes ist das durch die ultraviolettten Strahlen erregte Fluoreszenzlicht merklich.

5) Verdünnung einer Fluoreszeinlösung. Zum Nachweis, daß sehr geringe Mengen einer fluoreszierenden Substanz in einer Lösung eben durch ihre Fluoreszenz noch zu konstatieren sind (auch als Versuch zur Demonstration der Teilbarkeit der Materie anwendbar), verringert man sukzessive die Konzentration einer ursprünglich stark konzentrierten (braunroten)

Fluoreszeinlösung. Eventuell wird diese hergestellt durch Lösung des festen Fluoreszeins ($C_{20}H_{12}O_5$), das ein gelbbraunes Pulver ist. Da es in reinem Wasser wenig löslich ist, verwendet man als Lösungsmittel verdünnte Kalilauge, in welcher sich beträchtliche Mengen leicht lösen. Durch Wägung der gelösten Fluoreszeinmenge und Volumbestimmung der Lösung in einem kubizierten Gefäße kann man die Konzentration c_0 der Ausgangslösung L_0 in $\frac{g}{cm^3} = \frac{mg}{mm^3}$ bestimmen.

Aus der Lösung L_0 wird mittels einer kleinen Mensur zunächst 1 cm^3 entnommen und in einer größeren Mensur durch Zugießen von Wasser auf 100 cm^3 verdünnt; die so entstehende Lösung L_1 hat also eine Konzentration $c_1 = c_0 \cdot 10^{-2}$. Nachdem die kleine Mensur, welche zuerst die konzentrierte Lösung enthielt, gründlich ausgespült wurde, entnimmt man mit ihr 5 cm^3 der Lösung L_1 und verdünnt sie in der hierauf entleerten und gleichfalls gut ausgespülten größeren Mensur auf 500 cm^3 ; man erhält eine Lösung L_2 mit der Konzentration $c_2 = c_0 \cdot 10^{-4}$.

In ganz analoger Weise verdünnt man noch zweimal auf das 10-fache Volum und erhält so die Lösungen L_3 und L_4 mit den Konzentrationen $c_3 = c_0 \cdot 10^{-5}$ und $c_4 = c_0 \cdot 10^{-6}$. Endlich wird L_4 auf die Hälfte verdünnt ($c_5 = c_0 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$). Jede der Lösungen wird in konvergentem weißem Lichtkegel der Bogenlampe auf Fluoreszenz geprüft; bei der Lösung L_4 — auf ein Milliontel der Ausgangslösung verdünnt — ist das grüne Fluoreszenzlicht noch erkennbar.

6) Phosphoreszenz einiger Stoffe. Ein Rahmen enthält 7 nebeneinanderliegende zugeschmolzene Glasröhren, die verschiedene phosphoreszierende Stoffe (diverse Metallsulfide) enthalten. Die Exposition (etwa 20 sec lang) erfolgt am besten bei abgenommenem Kondensator im direkten Licht des Kohlenbogens. Sind mehrere Personen an der Ausführung des Versuches beteiligt, so wird zweckmäßig bei der Exposition gewechselt, da die hierbei unvermeidliche Blendung die Lichtempfindlichkeit des Auges für einige Minuten herabsetzt. Die Beobachtung der Phosphoreszenz erfolgt in einem gut verdunkelten Zimmer (Dunkelkammer), event. im Experimentierraum selbst nach abgelöschter Bogenlampe. Mehrere Minuten langes Ausruhen in dunklem Raume erhöht die Lichtempfindlichkeit des Auges bedeutend.

In analoger Weise ist die Phosphoreszenz einer vorbelichteten Platte zu beobachten, die mit sogenannter »Balmain'scher Leuchtfarbe« (Schwefelcalcium mit Bindemittel) bestrichen ist, oder auch eines mit Sidotblende (Zinksulfid) bestrichenen Schirmes.

Bei einem zweiten Versuche wird der phosphoreszierende Schirm erst wie vorher in weißem Lichte vorbelichtet; hierauf werden beide Kondensoren und eine rote Glasplatte vor die Lampe gestellt und der Schirm so gehalten, daß in seiner Mitte ein Kreis von wenigen cm Durchmesser intensiv rot beleuchtet wird. Im Dunkelraum sieht man dann den vorher rot beleuchteten Kreis dunkler in der normal phosphoreszierenden übrigen Fläche.

39. Interferenzfarben dünner Platten.

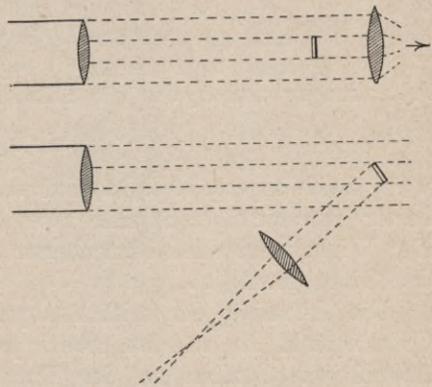
Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensor; Projektionslinse; Schirm; Drahtling mit Stiel; Stativ; Kuvette; Seifenlösung; Newton'sches Farbenglas auf Stativ.

Theorie der Versuche. Da die Darstellung der Theorie der Interferenzerscheinungen an planparallelen Platten hier zu weit führen würde, sei auf das entsprechende Kapitel in jedem größeren Lehrbuche der Physik verwiesen (z. B. Müller-Pouillet, Band II, S. 896).

Ausführung der Versuche. a) Seifenlamelle. Eine Kuvette wird einige mm hoch mit Seifenlösung gefüllt und ein gestielter kreisförmiger Drahtling von etwa 5 cm Durchmesser eingetaucht, so daß eine Seifenlamelle entsteht. Der Stiel wird derart in ein Stativ geklemmt, daß die Lamelle in einer vertikalen Ebene steht. Durch die Schwere nimmt sie eine schwach keilförmige Gestalt an und ist oben am dünnsten, unten am dicksten.

Wird die Lamelle mit dem aus dem Kondensor austretenden Parallelstrahlenbündel beleuchtet und durch eine hinter der Lamelle aufgestellte Projektionslinse ein Bild des Drahtringes auf den Schirm projiziert, so erhält man zugleich die Interferenzstreifen des durchfallenden Lichtes; doch ist bei dieser Anordnung der Kontrast zwischen den einzelnen Streifen wenig ausgeprägt.

Viel deutlicher ist die auf Auslöschung bestimmter Strahlen durch Interferenz beruhende, von der Dicke abhängige Färbung der Streifen im reflektierten Lichte zu beobachten. Die Lamelle wird gegen das einfallende Licht etwas gedreht, so daß sie es gegen den neben der Bogenlampe aufgestellten Schirm reflektiert, und in analoger Weise wie früher mittels der Linse abgebildet. Da das Bild ein umgekehrtes ist, erscheinen die den oberen dünnsten Schichten entsprechenden Farben unten, die den unteren dickeren Schichten entsprechenden blassen, abwechselnd rot und grün gefärbten Streifen oben. Beobachtet man das Projektionsbild durch rotes Glas, so sieht man nur abwechselnd helle und dunkle Streifen.



b) Newtons Farbenglas. Eine plankonvexe Linse sehr schwacher Krümmung ist mit der konvexen Fläche gegen eine planparallele Glasplatte gelegt, so daß die Dicke der zwischen ihnen befindlichen Luftschicht in der Mitte den Wert Null hat und gegen den Rand zunimmt. Linse und Platte sind in einer gemeinsamen Fassung montiert; drei Stellschrauben gestatten eine Einstellung des Berührungspunktes in die Mitte der Kreisfläche; bei

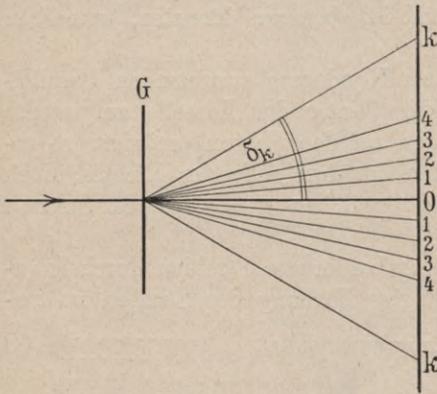
zu starkem Anziehen dieser Schrauben wird die Linse deformiert, und es entsteht eine unregelmäßig geformte Fläche, längs welcher sich Linse und Platte berühren.

Die Aufstellung des Newton'schen Farbglases ist analog der bei der Seifenlamelle; die ringförmigen Interferenzstreifen sind wieder im durchgelassenen und im reflektierten Lichte komplementär zueinander und im zweiten Falle deutlicher sichtbar.

40. Gitterspektren.

Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; Spalt; Projektionslinse; Schirm; 3 Beugungsgitter.

Theorie des Versuches. Fällt ein paralleles Lichtbündel homogener Strahlen der Wellenlänge λ (in der Figur durch einen einzigen Strahl repräsentiert) auf ein Gitter G, d. i. eine Platte, in der äquidistante durchsichtige Streifen — durch undurchsichtige Zwischenräume getrennt — senkrecht zur Zeichenebene angeordnet sind, so findet außer in der direkten Fortsetzung des einfallenden Bündels (No. 0) auch in den Richtungen, die durch die Strahlen No. 1, 2, 3 angedeutet sind, eine durch die Interferenz der Elementarwellen zu einem relativen Maximum gesteigerte Lichtfortpflanzung statt. Der



Ablenkungswinkel δ_k des k^{ten} Bündels ist gegeben durch:

$$\sin \delta_k = k \frac{\lambda}{d}$$

wenn d die sogenannte »Gitterkonstante«, d. i. der Abstand zweier benachbarter durchsichtiger Streifen (von Mitte zu Mitte gerechnet), bezeichnet. Der Winkelunterschied benachbarter Bündel ist also um so größer, je enger das Gitter geteilt ist.

Die Intensität der seitlich abgelenkten Bündel nimmt mit steigender Ordnungszahl ab und ist *ceteris paribus* um so größer, eine je größere Anzahl von Spalten an der Erzeugung der Interferenzerscheinung beteiligt ist.

Wird statt homogenen Lichtes weißes angewandt, so entspricht jedem Bündel ein Spektrum, dessen violettes Ende dem mittleren weißen Bündel zugewendet ist, und in dem die Winkelablenkung (genauer der Sinus) der Wellenlänge proportional ist (Gitterspektrum). Die Breite des Spektrums ist umgekehrt proportional der Gitterkonstante und wächst proportional der Ordnungszahl. Da die Wellenlängen des äußersten Rot und Violett an-

genähert im Verhältnis 2:1 stehen (genauer $760 \mu\mu : 400 \mu\mu$), beginnt das Violett des Spektrums zweiter Ordnung schon bald nach dem Rot des Spektrums erster Ordnung; das Spektrum dritter Ordnung fällt bereits mit seiner kurzwelligen Hälfte über die langwellige Hälfte des Spektrums zweiter Ordnung.

Ausführung der Versuche. Der Spalt wird im konvergenten Lichtkegel des Kondensors möglichst intensiv beleuchtet und für Demonstrationszwecke im Interesse der Lichtstärke ziemlich breit (etwa 1 bis 2 mm) gestellt. Eine Projektionslinse entwirft ein scharfes Bild des Spaltes auf einem zirka 2 m entfernten Schirme. Das Gitter wird unmittelbar hinter die Linse gestellt, und zwar so, daß die Fläche senkrecht zum einfallenden Lichte, die Gitterteilung parallel zum Spalte ist. Falls die Gitterteilung mit freiem Auge nicht sichtbar sein sollte, erkennt man die Richtung der Gitterstriche aus der Lage der spektral gefärbten Streifen, die man sieht, wenn man das Gitter vor das Auge hält und gegen eine entfernte Lampe oder dergl. blickt.

a) Glasgitter, Konstante $d = 0.1 \text{ mm}$; auf einer Glasplatte sind in Distanzen von 0.1 mm parallele Striche geritzt wie bei einer Teilung; das unverletzte Glas zwischen je zwei Strichen stellt die durchsichtige Spalte dar. Aus: $\sin \delta_k = k \frac{\lambda}{d}$ berechnet sich der Abstand des mittleren Teiles (Grün) des ersten Spektrums vom unabgelenkten Spaltbild bei 2 m Schirmdistanz zu 1 cm (für $\lambda = 500 \mu\mu$). Da die Breite des Spaltbildes im Verhältnis zur Breite des Spektrums nicht klein ist, erhält man kein eigentliches Spektrum, sondern farbige Streifen.

b) Glasgitter, $d = 0.02 \text{ mm}$; die Dispersion ist gegenüber dem früheren Versuche verfünffacht. Das Übereinanderfallen der Spektren höherer Ordnung wird erkennbar.

c) Zelluloidgitter (Zelluloidhäutchen zwischen Glasplatten); eine mechanisch hergestellte Kopie eines Rowland'schen Originalgitters (auf Spiegelmetall geritzte Teilung) besitzt dieses Gitter 15000 Linien pro englischen Zoll, die Gitterkonstante beträgt daher $d = \frac{25.4 \text{ mm}}{15000} = 1.693 \mu$

Das Spektrum erster Ordnung ist von derselben Größe wie ein mittels Prismas erzeugtes, unterscheidet sich aber von einem solchen dadurch, daß die relative Breite der verschiedenen Farben geändert ist, indem der blaue Teil gegenüber dem Prismaspektrum bedeutend verschmälert ist.

Aus der bekannten Gitterkonstante, der mit Bandmaß genauer zu bestimmenden Distanz Schirm — Gitter und dem Abstand vom mittleren weißen Spaltbild, kann der Größenordnung nach die Wellenlänge der verschiedenen Spektralfarben berechnet werden (das im projizierten Spektrum sichtbare äußerste Rot hat beträchtlich kürzere Wellenlänge als $760 \mu\mu$, welcher Wert die Grenze bei subjektiver Beobachtung lichtstarker Spektren ist).

41. Doppelbrechung und Polarisation.

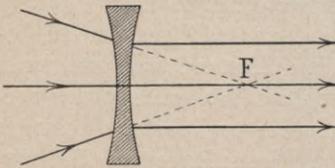
Instrumentarium: Bogenlampe mit Kondensator; Trog mit Kühlwasser; optische Bank mit 6 Schlittenaufsätzen und 2 Nikolträgern; Zerstreuungslinse; Projektionskopf; 2 Blenden (No. 3); Kalkspat in Fassung; 2 Nikols; 2 Glimmerplättchen; 2 Gipsfiguren; gekühlte Gläser; Glaswürfel in Presse; diverse Quarzplatten (senkrecht zur optischen Achse); rotes Glas; Flasche mit Zuckerlösung.

Beschreibung des Apparates. Auf zwei Holzfüßen sind zwei horizontale Schienen befestigt, längs derer sechs mit Nummern versehene Schlitten verschoben werden können, die dann an gewünschter Stelle durch Vorreiber fixiert werden. Diese Schlitten tragen vertikale, oben geschlitzte und mit Gewinde versehene Röhren, in welche die Stiele der einzusetzenden Objekte (Linsen, Blenden, Nikolträger etc.) genau passen; durch Herabdrehen der ringförmigen Schraubenmutter, die das obere Ende der Stativröhren umfaßt, können die Objekte in beliebiger Höhe fixiert werden.

Aus dem für zahlreiche optische Versuche bestimmten Zubehör zur optischen Bank werden die sub »Instrumentarium« genannten Nebenapparate ausgewählt. Statt einer einfachen Projektionslinse wird ein aus zwei auf gemeinsamem Stativ montierten Sammellinsen zusammengesetzter »Projektionskopf« verwendet, der nahezu achromatische Bilder liefert.

Ausführung und Theorie der Versuche. 1) Aufstellung und Justierung des Strahlenganges. Mittels des Kondensators der Bogenlampe erzeugt man zunächst ein konvergentes Strahlenbündel. Da die Nikols (im Werte von 100 bis 150 Mark pro Stück) durch stärkere Erwärmung leiden würden, ist es unerlässlich, hinter die Kondensorenlinse noch einen Trog mit Wasser zu stellen, der die dunklen Wärmestrahlen absorbiert. Dieses konvergente Lichtbündel wird mittels der in Schlitten No. 1 gestellten Zerstreuungslinse in ein Parallelstrahlenbündel umgewandelt. Diese kompliziertere Art der Herstellung paralleler Strahlen (statt der Verwendung bloß einer Kondensorenlinse) wird behufs Steigerung der Lichtintensität gewählt; der gesamte den Kondensator passierende Lichtstrom wird über den Querschnitt des aus der Zerstreuungslinse austretenden Bündels verteilt, der nur wenig größer als die Öffnung der auffangenden Apparate ist, so daß fast das ganze Licht wirklich ausgenutzt wird.

Die Umwandlung in parallele Strahlen wird erzielt, wenn der Brennpunkt der Zerstreuungslinse mit dem Konvergenzpunkt des einfallenden Bündels zusammenfällt, ist also durch horizontales Verschieben des Schlittens No. 1 mit der Zerstreuungslinse stets zu erreichen. Indem man den Öffnungswinkel des einfallenden Lichtkegels durch Verschieben der 1. Kondensorenlinse größer oder kleiner macht, kann der Querschnitt des austretenden Parallelstrahlenbündels ebenfalls ver-

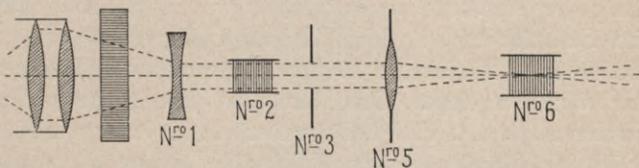


größert oder verkleinert und damit auf die gewünschte Größe gebracht werden.

Im Interesse der raschen und exakten Ausführung der folgenden Versuche soll von vornherein die Justierung eine sorgfältige sein, so daß das zu benutzende Strahlenbündel wirklich paralleles Licht gibt sowie horizontal und ohne seitliche Abweichung von der Längsachse der optischen Bank ist.

Bei vorläufig leer gelassenem Schlitten No. 2 wird in No. 3 eine Blende mit kreisförmiger Öffnung eingesetzt, die ins Zentrum des Parallelstrahlenbündels eingestellt wird. Der Projektionskopf im Schlitten No. 5 entwirft dann ein scharfes und gleichmäßig erhelltes Bild der Öffnung auf einem zirka 2 m entfernten Schirme.

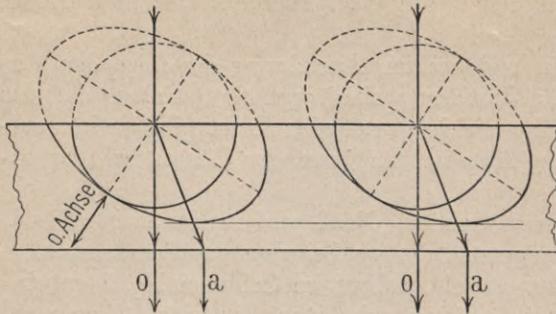
Schlitten No. 4 kann vorläufig weggelassen werden. Der Projektionskopf ist in der Höhe richtig zu stellen, so daß die Achse des Strahlenbündels noch horizontal bleibt. Die Stelle, wo das durch den Projektionskopf zunächst konvergent gemachte Bündel seinen kleinsten Querschnitt erreicht (im Brennpunkte des Projektionskopfes), soll noch für einen in Schlitten No. 6 einzusetzenden Apparat zugänglich sein; es ist also Nr. 1 ganz an den Anfang der optischen Bank zu schieben.



2) Doppelbrechung in Kalkspat. In Schlitten No. 6 wird eine mit Fassung versehene Kalkspatplatte eingesetzt, derart, daß sie das ganze Lichtbündel auffängt. An Stelle des einfachen Bündels der Blendenöffnung erhält man jetzt zwei Bilder, eines an derselben Stelle wie früher im unpolarisierten Lichte, nur lichtschwächer, dem ordentlichen Strahle entsprechend, und ein seitlich abgelenktes, an den Rändern durch Dispersion im Kalkspat gefärbtes Bild, dem außerordentlichen Strahle entsprechend.

Wird die Kalkspatplatte in ihrer Fassung um die Richtung der einfallenden Strahlen als Achse gedreht, so bleibt das ordentliche Bild an seiner Stelle (bis auf kleine Verschiebungen, die auf nicht ganz exakter Zentrierung beruhen), während das abgelenkte außerordentliche Bild um das ordentliche einen Kreis beschreibt. Die Intensität der beiden Bilder bleibt bei der Drehung konstant.

Theorie des Versuches. Die optische Achse (kristallographische Hauptachse) des Kalkspatstückes bildet mit der normalen der beiden Flächen einen Winkel; die durch das Einfallslot und die Achse definierte Ebene heißt der »Hauptschnitt« und ist in der Figur zur Zeichenebene gewählt. Die Konstruktion der Wellenflächen bzw. Strahlen für das ordentliche und das außerordentliche Bündel erfolgt nach dem Huyghens'schen Prinzip der einhüllenden Wellenfläche. Die Wellenfläche der Elementarwellen ist für o eine Kugel, für a ein (in sogenannten »negativen« Kri-



stallen wie Kalkspat) abgeplattetes Rotationsellipsoid, dessen Rotationsachse mit der optischen Achse zusammenfällt. Bei senkrechter Inzidenz ergibt sich die gezeichnete Ablenkung des Bündels. Wäre die optische Achse senkrecht oder parallel zu den Flächen der Platte, so würde

bei senkrechter Inzidenz (im ersten Falle auch bei beliebig schiefer Inzidenz) keine Doppelbrechung entstehen. Mit der Drehung der Platte um ihre Normale beschreibt a eine Kegel- bzw. nach Austritt eine Zylinderfläche. Die durch die Achsen des a - und des o -Bündels gelegte Ebene gibt den Hauptschnitt an.

3) Doppelbrechung linear polarisierten Lichtes. Die Aufstellung der Apparate bleibt dieselbe wie im vorigen Versuche, nur wird noch im Schlitten No. 2 der Nikolträger eingesetzt und ein in einer Fassung befindliches Nikol'sches Prisma (sogenanntes polarisierendes Nikol oder Polarisor) aufgelegt. Das Nikol'sche Prisma ist in der Höhe sorgfältig zu justieren, derart, daß bei vorübergehend herausgenommenem Kalkspat das Bild der Blendenöffnung gleichmäßig erleuchtet erscheint. Nach Wiedereinsetzen des Kalkspates erhält man wie früher zwei Bilder o und a , die aber im allgemeinen von ungleicher Helligkeit sind.

a) Wird der Kalkspat um die Lichtstrahlen als Achse gedreht, so wandert wie früher das a -Bild im Kreise um das o -Bild, während die Helligkeit beider periodisch zwischen Null und einem Maximum wechselt. Geht man von der Stellung aus, wo o maximale Intensität hat, a verschwunden ist, so nimmt beim Drehen die Intensität des ersten ab, die des zweiten zu, bis bei 90° Drehung o verschwunden und a von maximaler Helligkeit ist. Nach Drehung um 180° sind dieselben Verhältnisse wie bei 0° hergestellt.

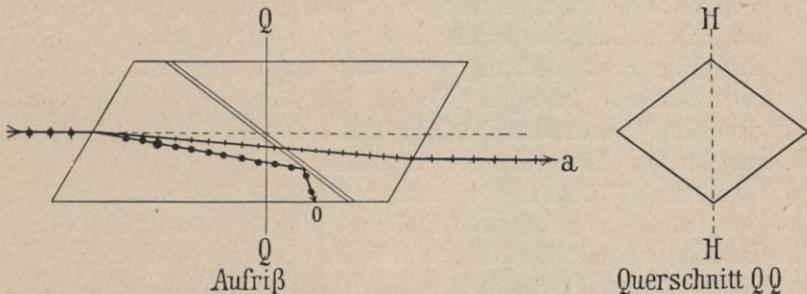
b) Wird bei ruhender Kalkspatplatte das Nikol'sche Prisma um seine Längsachse gedreht, so erfolgt ein analoger Helligkeitswechsel an den ruhenden Bildern von o und a .

Theorie des Versuches. Die durch Doppelbrechung entstehenden beiden Lichtbündel sind linear polarisiert, d. h. die Schwingungen erfolgen in jedem in einer bestimmten, zum Strahle senkrechten Richtung. An einem Bündel linear polarisierten Lichtes lassen sich experimentell zwei aufeinander senkrechte, längs der Strahlrichtung sich schneidende Ebenen ermitteln, welche Symmetrieebenen der Strahlung sind, also zur Schwingungsrichtung beziehungsweise parallel und senkrecht sind. In welcher dieser beiden Ebenen die Schwingungen wirklich liegen, läßt sich unmittelbar experimentell nicht entscheiden. Es ist eine willkürliche Festlegung der

Terminologie, bei der durch Reflexion entstehenden (teilweisen) Linearpolarisation des Lichtes die Reflexionsebene (Ebene durch einfallenden Strahl, Lot und reflektierten Strahl) Polarisationssebene zu nennen. Durch Vergleich solchen reflektierten Lichtes mit durch Doppelbrechung polarisiertem Lichte kann man feststellen, daß die Polarisationssebene des ordentlichen Bündels mit dem Hauptschnitte zusammenfällt, die des außerordentlichen Bündels senkrecht zum Hauptschnitte steht.

Auf theoretischem Wege ist *Fresnel* zur Anschauung gelangt, daß die Schwingungsebene eines linear polarisierten Strahles senkrecht zur experimentell ermittelten Polarisationssebene steht, *Neumann* zur entgegengesetzten Auffassung. Beide stehen auf dem Standpunkte der elastischen (mechanischen) Undulationstheorie. Nach der elektromagnetischen Lichttheorie sind in jedem linear polarisierten Lichtstrahle zwei aufeinander senkrechte Schwingungsebenen zu unterscheiden, in deren einer die elektrische, in deren anderer die magnetische Feldstärke periodisch wechselt; die Schwingungsebene des elektrischen Vektors stimmt überein mit der *Fresnel'schen* Schwingungsebene, die des magnetischen Vektors mit der *Neumann'schen* und daher auch der Polarisationssebene. Um Verwirrungen zu vermeiden, empfiehlt es sich, konsequenterweise nur mit der Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes zu rechnen und dabei — in Übereinstimmung mit dem jetzt allgemein verwendeten Sprachgebrauch — diese im Sinne *Fresnel's* zu definieren resp. auf den elektrischen Vektor zu beziehen. Nach dieser Terminologie erfolgen also die Schwingungen im reflektierten Lichte senkrecht zur Reflexionsebene, bei der Doppelbrechung im ordentlichen Strahle senkrecht, im außerordentlichen parallel zum Hauptschnitt.

Das *Nicol'sche* Prisma besteht aus zwei mit *Kanadabalsam* verkitteten *Kalkspat*stücken, deren künstlich angeschliffene Flächen so orientiert sind, daß der ordentliche Strahl total reflektiert und durch die Fassung abgeblendet wird, der außerordentliche Strahl hindurchgeht. Der Querschnitt des *Nicol'schen* Prismas ist ein *Rhombus*, und die kurze Diagonale (zwischen den stumpfen Ecken) ist der Hauptschnitt, also zugleich die Schwin-



gungsebene des durchgehenden *a*-Bündels. Man kann daher stets aus der Orientierung des Prismas die Schwingungsrichtung des durchgelassenen Lichtes feststellen.

Die oben beschriebenen Versuche erklären sich ohne weiteres dadurch, daß die Schwingungen des einfallenden, linear polarisierten Lichtes in der Kalkspatplatte in zwei Komponenten zerlegt werden, parallel und senkrecht zu ihrem Hauptschnitte. Sind die Hauptschnitte von Nikol und Kalkspatplatte parallel, so entsteht nur das a-Bild, sind sie senkrecht aufeinander, nur das o-Bild.

4) Polarisationsapparat mit zwei Nikols; Untersuchung doppeltbrechender Körper in parallelem Lichte. a) Die Kalkspatplatte wird entfernt und an ihrer Stelle in Schlitten No. 6 ein zweites Nikol'sches Prisma (analysierendes Nikol'sches Prisma oder kurz »Analysator«) eingesetzt, wieder unter sorgfältiger Justierung in der Höhe behufs Ausnutzung des einfallenden Lichtes und Herstellung eines gleichmäßig erhellten Bildes der Blendenöffnung. Das polarisierende Nikol sei so orientiert, daß sein Hauptschnitt (kurze Diagonale, vergl. oben) vertikal stehe, daß somit auch die Schwingungen des durchfallenden Lichtes in einer vertikalen Ebene liegen. Bei homologer Stellung des Analysators ist dann das Bild von maximaler Helligkeit; bei Drehung des Analysators nimmt die Helligkeit ab und wird Null bei Drehung um 90° (gekreuzte Nikols).

b) Homogene isotrope durchsichtige Körper (Glasplatten, Flüssigkeiten), zwischen die gekreuzten Nikols in das Strahlenbündel gestellt, ändern nichts; dagegen tritt im allgemeinen eine Aufhellung ein durch Einschieben anisotroper und daher doppeltbrechender Körper sowie bei die Polarisationsebene drehenden Körpern (vergl. später).

c) Gekühlte Gläser. Glasplatten, die bei der Herstellung erhitzt und dann rasch abgekühlt wurden, sind infolge der dabei erzeugten Spannungen anisotrop geworden und geben — an Stelle der Blende in die Fassung auf Schlitten No. 3 eingesetzt — ein teilweise aufgehelltes Gesichtsfeld mit charakteristischen symmetrischen Figuren. Solche Glasplatten verhalten sich nicht ganz wie doppeltbrechende Kristalle, die anisotrop, aber homogen sind, sondern sie sind zugleich inhomogen, da die Spannungszustände an bestimmten Stellen konzentriert sind.

d) Gepreßte Gläser. Analog wie rasch gekühlte Gläser verhält sich Glas, das durch Druck temporär anisotrop gemacht wird. In Schlitten No. 3 wird eine Preßvorrichtung eingesetzt, die einen zunächst (bei nicht angezogener Schraube) isotropen Glaswürfel enthält und daher das Gesichtsfeld dunkel läßt. Durch Anziehen der Schraube und Pressung des Würfels erhält man analoge Erscheinungen wie früher bei (c).

e) Glimmerplättchen für komplementäre Farben. Die Nikols werden wie früher in gekreuzte Stellung (dunkles Gesichtsfeld) gebracht. In die Fassung auf Schlitten No. 3 wird an Stelle der leeren Blende eine solche eingesetzt, deren Öffnung von einem dünnen Glimmerplättchen überdeckt ist, dessen optische Achse parallel den Begrenzungsflächen liegt. Es tritt im allgemeinen eine Aufhellung ein, und zwar erscheint das Bild des Fensters gefärbt. Dreht man nun die Blende um die Richtung der Licht-

strahlen als Achse, so findet man vier um 90° auseinanderliegende Stellungen (Indifferenzstellungen), in denen die Glimmerplatte keinen Einfluß hat, also das Feld dunkel läßt; die vier gegen diese Indifferenzstellungen um 45° verdrehten Lagen ergeben ein Maximum der Helligkeit. Der Farbenton wird durch Drehen der Blende nicht geändert.

Nun werden die Nikols aus der gekreuzten in die parallele Stellung gebracht, so daß ohne Glimmerplatte ein weißes Bild der Blendenöffnung von maximaler Helligkeit vorhanden wäre. Jene vier Indifferenzstellungen, die früher das Feld dunkel ließen, erweisen sich jetzt wieder als solche, d. h. lassen das Feld weiß; durch Drehung um 45° erhält man wieder gefärbte Bilder, und zwar von komplementärer Farbe zu der bei gekreuzten Nikols auftretenden. Es sind zwei Blenden mit Glimmerfenstern verschiedener Dicke vorhanden, die verschiedene Paare komplementärer Farben liefern (rot-grün und blau-gelb).

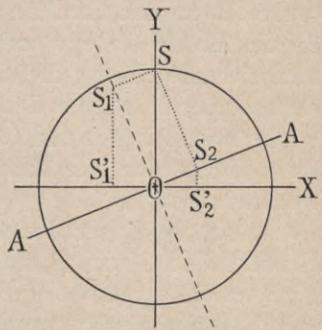
Ersetzt man das analysierende Nikol durch die Kalkspatplatte wie in Versuch 3, so erscheinen die beiden komplementären Farben gleichzeitig, die eine im o-, die andere im a-Bild. In der Indifferenzstellung der Glimmerplatte sind beide weiß.

f) Gipsfiguren. Statt einer einzigen parallel zur Achse geschnittenen doppelbrechenden Kristallplatte, wie im vorigen Versuche, sind auf einer bloß als Unterlage dienenden Glasplatte nebeneinander mehrere solcher Plättchen verschiedener Dicke aufgekittet (statt Glimmer ist Gips verwendet). Wird diese in einer Fassung montierte Platte in Schlitten No. 3 eingesetzt, so erhält man — da die einzelnen Teile parallel liegende optische Achsen haben — analog wie früher vier Indifferenzstellungen und dazwischen (bei 45°) solche mit lebhafter Färbung, die aber für die verschieden dicken Plättchen verschieden ist. Durch Übergehen aus der gekreuzten Nikolstellung in die parallele erhält man wieder die komplementäre Erscheinung.

Als physikalische Spielereien werden aus solchen Gipsblättchen in mosaikartiger Zusammensetzung Blumen, Schmetterlinge, Vögel u. dgl. hergestellt.

Theorie des Versuches. Im doppelbrechenden Plättchen liegt die optische Achse AA parallel der Begrenzungsfläche.

In der Figur (Zeichenebene senkrecht auf der Lichtbahn) stellt OY die Schwingungsrichtung der aus dem polarisierenden Nikol austretenden Strahlen dar und OS die Amplitude dieser Schwingungen. Im allgemeinen wird das senkrecht die Glimmerplatte durchsetzende Licht in zwei Komponenten, den ordentlichen Strahl mit der Amplitude OS_1 und den außerordentlichen Strahl (OS_2), zerlegt. Nach dem Austritt sind die horizontalen Komponenten OS'_1 und OS'_2



mit Rücksicht auf ihren Gangunterschied (hervorgerufen durch die verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit des o- und des a-Strahles) zu einer

Resultierenden zu vereinigen und ergeben die Intensität des vom analysierenden Nikol bei gekreuzter Stellung durchgelassenen Lichtes. Ist die Richtung AA der optischen Achse im Plättchen entweder zu OX oder zu OY parallel, so findet überhaupt keine Zerlegung statt, und man erhält die Indifferenzstellungen. Bildet OA mit OX einen Winkel φ ($\varphi < 90^\circ$), so sind OS_1 und OS_2 dem Absolutbetrage nach von Null verschieden, können sich aber verstärken oder entgegenwirken, je nach dem von der Plattendicke abhängigen Gangunterschied des ordentlichen und des außerordentlichen Strahles. Erreicht dieser Gangunterschied zufällig den Wert einer halben Wellenlänge des vorläufig als homogen gefärbt vorausgesetzten Lichtes, so tritt für $\varphi = 45^\circ$ Auslöschung ein. Es würden daher für eine derartige homogene Beleuchtung außer den Indifferenzlagen ($\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 90^\circ$) auch die Lagen $\varphi = 45^\circ$ und $\varphi = 135^\circ$ dunkles Gesichtsfeld liefern. Bei Anwendung weißen Lichtes ergeben aber die letzten beiden Lagen eine Mischfarbe, die zur ausgelöschten Farbe komplementär ist.

Bei parallel gestellten Nikols sind die Y-Komponenten von OS_1 und OS_2 maßgebend; die Berechnung ist ganz analog und liefert als Resultat das Auftreten von Farberscheinungen, die jenen bei gekreuzten Nikols gerade komplementär sind.

5) Drehung der Polarisationsebene. a) Die Aufstellung ist dieselbe wie in Versuch (4a), also Abbildung der Blendenöffnung in Schlitten No. 3 und Auslöschung durch gekreuzte Nikolstellung. Nebenlicht soll vom Schirme möglichst abgehalten werden. Legt man nun eine der in Korkscheibchen gefaßten Quarzplatten, in denen die optische Achse senkrecht zur Begrenzungsfläche steht, als Fenster über die Blendenöffnung, so tritt eine Aufhellung und Färbung des Bildes ein, also eine Erscheinung, die zunächst ganz analog der in den Versuchen (4e) und (4f) mittels parallel zur Achse geschnittenen Kristallplättchen erhaltenen ist.

Bei genauerer Untersuchung aber ergeben sich Unterschiede: wird bei ruhenden Nikols die Quarzplatte um die Strahlenrichtung als Achse gedreht, so ist dies vollkommen einflußlos (vorausgesetzt, daß die Platte immer senkrecht zu den Strahlen steht, was man erreicht, indem man die Platte an die Blende anlegt und dreht). Wird dagegen bei ruhender Platte das analysierende Nikol gedreht, so findet nicht nur ein Helligkeitswechsel, sondern auch ein solcher des Farbtones statt. Bei parallelen Nikols ist wieder wie bei (4e) und (4f) die Färbung eine komplementäre; der Übergang liefert aber hier auch andere Farbtöne als die des komplementären Farbenpaares.

b) An beliebiger Stelle, am besten zwischen polarisierendem Nikol in Schlitten No. 2 und Blende in No. 3, wird — in ein Stativ geklemmt — eine rote Glasplatte eingeschaltet. Im Interesse der Lichtintensität wähle man keine tiefgefärbte, sondern eine ziemlich hellrote Platte; das durchgelassene Licht ist zwar weniger homogen, doch ist dies für den qualitativen Versuch nicht störend.

Wird nun das analysierende Nikol gedreht, so erhält man bloß Wechsel von dunkel und hell in roter Beleuchtung. Geht man von der gekreuzten Nikolstellung aus, bei der durch die Quarzplatte eine Aufhellung des Feldes eingetreten ist, so stellt eine Drehung des Analysators um einen bestimmten Winkel α wieder Dunkelheit her. Bei den verschiedenen Platten nimmt α verschiedene Werte an.

c) Die rote Glasplatte und die Quarzplatte werden entfernt, und man stellt neuerlich auf Dunkelheit des Feldes bei gekreuzten Nikols ein. Der Reihe nach werden verschiedene Quarzplatten wie früher über die Blendenöffnung gelegt und das analysierende Nikol jedesmal im selben Sinne (im Sinne des Uhrzeigers vom Standpunkte eines Beobachters, der vom Schirme her dem Licht entgegenblicken würde) gedreht. Die im Bilde ursprünglich bei gekreuzten Nikols auftretenden Farben und die nachträglich bei der Drehung erscheinenden sind bei den verschiedenen Quarzplatten verschieden; stets aber erreicht man ein in der Nuance mehr oder weniger variierendes Violett oder Purpur.

Bei festgehaltener Drehungsrichtung des Analysators erfolgt die Farbenänderung über dieses Violett bei einigen Platten im Sinne blau-rot, bei anderen im Sinne rot-blau. Erstere sind rechtsdrehend, letztere linksdrehend (vergl. später unter Theorie).

d) Bei sonst unveränderter Aufstellung wird die Blende in No. 3 ersetzt durch eine solche, deren kreisförmige Öffnung durch eine aus zwei aneinanderschließende halbkreisförmige Quarzplatten bestehende sogenannte Doppelquarzplatte überdeckt ist; ihre Dicke beträgt 3.75 mm, die eine Hälfte ist rechts-, die andere linksdrehend. Der Projektionskopf ist eventuell zu verstellen, derart, daß die (vertikal stehende) Trennungslinie der beiden Hälften scharf abgebildet wird. Bei gekreuzter Stellung der Nikols sind beide Hälften gleich gefärbt, und zwar gelbgrün, bei parallelen Nikols ebenfalls gleich, und zwar violett (sogenannte »empfindliche Farbe« oder »teinte sensible«). Bei allen anderen Stellungen sind die beiden Hälften ungleich gefärbt. Speziell in der Parallelstellung des Nikols sind schon sehr geringe Verdrehungen des Analysators mit einer merklichen Farbdifferenz der Hälften verbunden, so daß die Einstellung auf Gleichheit mit großer Schärfe erfolgt.

Aus dem Sinne der Farbenänderung bei einer kleinen Verdrehung läßt sich nach (5c) bestimmen, welche Hälfte rechts- resp. linksdrehend ist.

Nach exakter Einstellung auf Gleichheit (in der empfindlichen Farbe) wird ein parallelepipedisches Gefäß mit einer Rohrzuckerlösung zwischen polarisierenden Nikol und Doppelquarzplatte gehalten; es tritt eine deutlich erkennbare Färbungsdifferenz auf, die eine Rechtsdrehung der Zuckerlösung anzeigt. Wird die Doppelquarzplatte entfernt und die Zuckerlösung zwischen die gekreuzten Nikols gebracht, so ist die schwache Aufhellung des Bildes nur unsicher zu konstatieren.

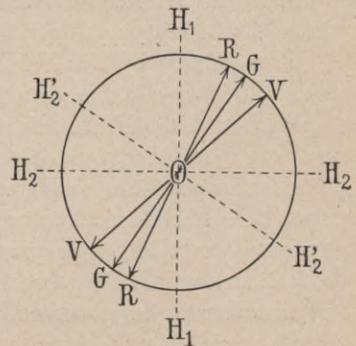
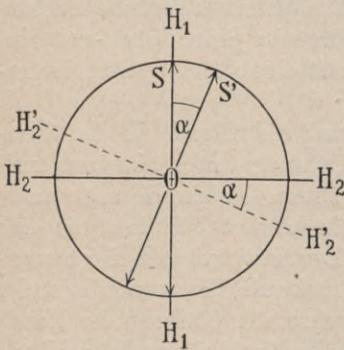
Theorie der Versuche. Das aus dem polarisierenden Nikol austre-

tende Licht schwingt in dessen Hauptschnitt $H_1 H_1$, also z. B. vertikal. Nach Durchsetzen einer planparallelen Schicht eines sogenannten drehenden oder »optisch aktiven« Körpers ist die Schwingungsrichtung bei unveränderter Amplitude ($OS = OS'$) um den Winkel α verdreht, und zwar ist der Winkel α der Schichtdicke proportional. Die Drehung pro Längeneinheit (mm) ist die sogenannte »spezifische Drehung« der betreffenden Substanz. Je nach dem Sinne der Drehung unterscheidet man rechts- und linksdrehende Körper, und zwar werden diese Bezeichnungen gebraucht vom Standpunkte eines dem Licht entgegenblickenden Beobachters. Die spezifische Drehung ist für Licht verschiedener Wellenlänge verschieden, und zwar — analog wie bei der Brechung — am kleinsten für rotes, am größten für violettes Licht (Rotationsdispersion).

Bei Anwendung einfarbigen Lichtes kann das zweite Nicol derart gestellt werden, daß sein Hauptschnitt $H'_2 H'_2$ senkrecht auf der gedrehten Schwingungsrichtung OS' steht, es läßt dann kein Licht passieren und verdunkelt das Gesichtsfeld wieder vollkommen. Zu diesem Zwecke muß es aus der ursprünglichen Stellung $H_2 H_2$ ebenfalls um den Winkel α gedreht werden. Auf diese Weise erhält man den Winkel zwischen der ursprünglichen Lage OS der Schwingungsrichtung und der verdrehten Lage OS' , ohne aber entscheiden zu können, ob diese Änderung auf dem kürzesten Wege (durch Rechtsdrehung um den Winkel α) oder durch Linksdrehung um den Winkel $(180^\circ - \alpha)$ zustande gekommen ist.

Bei irgendeiner abweichenden Lage des Hauptschnittes H_2 entfällt eine Komponente von OS' in diese Richtung, und das Gesichtsfeld ist entsprechend aufgehellt.

Wird statt einfarbigen weißes Licht durch das polarisierende Nicol gesandt, so sind nach Passieren eines optisch aktiven Körpers die einzelnen Spektralfarben der Rotationsdispersion entsprechend verschieden stark gedreht, z. B. in der in der Figur angedeuteten Weise bei einer rechtsdrehenden Substanz. Der Hauptschnitt H_2 des Analysators kann daher nicht gleichzeitig auf alle Schwingungsrichtungen senkrecht gestellt werden; das Gesichtsfeld erscheint daher aufgehellt und in komplementärer Farbe zu der gerade ausgelöschten Lichtgattung. Dreht man in dem in der Figur dargestellten Falle das analysierende Nicol nach rechts (im Sinne des Uhrzeigers) in die Lage H'_2 , so wird zunächst das Rot ausgelöscht, und das Feld erscheint blau-

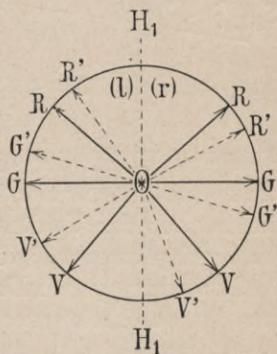


grün; beim Weiterdrehen entspricht dann der Auslöschung von Gelb, Grün, Blaugrün, Blau, Violett das Auftreten der Komplementärfarben: Blau, Purpur, Rot, Orange, Gelb. Der Farbenwechsel über Violett (Purpur) erfolgt also im Sinne Blau-Rot. Bei einer linksdrehenden Substanz hätte das im selben Sinne wie früher gedrehte analysierende Nicol die einzelnen Spektralfarben in umgekehrter Reihenfolge ausgelöscht, und daher wäre der Übergang im Sinne Rot-Blau erfolgt (vergl. Versuch 5c).

Quarz kommt in zwei symmetrisch zueinander kristallisierenden Formen vor, deren spezifische Drehung für Licht, das sich parallel der optischen Achse fortpflanzt, dem absoluten Betrage nach gleich ($21.7 \frac{0}{\text{mm}}$ für Na-Licht, zirka $15 \frac{0}{\text{mm}}$ für rotes, zirka $42 \frac{0}{\text{mm}}$ für violettes), aber entgegengesetzten Vorzeichens ist. Eine Platte von 3.75 mm Dicke dreht das gelbgrüne Licht, das ungefähr dem hellsten Teile des Spektrums entspricht, um 90° . Bei gekreuzten Nikols erscheint daher diese Farbe, bei parallelen die komplementäre »empfindliche Farbe«.

In der Doppelquarzplatte, aus rechts- und linksdrehenden Hälften zusammengesetzt, ergibt sich die in der Figur durch ausgezogene Pfeile angedeutete Lage der Schwingungsrichtungen für verschiedene Farben in beiden Hälften des Gesichtsfeldes. Wird noch eine wenig rechtsdrehende Platte eingeschoben (vergl. Versuch 5d), so gibt die Überlagerung der von ihr hervorgerufenen Drehung die durch gestrichelte Pfeile bezeichneten Richtungen.

Das in Parallelstellung befindliche analysierende Nicol gibt daher in der linken Hälfte die Komplementärfarbe zu einer gegen Grün verschobenen Strahlengattung, also Rotviolett, in der rechten Hälfte die Komplementärfarbe zu einer gegen Gelb verschobenen Strahlengattung, also Blauviolett.



42. Photometrie.

Instrumentarium: 2 Stative mit 1 und mit 4 Kerzen; Glühlampe; Bogenlampe; Schirm; Stativ; Maßstab; optische Bank; Modell eines Bunsen'schen Photometers; farbige Gläser; Rauchglas.

Theorie der Versuche. Eine Lichtquelle (selbstleuchtender Körper) wird charakterisiert durch die Angabe ihrer Lichtstärke, d. i. die in willkürlichen Einheiten ausgedrückte Lichtmenge, die sie pro Zeiteinheit aussendet; als Einheit dient die Normalkerze (1 NK).

Eine beleuchtete Fläche wird charakterisiert durch die Angabe ihrer Beleuchtung, d. i. die Lichtmenge, die sie pro Flächeneinheit und Zeiteinheit erhält; als Einheit dient die sogenannte Meterkerze (1 MK), d. i.

die Beleuchtung, die bei senkrechter Inzidenz des Lichtes durch eine Lichtquelle von 1 NK Stärke in 1 m Entfernung erzeugt wird. Allgemein ist daher die Beleuchtung in Meterkerzen gegeben durch:

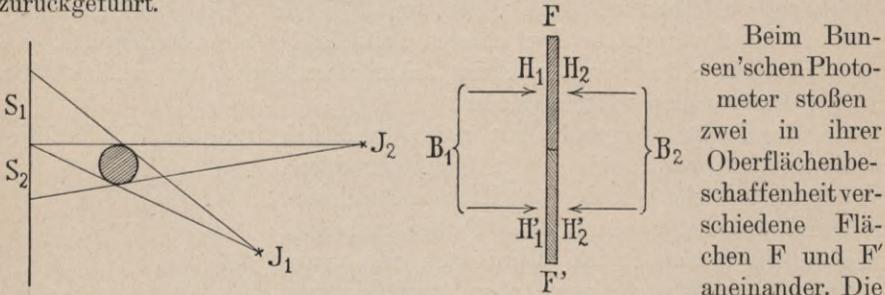
$$B = \frac{J}{r^2} \cos \alpha$$

wobei r in Metern zu messen ist und α den Einfallswinkel bedeutet. Beim Schattenphotometer besitzen die von den Lichtquellen J_1 und J_2 entworfenen Schatten S_1 und S_2 die Beleuchtungen: $B_1 = \frac{J_2}{r_2^2} \cos \alpha_2$, und $B_2 = \frac{J_1}{r_1^2} \cos \alpha_1$.

Bei $B_1 = B_2$ und $\alpha_1 = \alpha_2$ ist daher

$$\frac{J_1}{J_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

und damit der Vergleich der Lichtstärken auf eine Entfernungsmessung zurückgeführt.



Beim Bunsen'schen Photometer stoßen zwei in ihrer Oberflächenbeschaffenheit verschiedene Flächen F und F' aneinander. Die

Helligkeit H , in der ein Flächenelement erscheint («Helligkeit» = Lichtstärke pro Flächeneinheit) hängt sowohl von der Menge des diffus reflektierten, auf der Vorderseite auffallenden Lichtes als auch von der Menge des durchgelassenen, auf der Rückseite auffallenden Lichtes ab.

Bezeichnet ϱ den Bruchteil, den das reflektierte Licht, δ den Bruchteil, den das durchgelassene Licht vom auffallenden ausmacht, so ist $\varrho + \delta = 1 - \varkappa$, wenn \varkappa den im Innern absorbierten Betrag angibt. Analoge Bedeutung haben ϱ' , δ' , \varkappa' für die Fläche F' .

Allgemein ist daher, wenn B_1 und B_2 die Beleuchtungen der beiden Seiten I und II sind:

$$\begin{array}{l|l} H_1 = B_1 \varrho + B_2 \delta & H_2 = B_2 \varrho + B_1 \delta \\ H'_1 = B_1 \varrho' + B_2 \delta' & H'_2 = B_2 \varrho' + B_1 \delta' \end{array}$$

Unter der Voraussetzung, daß $B_1 = B_2 = B$ sei, ist dann:

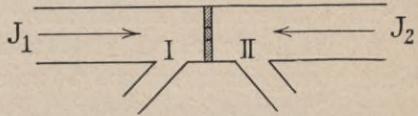
$$H_1 = H_2 = B(\varrho + \delta) \text{ und } H'_1 = H'_2 = B(\varrho' + \delta')$$

d. h. die beiden Seiten I und II erscheinen gleich, wobei aber H und H' verschieden sein können. Macht man außerdem noch die Voraussetzung, daß die absorbierten Lichtmengen \varkappa und \varkappa' in beiden Flächen gleich sind (oder so klein, daß \varkappa gegen 1 vernachlässigt werden kann), so ist auch $(\varrho + \delta) = (\varrho' + \delta')$, und es wird auf jeder Seite $H = H'$, die beiden Flächen erscheinen also gleich.

Ausführung der Versuche. 1) Rumford'sches Schattenphotometer. In einem gut verdunkelten Zimmer wird ein weißer Schirm und

etwa 10 cm davor ein vertikaler Stab (Stativ) aufgestellt. Zwei Lichtquellen (1 Kerze und 4 Kerzen) werden derart verschoben, daß die beiden Schatten (vergl. obige Figur) einander gerade berühren und gleich erscheinen. Die Abmessung der Distanz Schirm — Lichtquelle ergibt dann, daß $r_1 : r_2 = 1 : 2$, da $J_1 : J_2 = 1 : 4$.

2) Bunsen's Photometer. Die Flächen F und F' (vergl. oben) sind gewöhnliches weißes Papier resp. ein runder Fettfleck in der Mitte desselben. Für das gewöhnliche Papier ist ϱ groß, δ klein, für das fettdurchtränkte aber δ' bedeutend größer als δ . Man sieht infolgedessen bei Beleuchtung von vorn den Fleck dunkel auf hellem Grunde, umgekehrt hell auf dunklem Grunde bei Beleuchtung von hinten. Das in einer Fassung befindliche Papierblatt wird in einem Schlitten der optischen Bank befestigt und beiderseits gegabelte Röhren aufgesteckt, die Nebenlicht abblenden und nur das Licht von J_1 und J_2 resp. die Beobachtung der Seiten I und II zulassen. Die zwei zu vergleichenden Lichtquellen werden ebenfalls auf Schlitten der optischen Bank befestigt, und nach Einstellung auf Verschwinden des Fleckes (unter Annahme, daß $\varkappa = \varkappa'$) werden die Entfernungen r_1 und r_2 an der Teilung, die an der Bank angebracht ist, abgelesen. Die Berechnung erfolgt wie früher.



a) Die Vergleichung von 1 Kerze mit 4 Kerzen ergibt dasselbe Resultat wie bei Versuch (1), aber mit größerer Schärfe der Einstellung und daher größerer Genauigkeit.

b) Eine Glühlampe wird in derselben Weise mit einer Kerze verglichen und daraus ihre Lichtstärke berechnet.

c) Nach Entfernung der Kondensorlinsen wird die optische Bank vor die Bogenlampe gestellt und diese mit der Glühlampe verglichen. Infolge der stark abweichenden Färbung beider Lichtquellen ist zunächst eine Abgleichung nicht mit Sicherheit ausführbar. Man hält daher vor das Auge ein farbiges Glas und nimmt die Abgleichung separat für rotes, grünes und blaues Licht vor. Die relative Intensität der Bogenlampe gegenüber der Glühlampe ist im blauen Licht am größten, im roten am kleinsten.

d) Der Versuch (b) wird wiederholt unter Vorschaltung einer Rauchglasplatte zwischen Glühlampe und Photometer; die scheinbare Lichtstärke der Glühlampe sinkt dabei von J_0 auf J'_0 ; das Verhältnis $k = \frac{J'_0}{J_0}$ gibt das sogenannte »Extinktionsverhältnis« der Rauchglasplatte an.

43. Magnetische Kraftfelder.

Instrumentarium: 2 Magnetstäbe; 1 Hufeisenmagnet; Eisenring; Glas-tischchen; Zinkblechplatte; Papier; Eisenfeilspäne in Streubüchse; Paraffin-papier; Bunsenbrenner; Dreifuß; Stricknadeln.

Ausführung der Versuche. Die Magnete werden unter das mit niederen Füßen versehene Glastischchen gelegt und ein Blatt weißes Schreibpapier darübergelegt. Während und nach Aufstreuen der Eisenfeilspäne wird die Glasplatte mit einem Holzstäbchen (Bleistift oder dergl.) leicht geklopft, zur Erleichterung der Anordnung der Teilchen längs der Kraftlinien.

Zur Probe wird eins der erhaltenen Bilder fixiert; auf das Tischchen wird eine Zinkblechplatte gelegt, darauf statt gewöhnlichen Papiers ein Blatt Paraffinpapier; nach Herstellung des Kraftlinienbildes wird die Blechplatte in horizontaler Stellung abgehoben, auf einen Dreifuß gestellt und mit klein gedrehter Bunsenflamme vorsichtig erwärmt, bis das Paraffin eben zu schmelzen beginnt. Nach Ablöschen der Flamme und Abkühlung ist das Bild fixiert.

Es werden folgende Kraftlinienbilder hergestellt:

1) ein Magnetstab, 2) ein Hufeisenmagnet, 3) zwei Magnetstäbe, in der Verlängerung ihrer Achsen, die gleichnamigen Pole einander zugekehrt, 4) ditto, die ungleichnamigen Pole einander zugekehrt, 5) zwei Magnetstäbe, parallel nebeneinanderliegend (in zirka 5 cm Distanz), mit gleichgerichteten Polen, 6) ditto, mit entgegengerichteten Polen, 7) Eisenring zwischen den Polen der Aufstellung No. 4 (vergl. Figur), 8) Stricknadel mit Folgepolen.

Zur Erzeugung des im letzten Versuche erwähnten Magnets mit Folgepolen wird die eine Hälfte einer Stricknadel an dem einen Pole (z. B. Nordpole) eines Hufeisenmagnets gestrichen, indem man die Mitte der Nadel an diesen anlegt und sie über  das Ende hin abzieht; dies wird einige Male wiederholt; die Spitze der bestrichenen Hälfte wird dabei ein Pol vom entgegengesetzten Vorzeichen des magnetisierenden, also hier z. B. ein Südpol. Statt nun — wie bei der Herstellung eines normalen Magnets — die andere Hälfte am entgegengesetzten Pole des Hufeisenmagnets zu streichen, führt man diese Operation wieder mit demselben Pole wie früher aus. Die Nadel besitzt dann zwei Südpole an den beiden Enden und einen »Folgepol« (d. h. zwei zusammenstoßende Nordpole) in der Mitte.

44. Bestimmung des magnetischen Momentes eines Stabes.

Instrumentarium: Magnetometer; Schiene mit Teilung und Schieber; Magnetstäbe.

Theorie der Versuche. Die übliche Definition des magnetischen Momentes M eines Magnets als Produkt der Polstärke μ und der Poldistanz l geht von der Voraussetzung aus, daß das Feld des Magnets ersetzt werden kann durch das zweier punktförmiger Pole, eine Voraussetzung, die tatsächlich nur angenähert erfüllt ist. Der Wert des Momentes M ist

aber unabhängig hiervon eine empirisch scharf definierbare Größe, z. B. auf Grund des Satzes, daß in einem homogenen Magnetfelde von der Stärke H der um den Winkel φ aus seiner Gleichgewichtslage gedrehte Magnet ein Drehungsmoment $D = MH \sin \varphi$ erfährt. Nachträglich kann dann diese unmittelbar bestimmte Größe M in zwei Faktoren μ und l derart zerlegt werden, daß das tatsächliche Feld des Magnets mit dem der fingierten punktförmigen Pole möglichst übereinstimmt. Bei Magneten in Form gerader Stäbe ist im allgemeinen die Fiktion am besten, daß $l = \frac{5}{6} L$ sei, wenn L die wirkliche Stablänge bezeichnet.

Die empirische Bestimmung von M erfolgt nach der von *Gauß* angegebenen Methode aus der Ablenkung, die der zu untersuchende Magnet aus gemessener Entfernung an einer Deklinationsnadel hervorruft. Die theoretische Berechnung vereinfacht sich für die sogen. beiden »Hauptlagen«.

I. Hauptlage: Magnet in Ostwestrichtung; Nadel in Verlängerung der Magnetachse.

II. Hauptlage: Magnet in Ostwestrichtung; Nadel nördlich oder südlich von Magnetmitte.

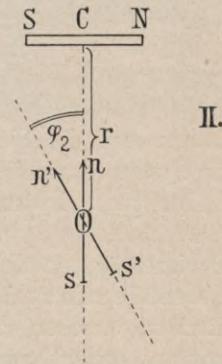
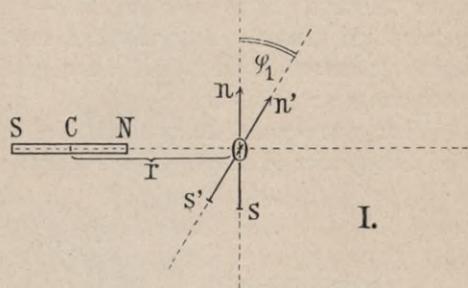
Bezeichnet r die Distanz des Magnetmittelpunktes C vom Nadelmittelpunkte O , in cm ausgedrückt, φ den Ablenkungswinkel der Magnetnadel und H die Horizontalkomponente des erdmagnetischen Feldes in absoluten Einheiten (»Gauß«), so gilt in erster Annäherung:

$$\text{I. Hauptlage: } \frac{M}{H} = \frac{1}{2} r^3 \operatorname{tg} \varphi_1$$

$$\text{II. } \quad \quad \quad \frac{M}{H} = r^3 \operatorname{tg} \varphi_2$$

Die erste Hauptlage liefert also bei gleicher Distanz rund den doppelten Ablenkungswinkel wie die zweite; zur Eliminierung der Beobachtungs- und Apparatfehler ist es vorteilhaft, erstens in der gezeichneten Lage den Magnet umzukehren, so daß die Pole N und S ihre Lage vertauschen, zweitens aus der gleichen Entfernung in der symmetrischen

Stellung auf der anderen Seite der Nadel den Ablenkungsversuch zu wiederholen, so daß im ganzen vier Werte von φ erhalten werden, aus denen man das arithmetische Mittel nimmt.

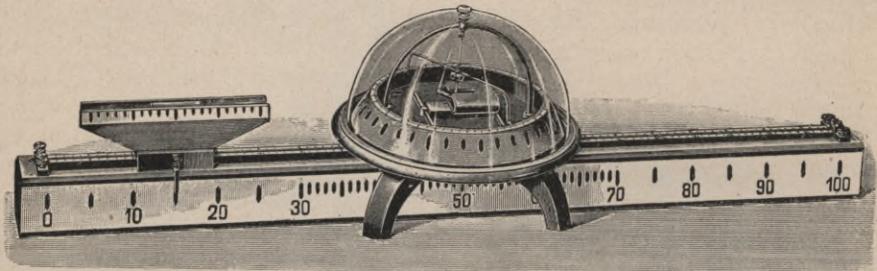


Genauere Werte erhält man durch Hinzufügen von Korrektionsgliedern zu obiger Formel, bezüglich derer auf *Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik*, 10. Auflage, S. 349 verwiesen sei.

Beschreibung des Apparates. Als Magnetometer dient ein Apparat, der durch Hinzufügen von Drahtspulen auch in ein Galvanometer umgewandelt werden kann und als solches in späteren Versuchen (vergl. S. 120) Verwendung findet.

Ein kreisförmiges Grundbrett ist mit zwei Teilungen versehen, einer Teilung in Intervalle von 1° , für den Experimentator bestimmt, und einer weithin sichtbaren Teilung mit dicken Strichen in Winkeldistanzen von je 10° für das Auditorium. Ein darüberstehender halbkreisförmiger Bügel besitzt in seinem Scheitel eine Bohrung, in welcher ein Stift vertikal verschiebbar und mittels einer seitlich angebrachten Schraube fixierbar ist. An diesem Stifte ist durch ein Bündel von Kokonfäden der Magnetträger aufgehängt, bestehend aus zwei Hülsen für die Aufnahme der beiden (bei astaticem System erforderlichen) röhrenförmigen Magnete und einem Zeiger, der über den beiden obenerwähnten Teilungen spielt und gegen die Magnete beliebig verdreht werden kann. Am Boden sind horizontalliegende Führungsstifte befestigt, längs welcher die — hier nicht verwendeten — Galvanometerspulen gleiten. Zum Zwecke rascherer Dämpfung der Schwingungen kann der untere Magnet mit einer geschlitzten Hülse aus dickem Kupferblech umgeben werden.

Über das ganze Instrument wird zur Abhaltung von Luftströmungen eine Glasglocke gestülpt. Bei Nichtgebrauch arretiert man das Magnet-



system, indem man die Fixierungsschraube öffnet und den Stift samt angehängtem System vorsichtig herabgleiten läßt, bis der Zeiger auf der Skala aufrucht. Das ganze Instrument kann auf einen hölzernen Dreifuß gestellt werden.

Die Schiene, längs welcher der Magnet verschoben werden soll, ist 1 m lang und ebenfalls mit zwei Teilungen, feiner für Experimentator und grober für Auditorium, versehen und trägt einen verschiebbaren Schlitten, auf den der Magnetstab gelegt wird. Ein längs der Teilung gespannter Draht kommt für die hier besprochenen Versuche nicht in Betracht, sondern dient zur Widerstandsvergleichung nach der Wheatstone'schen Brückenmethode (vergl. S. 128).

Ausführung des Versuches. 1) Aufstellung und Justierung. Bei entfernten Galvanometerspulen wird bloß der untere Röhrenmagnet in die Hülse eingeschoben und der Zeiger dem Magnet parallel gestellt. Der Stift ist vorsichtig so weit zu heben, daß das System frei schwingt, der Zeiger knapp über der Skale.

Die Schiene wird zunächst beiläufig in ostwestliche Richtung eingestellt und der Dreifuß derart darübergestellt, daß eine Marke im Ausschnitt gerade auf den Teilstrich 50 cm der Längsteilung fällt. Nachdem das Magnetometer auf das Tischchen des Dreifußes gestellt ist, orientiert man das Ganze genauer, so daß die Schiene exakt senkrecht zum magnetischen Meridian steht und der dem Magnet parallele Zeiger auf 0° und 180° einspielt.

2) Der zu untersuchende Magnetstab wird in den längs der Schiene verschiebbaren Schlitten gelegt, derart, daß seine Mitte mit dem mittleren Teilstrich der Schlittenteilung zusammenfällt. Die Entfernung dieses Punktes vom Mittelpunkte des Magnetometers wird mindestens dreimal so groß als die Länge des geprüften Magnetstabes gewählt und an der Teilung der Schiene abgelesen; die Ablenkung der Magnetnadel ist an der Kreisteilung des Magnetometers abzulesen.

3) In der früher beschriebenen Weise wird der ablenkende Magnetstab umgelegt (Nord- und Südpol vertauscht) und neuerlich die Ablenkung (nach der entgegengesetzten Seite) gemessen.

Analog werden zwei Messungen ausgeführt, nachdem der Schlitten in gleicher Entfernung auf der anderen Seite des Magnetometers aufgestellt wurde. Da man jedesmal die Stellung beider Spitzen des Zeigers abliest, erhält man im ganzen acht Werte des Ablenkungswinkels φ . Das arithmetische Mittel wird in die für die I. Hauptlage gültige Formel (vergl. oben) eingesetzt.

4) Aus dem Resultate für $\frac{M}{H}$ wird zunächst M berechnet, indem man für H den am Beobachtungsort gültigen Wert der Tabelle 23 in *Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik* entnimmt (rund $H = 0.2$). Aus M wird dann die Polstärke μ berechnet, indem man — wie bereits erwähnt — als Poldistanz fünf Sechstel der Stablänge einsetzt.

45. Demonstrations-Elektrometer.

Instrumentarium: 2 Braun'sche Elektrometer; Exner'sches Blättchen-elektrometer; Metallkugel an Hartgummistiel; Paraffinplatten; Blechzylinder; Hartgummistäbchen; Drähte; Zambonisäule; Glasstab; Lederlappen mit Amalgam; Hartgummistab; Katzenfell; Schublehre; gestielte Hartgummiplatte mit aufge kittetem Fellstückchen.

Vorbemerkungen über elektrostatische Versuche. Von besonderer Bedeutung für das Gelingen elektrostatischer Versuche ist die Verwendung

guter Isolatoren als Träger, Stützen u. dgl. Viele Substanzen, deren eigentliches Leitvermögen zwar nicht Null, aber für die praktische Anwendung hinreichend klein ist, versagen trotzdem, sobald auf ihrer Oberfläche eine leitende Schicht sich ausbildet, sei es infolge hygroskopischer Eigenschaften des Materials, sei es infolge von Staubanhäufung.

Analog wie Leitung wirkt ferner Rückstandsbildung in Isolatoren. Das geeignetste feste Isoliermaterial ist Bernstein, der fast vollkommen nichtleitend, im allgemeinen rückstandsfrei und wenig hygroskopisch ist; wegen seiner relativen Kostspieligkeit wird er aber nur an feineren Apparaten und in kleineren Stücken verwendet. Paraffin in Form von Platten und Siegellackstangen sind als isolierende Unterlagen und für improvisierte Träger vorteilhaft zu verwenden. Hartgummi (Ebonit) ist ebenfalls ein guter Isolator, bildet aber häufig leitende Oberflächenschichten aus; besser funktionieren Hartgummistäbe, die mit Schellackfirnis überzogen sind, besonders wenn die Oberfläche durch tiefe eingedrehte Nuten die in der Figur gezeichnete Gestalt bekommen hat. Glas ist — abgesehen davon, daß manche Sorten (z. B. gewöhnliches Thüringerglas) ein beträchtliches Leitvermögen besitzen — stets infolge seiner starken Hygroskopie unverläßlich; in der trockenen Luft geheizter Zimmer im Winter gut isolierend, versagt es gewöhnlich in feuchter Luft. Die Isolation kann vorübergehend gebessert werden, indem man die Oberfläche des Glases mit destilliertem Wasser abwäscht, um die dort spurenweise gebildeten löslichen Verbindungen zu entfernen, gut trocknet und mittels einer Bunsenflamme vorsichtig erwärmt.

Sind Isolatoren, die dem Versuchszwecke nach keine Ladung besitzen sollen, bei zufälliger Berührung oder beim Reinigen von Staub oder dergl. durch Reibung elektrisch geworden, so werden sie ebenfalls vorsichtig mit einer Bunsenflamme bestrichen oder einige Sekunden oberhalb der Flamme gehalten, damit die stark ionisierten Flammengase (vergl. S. 147) die Oberflächenladung entfernen.

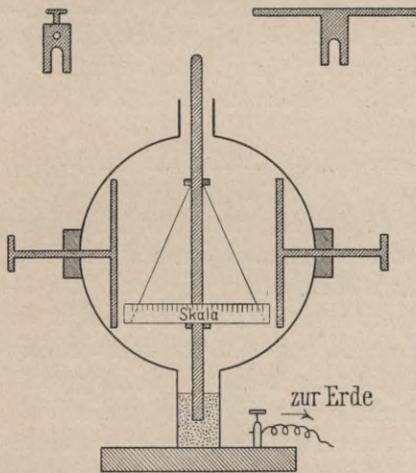
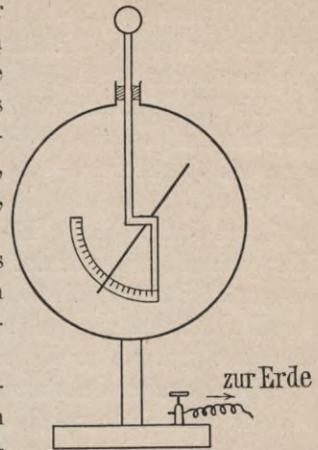
Elektroskopgehäuse, Schutzhüllen etc. sind häufig konstant auf dem Potentiale Null zu erhalten. Die bloße Ableitung durch die Tischplatte etc. genügt nicht immer; in diesem Falle ist eine Drahtleitung zur Gas- oder Wasserleitung anzubringen (»Erdung«).

Beschreibung der Apparate. Braun'sches Elektrometer. Ein Dreifuß, mit Klemmschraube für eventuelle Erdleitung versehen, trägt eine zylindrische Blechbüchse von etwa 20 cm Durchmesser; die vordere und hintere Kreisfläche ist durch Glasplatten verschlossen; in der oberen Öffnung des Gehäuses ist durch einen Isolator ein Träger befestigt, der unten in einen mit Teilung versehenen Quadranten ausläuft. Bei O ist um eine horizontale Achse in einem Spitzenlager drehbar ein leichter Aluminiumstreifen, dessen Schwerpunkt nur wenig unter O liegt, so daß er im ungeladenen Zustande vertikal steht, bei Ladung des ganzen isolierten Systems dagegen einen Ausschlag zeigt, der an der Teilung abzulesen ist. Die

empirisch hergestellte Teilung gibt unmittelbar die Potentialdifferenz zwischen isoliertem System und Gehäuse in Volt an. Durch verschiedene Lage des Schwerpunktes des Aluminiumzeigers sind bei zwei Instrumenten verschiedene Empfindlichkeiten hergestellt: 1) Meßbereich bis 1500 Volt, 1 pars = 100 V; 2) Meßbereich bis 10 000 Volt, 1 pars = 500 V.

Der herausragende Knopf des Elektrometers trägt eine Klemmschraube, in der Zuleitungen zu mit dem Apparat verbundenen Körpern befestigt werden können.

Exner'sches Blättchenelektrometer (modifiziert nach Elster und Geitel). Auf einem — wieder mit Klemmschraube für Erdleitung versehenen —



sehenen — Stativ ist ein Gehäuse, analog wie beim früher beschriebenen Elektrometer, nur in kleineren Dimensionen, befestigt. Eine unten fixierte Hartgummissäule trägt einen Stift, der oben durch eine Öffnung (»Hals«) des Gehäuses herausragt und auf den je nach Bedarf eine Klemmschraube oder ein Tischchen aufgesetzt werden kann. An beiden Seiten des Stiftes sind Blättchen aus Aluminiumfolie angebracht, die im geladenen Zustande sich spreizen. Für Versuche quantitativen Charakters ist die Divergenz an einer mm-Teilung abzulesen, die an der vorderen Deckplatte aufgeklebt ist. Für objektive

Demonstrationen kann der Apparat vor den Kondensator eines Projektionsapparates gestellt und mittels einer Projektionslinse auf einem Schirme abgebildet werden (vergl. S. 165); in diesem Falle ist eventuell eine Skala auf dem Schirme anzubringen.

Um das Instrument ohne Beschädigung der Blättchen transportieren zu können, sind an beiden Seiten Schutzplatten angebracht, die sich in einer Führung horizontal verschieben lassen. Bei Nichtgebrauch werden diese Schutzplatten bis zum Anschlag an den Blättchenträger herangeschoben, so daß die Blättchen in dem schmalen Zwischenraum geschützt liegen. Vor dem Gebrauch des Elektrometers werden die Schutzplatten wieder bis zum Anschlag an das Gehäuse zurückgezogen; diese Operation ist mit Vorsicht auszuführen, da bisweilen die Aluminiumblättchen an den Schutzplatten haften bleiben und bei raschem Auseinanderziehen abgerissen werden. Tritt

dieses Haften ein, so zieht man die Schutzplatten langsam nur ein Stück zurück und löst das Blättchen ab, indem man mit einem Bleistift oder dergleichen leicht gegen das Gehäuse klopft.

Die Empfindlichkeit dieses Elektrometers ist eine größere als die des Braun'schen, es wird daher zur Messung kleinerer Potentialdifferenzen angewandt (Meßbereich etwa bis 200 oder 300 Volt, je nach Gewicht der Blättchen).

Zum Laden dieses Elektrometers darf nicht ein geriebener Glas- oder Hartgummistab verwendet werden, da die heftige Bewegung bei dieser viel zu großen Ladung die Blättchen ebenfalls beschädigt.

Zur Anwendung gelangt hier eine Zamboni'sche Säule, hergestellt aus einer großen Anzahl aufeinandergedrückter Papierscheibchen, die mit einer depolarisierenden Substanz imprägniert und an beiden Seiten mit unechtem »Gold«- und »Silber«- (Kupfer- und Zinn-) Belag versehen sind. Die Spannung beträgt einige hundert Volt, hängt aber von der Luftfeuchtigkeit und von dem Drucke, mit welchem die Scheibchen gepreßt werden, ab. Länger dauernder Kurzschluß der Zamboni'schen Säule (gleichzeitiges Anfassen beider Pole mit den Händen, Auflegen auf eine leitende Platte etc.) ist zu vermeiden; bei Nichtgebrauch wird die Säule an einem Stativ aufgehängt.

Die goldfarbige Seite ist der positive, die silberfarbige der negative Pol.

Theorie der Versuche. Der Ausschlag des Elektrometers (Ablenkung des Zeigers beim Braun'schen, Divergenz der Blättchen beim Exner'schen Elektrometer) ist unmittelbar bestimmt durch die Ladung Q , welche der bewegliche Teil und die mit ihm leitend verbundenen Teile im Innern des Elektroskopgehäuses tragen. Da aber diese Ladung mit der Potentialdifferenz V zwischen Gehäuse und isoliertem System in der Beziehung steht: $Q = C \cdot V$, wo C die Kapazität des innerhalb des Gehäuses befindlichen Systemes bezeichnet, ist mit einem bestimmten Ausschlage zugleich eine bestimmte Potentialdifferenz gegeben. Mit irgendeinem Körper außerhalb leitend verbunden, liefert also das Elektrometer direkt die Potentialdifferenz; die Ladung berechnet sich dann zu $C'V$, wobei C' die Summe der Kapazitäten von Elektrometer, Verbindungsleitung und verbundenem Konduktor bedeutet.

Die Anwendung des Elektrometers zur Spannungsmessung erfordert daher die Eichung der Skale nach absoluten Einheiten der Potentialdifferenz, die Anwendung zur Messung elektrischer Ladungen außerdem noch die Bestimmung der obenerwähnten Kapazitäten.

Der Gebrauch der theoretischen Formeln der Elektrostatik bei numerischer Auswertung setzt die Anwendung des absoluten elektrostatischen Maßsystemes voraus.

Die für die Umrechnungen zwischen diesem und dem praktischen Meßsysteme notwendigen Größenbeziehungen sind:

$$\text{Ladung: } 1 \text{ stat. Einh.} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ Cb}$$

$$\text{Spannung: } 1 \text{ stat. Einh.} = 300 \text{ V}$$

$$\text{Kapazität: } 1 \text{ stat. Einh.} = 1 \text{ cm} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

Die Kapazität ist bei einfachen geometrischen Verhältnissen aus den Dimensionen zu berechnen, z. B. bei einer Kugel (in großer Entfernung von anderen Konduktoren) durch ihren in cm gemessenen Radius gegeben. Die Kapazitäten komplizierter Systeme können mit Hilfe einer solchen geometrisch berechenbaren Standardkapazität empirisch nach der Methode der Ladungsteilung ermittelt werden: das zu untersuchende isolierte System werde auf eine bekannte Spannung V_0 geladen; ist C die zu bestimmende Kapazität, so ist $Q = CV_0$ die Ladung. Durch leitende Verbindung mit einer vorher zur Erde abgeleiteten und dann isolierten Standard-Kapazität γ (bei einer Kugel $\gamma = R$) verteilt sich diese Ladung auf das ursprüngliche und das hinzugeschaltete System, es ist daher $Q = CV_0 = (C + \gamma)V_1$, wenn V_1 das nun abzulesende Potential des gesamten Systemes bezeichnet. Hieraus berechnet sich

$$C = \gamma \frac{V_1}{V_0 - V_1}$$

Da die Potentiale in einem Quotienten auftreten, ist das Maßsystem, in welchem sie gemessen werden, ohne Einfluß; eine Umrechnung von Volt in statische Einheiten braucht daher hier nicht vorgenommen zu werden, wohl aber bei der Berechnung von Ladungen aus der gemessenen Spannung und der nun bekannten Kapazität.

Ausführung der Versuche. 1) Prüfung der Isolation. Die Braunschenschen Elektrometer werden mittels eines durch Reibung elektrisierten Stabes, das Exner'sche Elektrometer mittels der Zambonisäule auf ein Potential geladen, das nahe der oberen Grenze des Meßbereiches liegt; die Gehäuse werden zur Erde abgeleitet. Man kontrolliert die Abnahme des Ausschlages nach 1, 2, 3, 4, 5 und 10 Minuten. Infolge der nicht ganz vollständigen Isolation der festen Träger sowie der den Apparat umgebenden Luft (Zerstreuung) sinkt das Potential stets ab, wenn auch bei günstigen Umständen in dieser Beobachtungszeit sehr wenig. Speziell beim Braun'schen Elektrometer kommt es bisweilen vor, daß der Ausschlag anfangs rasch, späterhin sehr langsam abnimmt; in diesem Falle liegt Rückstandsbildung in den isolierenden Trägern vor. Wird ein solches Elektrometer durch momentane Ableitung zur Erde entladen und hierauf wieder isoliert, so nimmt es durch Freiwerden der gebildeten Rückstandsladung nach einigen Minuten wieder eine merkliche Ladung vom selben Vorzeichen wie die ursprünglich erteilte an. Ein derartiges rückstandsbildendes Elektrometer soll zur Ablesung erst verwendet werden, wenn einige Minuten seit der Ladung verstrichen sind. Zu feineren quantitativen Versuchen ist es überhaupt unbrauchbar.

2) Bestimmung der Empfindlichkeit. Die Ausführung bezw. Kontrolle einer Elektrometereichung wird später (vergl. S. 126) im Anschluß an Voltmeterversuche besprochen. Einstweilen wird die Teilung des Braun'schen Elektrometers bezw. die dem Exner'schen Elektrometer beigegebene Eichungstabelle als richtig angenommen.

3) Bestimmung von Kapazitäten. a) Exner'sches Elektrometer; in den Knopf desselben wird ein steifer, etwa 20 cm langer Draht vertikal eingeklemmt; bei geerdetem Gehäuse wird das Elektrometer mittels der Zambonisäule geladen und das Potential V_0 beobachtet; eine mit Hartgummistiel versehene Kugel wird erst mit der Erdleitung, dann mit dem oberen freien Ende des Drahtes in Berührung gebracht und wieder entfernt. (Der Durchmesser der Kugel wird mittels einer Schublehre bestimmt.) Die Berechnung der Kapazität C des Systems: Elektrometer + Draht erfolgt aus dem nun zu beobachtenden Potentiale V_1 nach der obenerwähnten Formel. Die Einschaltung des Drahtes hat den Zweck, die Berührung mit der Kugel in einer solchen Entfernung vom abgeleiteten Gehäuse vorzunehmen, daß der Wert ihrer Kapazität praktisch dem theoretischen Werte (Radius) gleich angenommen werden kann. Um die Kapazität des Elektrometers allein zu finden, muß man von C noch die Kapazität des Drahtes

abziehen; diese berechnet sich aus seinen Dimensionen zu: $\frac{1}{2 \lg \text{nat} \frac{l}{r}}$, wenn l

die Länge und r den Radius des Drahtes (beide in cm gemessen) bezeichnen.

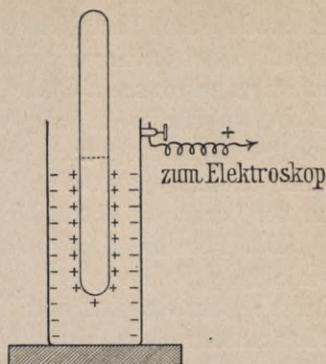
b) Ganz analog wird die Kapazität des Braun'schen Elektrometers bestimmt.

c) Ein Blechzylinder von etwa 30 cm Höhe und 10 cm Durchmesser wird auf eine — vorher durch Abflammen unelektrisch gemachte — Paraffinplatte gestellt, und ein dünner biegsamer Draht von etwa 30 cm Länge wird einerseits an diesem Zylinder befestigt, mit dem anderen Ende um ein Hartgummistäbchen gewickelt.

Das Braun'sche Elektrometer wird geladen und dann mit dem vorher ableitend berührten Zylinder in leitende Verbindung gebracht, indem man den isolierenden Hartgummistiel faßt und das Drahtende an den Knopf des Elektrometers anlegt. Aus den Potentialen V_0 und V_1 berechnet man die Gesamtkapazität des Systems, indem man die des Elektrometers allein entsprechend dem Resultate von Versuch (3b) als bekannt in die oben erwähnte Formel einsetzt.

4) Bestimmung von Ladungen. Die Aufstellung von Versuch (3c) wird beibehalten unter Verwendung des bis 10 000 Volt zeigenden Elektrometers und das freie Ende des Drahtes nach Entfernung des Hartgummistäbchens im Knopfe des Elektrometers festgeklemmt. Die Kapazität des gesamten Systems ist aus dem vorigen Versuche bekannt. Der zur Erzeugung von Reibungselektrizität dienende Glasstab wird — an einem Ende mit der Hand gehalten — längs der anderen Hälfte mit dem Reibzeug

gerieben, daß er eine positive Ladung annimmt. Hält man unmittelbar danach die elektrisierte Hälfte in den Blechzylinder, so wird eine der Ladung $+Q$ des Stabes gleichgroße negative Ladung $-Q$ an der inneren Wand des Zylinders durch Influenz gebunden, während die freie Influenzladung $+Q$ sich über die äußere Oberfläche des Zylinders und das Elektrometer verteilt. Aus dem abgelesenen Potentiale V und der Kapazität wird Q berechnet. Sollte durch zufällige Berührung oder durch Entladung durch die Luft ein Teil der positiven Stabladung unmittelbar an den Zylinder übertragen werden, so wird ein gleichgroßes Quantum der negativen Influenzladung hierdurch neutralisiert und das Versuchsergebnis nicht weiter beeinflusst.



Ein analoger Versuch wird mit Hartgummistab und Katzenfell als Reibzeug ausgeführt.

Unter der — nur angenähert richtigen — Annahme, daß die Oberflächenverteilung der durch Reibung erzeugten Ladung dieselbe sei wie auf einem leitenden geladenen Stab, kann die Spannung berechnet werden, indem man $Q = C'V$ setzt und für C' die Kapazität eines Zylinders einsetzt (vgl. Formel auf S. 112), dessen Länge gleich der geriebenen Länge des Stabes und dessen Radius gleich dem des Stabes ist. Hierbei ist V zunächst in statischen Einheiten ausgedrückt und in Volt umzurechnen.

5) Erzeugung entgegengesetzt gleicher Ladungen durch Reibung. Das Reibzeug besteht aus einem Stückchen Fell, das auf einer mit Stiel versehenen Hartgummiplatte befestigt ist. Ein Hartgummistab wird einmal über das auf den Tisch gelegte Reibzeug unter mäßigem Drucke gestrichen. In analoger Weise wie früher in Versuch (4) prüft man unmittelbar nach dem Reiben die Ladung des Stabes und die des Reibzeuges. Sie erweisen sich als dem absoluten Betrage nach gleich.

Vor dem Versuche sind Stab und Reibzeug mittels der Bunsenflamme vollständig zu entladen.

46. Oberflächenverteilung elektrischer Ladungen.

Instrumentarium: Exner'sches Elektrometer; Braun'sches Elektrometer; Probescheibchen an Hartgummistiel; Kugelkonduktor und stabförmiger Konduktor auf isolierenden Stativen; Metallbecher; Paraffinplatten; Hartgummistab und Fell; Metallstab; Stativ.

Theorie der Versuche. Die Verteilung der Ladung über die Oberfläche verschieden gestalteter Konduktoren wird experimentell ermittelt, indem man mittels eines sogenannten »Probescheibchens« Ladungen von verschiedenen Stellen der Oberfläche auf ein Elektrometer überträgt. Das

Probescheibchen besteht aus einem zirka 4 cm^2 großen Blechplättchen, das an einem gut isolierenden Hartgummistabe befestigt ist; an irgendeiner nicht zu stark gekrümmten Stelle der Konduktoroberfläche flach angelegt, nimmt es nahezu dieselbe Ladung auf, welche das von ihm bedeckte Flächenstück vor der Berührung trug. Der Ausschlag, welchen diese auf das Elektrometer übertragene Ladung hervorruft, ist also ein Maß der Flächendichte an der berührten Stelle des Konduktors.

Das Potential des geladenen Konduktors, dessen Flächendichte an verschiedenen Stellen geprüft werden soll, muß bei den einzelnen Versuchen der Vergleichbarkeit halber denselben Wert haben, also durch ein zweites Elektrometer kontrolliert werden.

Bezüglich der quantitativen Verhältnisse ist es notwendig, daß die durch das Probescheibchen übertragene Ladung einerseits ausreiche, um am Elektrometer einen meßbaren Ausschlag zu erzielen, andererseits nicht so groß sei, daß der Ausschlag über den Meßbereich des Instruments hinausgehe.

Zur numerischen Berechnung sei vorausgesetzt, daß mittels eines Probescheibchens von 4 cm^2 Größe von einer Kugel von 5 cm Radius eine Ladung auf ein Exner'sches Elektrometer übertragen werden soll. Um einen bereits gut erkennbaren Ausschlag auf mehreren Skalenteilen zu erhalten, ist eine Ladung des Elektrometers auf etwa $150 \text{ Volt} = 0.5 \text{ st. E.}$ erforderlich; nimmt man dessen Kapazität zu rund 8 cm an, so muß hiernach die Ladung des Probescheibchens etwa $8 \times 0.5 = 4 \text{ st. E.}$ und die Gesamtladung der Kugel (Oberfläche zirka 80 cm^2) rund 80 st. E. betragen. Das Potential, auf welches die Kugel zu laden ist, beträgt daher $V = \frac{80}{5} = 16 \text{ st. E.}$

$= 4800 \text{ Volt}$. Dementsprechend ist als Kontrollinstrument ein Braun'sches Elektrometer mit höherem Meßbereich (bis 10000 Volt) anzuwenden.

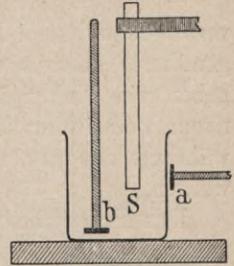
Bei komplizierter gestalteten Konduktoren, bei denen die Flächendichte an verschiedenen Stellen sich nicht ohne weiteres berechnen läßt, wird die geeignete Spannung am besten durch Ausprobieren ermittelt.

Ausführung der Versuche. 1) Ladungsverteilung auf einer Kugel. Der von einem Hartgummistabe getragene kugelförmige Konduktor wird durch einen Draht mit dem Knopfe des Braun'schen Elektrometers verbunden und mittels eines geriebenen Stabes auf zirka 5000 Volt geladen. Das Exner'sche Elektrometer wird mit geerdetem Gehäuse in solcher Entfernung aufgestellt, daß eine direkte Influenzwirkung nicht mehr merklich ist. Von verschiedenen Stellen der Kugeloberfläche werden mittels des Probescheibchens Ladungen auf das Elektrometer übertragen, die sich angenähert als gleich erweisen; der Stiel des Probescheibchens ist vor den Versuchen durch eine Flamme von eventuellen Ladungen zu befreien und auf seine Isolation zu prüfen. Das am Braun'schen Elektrometer abzulesende Potential des Kugelkonduktors ist vor jeder Berührung auf den ursprünglichen Wert zu bringen (durch Nachladung mittels des geriebenen Stabes); ist hierbei die Spannung eine zu große geworden, so erniedrigt

man sie rasch auf den gewünschten Wert, indem man das isolierte System mit einem Halbleiter (Holzstäbchen oder dergl.) berührt.

2) Ladungsverteilung auf einem stabförmigen Leiter. Ein Metallzylinder mit horizontalliegender Achse auf isolierendem Stativ wird an Stelle des Kugelkonduktors eingeschaltet. Durch Ausprobieren ermittelt man jenes Potential des Konduktors, welches am Exner'schen Elektrometer einen passenden Ausschlag hervorbringt, wenn das Probescheibchen in etwa $\frac{1}{4}$ der Länge vom Ende an angelegt wird. Die Flächendichte gegen die Enden zu erweist sich dann als höher, gegen die Mitte zu als niedriger als jene an der Ausgangsstelle.

3) Ladungsverteilung auf einem becherförmigen Konduktor. Auf eine Paraffinplatte wird ein Metallbecher gestellt und mit dem Braun'schen Elektrometer verbunden; analog wie früher ermittelt man das Potential, welches bei Berührung der Stelle a (vergl. Figur) einen passenden Ausschlag liefert: Anlegen des Probescheibchens an der Stelle b liefert dann keinen merklichen Ausschlag, da das Innere des Bechers nahezu als Hohlraum betrachtet werden kann. Wird dagegen ein in ein Stativ geklemmter und zur Erde abgeleiteter Metallstab S in der gezeichneten Lage aufgestellt, so ist auch an der Innenwand die Ladungsdichte von merklicher Größe.

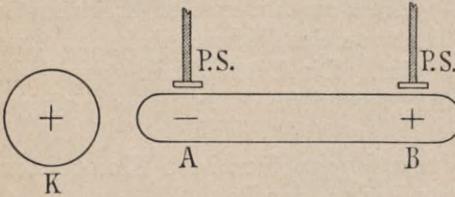


47. Influenz.

Instrumentarium: Exner'sches Elektrometer; Zamboni'sche Säule; Probescheibchen; kugelförmiger Konduktor; stabförmiger Konduktor; Draht; Glasstab mit Lederlappen; Hartgummistab mit Fell; Siegellackstange; Papierstreifen.

Theorie der Versuche. Ein ursprünglich ungeladener und auf dem Potentiale Null befindlicher isolierter Konduktor nimmt bei Annäherung eines geladenen Körpers ein Potential desselben Vorzeichens wie dieser an; die Gesamtladung des influenzierten Körpers bleibt Null, die Verteilung der Oberflächendichte — theoretisch gegeben durch diese Bedingung sowie die Bedingung, daß das Potential der Oberflächenladung zusammen mit dem Potential der influenzierenden Ladung an allen Punkten des influenzierten Körpers den gleichen Wert habe — ist eine derartige, daß auf der dem influenzierenden Körper zugewandten Seite Ladungen von entgegengesetztem Vorzeichen und durch eine Indifferenzzone getrennt auf der abgewendeten Seite Ladungen gleichen Vorzeichens auftreten. Zur Prüfung der Ladungsverteilung werden vom influenzierten Körper mittels des Probescheibchens Ladungen auf ein Elektrometer übertragen. Direkte leitende Verbindung zwischen Konduktor und Elektrometer läßt dagegen den gemeinsamen Potentialwert, den sie annehmen, ermitteln.

Ausführung der Versuche. 1) Verteilung der Influenzladung auf einem stabförmigen Konduktor. Das Exner'sche Elektrometer (mit aufgesetztem Tischchen) wird bei geerdetem Gehäuse mittels der Zambonisäule mit einer positiven Ladung versehen, derart, daß sowohl eine Vergrößerung als eine Verringerung des Ausschlages sich gut konstatieren läßt. In einiger Entfernung wird der stabförmige Konduktor auf isolierendem Stative aufgestellt und zunächst ableitend berührt.



Der kugelförmige Konduktor wird mittels des geriebenen Glasstabes mit einer positiven Ladung versehen und dem Ende A des stabförmigen Leiters auf etwa 5 bis 10 cm genähert. Mittels des Probescheibchens bei A entnommene Ladungen ergeben ein Sinken des Ausschlages am Elektrometer, sind also von negativem Vorzeichen; bei B entnommene Ladungen erweisen sich als positiv, während aus der mittleren Zone keine merklichen Ladungen übertragen werden.

Das Probescheibchen wird dabei flach auf das Tischchen des Elektrometers angelegt, damit die Kapazität des Elektrometers nicht geändert wird. Würde man den Stift des Elektrometers (bei abgenommenem Tischchen) mit dem angehaltenen Probescheibchen berühren, so würde auch bei ungeladenem Probescheibchen infolge Vergrößerung der Kapazität des Systems (vergl. die analogen Versuche über Ladungsteilung, S. 111) der Ausschlag sinken und so eine Übertragung negativer Ladungen vorgetäuscht werden.

Wird statt des Glasstabes der Hartgummistab zum Laden der Kugel verwendet, so kehren sich auch die Vorzeichen der influenzierten Ladungen um.

2) Prüfung des Vorzeichens von Ladungen durch Influenz.

Das Exner'sche Elektrometer wird wieder mittels der Zambonisäule positiv geladen. In einer Entfernung von einigen Metern wird zunächst der Glasstab durch Reibung positiv elektrisiert und dem Elektrometer allmählich genähert; der Ausschlag nimmt zu. Bei Annäherung des negativ elektrisierten Hartgummistabes nimmt der Ausschlag ab. Bei ursprünglich negativer Ladung des Elektrometers ergibt sich das umgekehrte Verhalten. Je nachdem das Vorzeichen der ursprünglichen Elektrometerladung oder das des genäherten influenzierenden Körpers bekannt ist, kann daher die Ladung eines Körpers bzw. eine dem Elektrometer erteilte Ladung auf ihr Vorzeichen geprüft werden.

In der beschriebenen Weise wird das Vorzeichen der Ladung ermittelt, welche entsteht: durch Reibung eines Siegelackstabes an den Kleidern (negativ); beim Durchziehen eines vorher über der Bunsenflamme mäßig erwärmten und daher getrockneten Papierstreifens zwischen den Fingern (negativ); bei Reibung der Kopfhare mit der Hand (positiv).

3) Ladung des Elektrometers durch Influenz. Ein geriebener Glasstab wird dem ursprünglich ungeladenen Elektrometer so weit genähert, daß ein merklicher Ausschlag entsteht; bei dieser Stellung wird das isolierte System des Elektrometers für einen Moment ableitend berührt, so daß die Blättchen zusammensinken. Unmittelbar darauf wird der influenzierende Stab entfernt; die Blättchen divergieren wieder, und zwar — wie eine Prüfung des Vorzeichens nach Versuch (2) ergibt — mit negativer Ladung. Analoger Weise kann dem Elektrometer mittels des Hartgummistabes durch Influenz eine positive Ladung erteilt werden.

4) Potential eines influenzierten Leiters. Der stabförmige Konduktor wird mit dem Elektrometer (Klemmschraube statt Tischchens aufgesetzt) durch eine Drahtleitung dauernd verbunden, indem man sie in die bei B angebrachte Drahtöse einhängt. Durch Annäherung des positiv geladenen Kugelkonduktors, wie in Versuch (1), entsteht ein Ausschlag des Elektrometers, und zwar — wie Prüfung des Vorzeichens nach Versuch (2) ergibt — mit positiver Ladung. Wird die Drahtleitung statt bei B bei A eingehängt, so ergibt sich dasselbe Resultat; denn das gesamte System: Elektrometer, Verbindungsleitung und Konduktor, nimmt durch Influenz bei der Annäherung der positiv geladenen Kugel einen gemeinsamen positiven Potentialwert an.

48. Kondensator.

Instrumentarium: Plattenkondensator; Exner'sches Elektrometer; Zamboni'sche Säule; Draht; Paraffinplatte; Schwefelplatte; Bunsenbrenner.

Beschreibung des Apparates. Der Plattenkondensator besteht aus zwei vertikalstehenden kreisrunden Metallscheiben, die von isolierenden Glasstützen getragen werden; die eine Stütze ist fix, die andere in einer Schlittenführung horizontal verschiebbar, so daß die Distanz der beiden Kondensatorplatten zwischen Null und einigen Dezimetern beliebig variiert werden kann. Justierschrauben am unteren Ende der Stützen gestatten eine genaue Parallelstellung der beiden Platten, Klemmschrauben an diesen das Einspannen von Verbindungsleitungen.

Ausführung der Versuche. 1) Änderung der Kapazität und des Potentials bei konstanter Ladung. Die beiden Platten des Kondensators werden auf maximale Distanz voneinander entfernt, die bewegliche Platte mit einer Erdleitung, die fixe mit dem Exner'schen Elektrometer verbunden. Nach Laden des isolierten Systems mittels der Zambonisäule wird die Isolation geprüft und eventuell verbessert (vergl. S. 108).

Nun wird diesem System eine Ladung erteilt, die einen Ausschlag von 10 bis 15 Skalenteilen hervorruft. Durch Heranschieben der beweglichen geerdeten Platte verringert sich der Ausschlag, eventuell bis zur Unmerklichkeit, wenn die Distanz der Platten vorsichtig (so daß keine Berührung eintritt) auf etwa 1 mm oder noch weniger verringert wird. Da bei Vernachlässigung der Verluste durch mangelhafte Isolation und durch Zer-

streuung in der Luft die Ladung des isolierten Systems konstant bleibt, ist das abgelesene Potential umgekehrt proportional der jeweiligen Kapazität. Die Kapazität des Plattenkondensators allein ist aber gegeben durch:

$C = K \frac{f}{4 \pi d}$, wenn K die Dielektrizitätskonstante des Mediums (hier Luft mit $K = 1$), f die Fläche und d die Distanz der parallelen Platten bedeutet. Beim Auseinanderziehen erhöht sich wieder das Potential entsprechend der Abnahme der Kapazität.

2) Einfluß der Dielektrizitätskonstante des Mediums. Entsprechend der obigen Formel ist die Kapazität eines Plattenkondensators bei konstanter Distanz proportional der Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen den Platten. Wird daher die Luft durch einen festen Isolator größerer Dielektrizitätskonstante ersetzt, so erfolgt eine Abnahme des Potentials ebenso wie bei einer durch Annäherung der Platten hervorgebrachten Kapazitätsvergrößerung.

Die Aufstellung ist analog wie bei Versuch (1); die Platten werden auf solche Distanz eingestellt, daß eine Paraffinplatte ($K = 2$) eben ohne Anstreifen zwischen sie eingeschoben werden kann. Bei Abwesenheit der Paraffinplatte wird dann mittels der Zambonisäule ein passender Ausschlag hergestellt und seine Verringerung beim Einschieben der Platte beobachtet.

Eigenladungen des Dielektrikums würden durch ihre Influenzwirkung die zu demonstrierende Erscheinung stören; es ist daher die Paraffinplatte vor der Ausführung des Versuches sorgfältig über einer Flamme zu entelektrisieren und weiterhin vor Berührungen, die eine Ladungserregung durch Reibung hervorrufen könnten, zu schützen.

Noch deutlicher wird die Abnahme des Potentials bei Verwendung einer Schwefelplatte ($K = 4$).

49. Strommesser.

Instrumentarium: Demonstrationsampèremeter; Demonstrationsgalvanometer mit 2 Magneten, 2 Spulen, Dämpfer, Dreifuß und Tangentenbussolenring; Akkumulator; Rheostat für Starkstrom; Stöpselrheostat; Stromschlüssel; kleiner Magnetstab.

Beschreibung und Theorie der Apparate. I. Demonstrationsampèremeter. Das Prinzip des Apparates ist folgendes: eine vertikalstehende Spule vom Widerstande w wird von dem zu messenden Strome durchflossen und zieht hierbei einen an einer Spiralfeder hängenden Stab aus weichem Eisen um so mehr in ihr Inneres hinein, je stärker ihr Strom ist. Die Bewegung des Stabes wird durch Hebelübertragung einem Zeiger mitgeteilt, der sich vor einer Skala bewegt; die Teilung ist empirisch angefertigt (durch Vergleich mit Normalinstrumenten) und gibt direkt die Stromstärke in Ampere an.

Wie aus der Figur ersichtlich, ist die Bezifferung der Skala eine doppelte, die obere mit Intervallen von 0,1 A und Meßbereich bis 2 A, die untere mit Intervallen von 0,5 A und Meßbereich bis 10 A.

Welche Skala als gültig zu betrachten ist, hängt von der Schaltung ab. Die Zu- und Ableitung des Stromes erfolgt stets bei den Klemmen A und B (die Richtung des Stromes ist beliebig); der bewegliche Bügel (vergl. Figur) kann aber entweder eine praktisch widerstandslose leitende Verbindung zwischen C und D herstellen oder zur Seite gedreht werden.

Wie aus dem Schaltungsschema hervorgeht, liegt zwischen A und C die eigentliche Spule des Amperemeters vom Widerstande w Ohm, zwischen A und D eine (an der Rückseite des Brettes befestigte) Drahtwicklung vom Widerstande w' . Ist die Verbindung zwischen C und D unterbrochen, so durchfließt der eingeschaltete Strom J einfach die Amperemeterspule, und die obere Teilung (0—2 A) gibt die Stromstärke an. Wird dagegen die Verbindung von C und D durch den Bügel hergestellt, so ist der Widerstand w' der Spule parallel geschaltet (sogenannter »Nebenschluß«); der zugeführte Strom J teilt sich also in zwei Zweige, i in der Spule und i' im Nebenschluß.

Entsprechend den Kirchhoff'schen Gesetzen über Stromverzweigung gelten die beiden Bedingungsgleichungen:

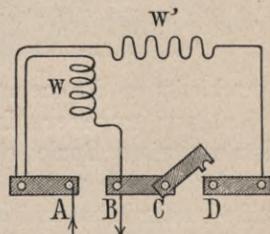
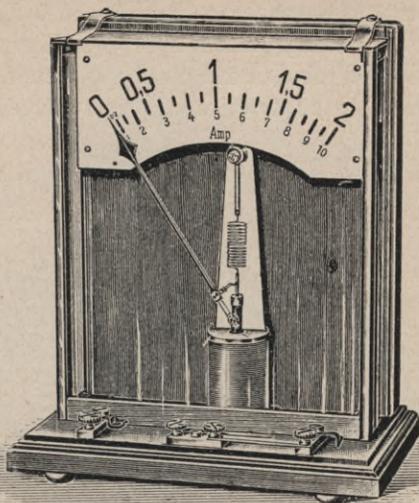
$$\begin{aligned} i + i' &= J \\ i : i' &= w' : w \end{aligned}$$

Hieraus folgt:

$$J = i \left[1 + \frac{w}{w'} \right]$$

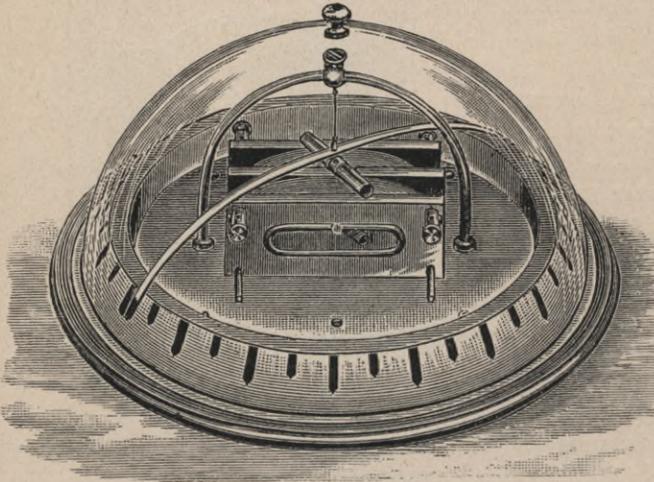
Da der Widerstand w' bei der Herstellung des Instrumentes auf $\frac{w}{4}$ justiert wurde, ist somit im speziellen Falle $J = 5i$, die Stromstärke im unverzweigten Teile der Leitung außerhalb des Instrumentes ist fünfmal so groß als der die Spule durchfließende Strom, und es gilt daher die untere Teilung.

Die Absolutwerte von w und w' in Ohm sind an der Rückseite des



Apparates angegeben; dort befindet sich auch eine der vorderen entsprechende Teilung, welche für den Experimentator bestimmt ist, wenn die Vorderseite dem Auditorium zugewendet ist.

II. Demonstrationsgalvanometer. Das auf S. 106 beschriebene Ma-



gnetometer wird durch Einstecken von zwei Spulen zu einem Galvanometer ergänzt. Sollen die Schwingungen des Magnets stärker gedämpft werden, so kann in die eine Spule eine geschlitzte Kupferhülse eingesteckt werden. Das Galvanometer kann in verschiedenen Schaltungen, die

verschiedenen Stromempfindlichkeiten entsprechen, verwendet werden:

a) nur unterer Magnet eingehängt, parallel der Windungsebene der Spulen; eine Spule eingeschaltet. Die Empfindlichkeit kann in dieser Schaltung noch variiert werden, indem man die Spule längs der Führungsstifte bis zur Mitte schiebt (maximale Empfindlichkeit) oder weiter herauszieht.

b) nur unterer Magnet; beide Spulen hintereinandergeschaltet; der Strom muß die beiden Spulen derart durchlaufen, daß jede Spule im selben Sinne ablenkend wirkt. Die Klemmschrauben der Spulen S und S' und auch die freien Enden der bereits angelegten doppeldräftigen Zuleitungen sind daher mit den Buchstaben A und E (Anfang und Ende) resp. A' und E' bezeichnet; die richtige Schaltung ist also: Zuleitung zu A, Verbindung von E mit A', Ableitung von E'. Die Empfindlichkeit ist doppelt so groß wie in Schaltung a. Der an der Skala abzulesende Ausschlag a ist der Stromstärke i nicht genau proportional; die Zurückführung der Ablesung auf absolute Werte erfolgt durch empirische Ermittlung der Funktion $a = f(i)$, indem man in folgender Weise bekannte Werte der Stromstärke herstellt:

Eine bekannte elektromotorische Kraft (z. B. ein Akkumulator oder ein galvanisches Element) E wird durch einen Stöpselrheostaten und durch die Galvanometerspule (resp. die beiden hintereinandergeschalteten Spulen) geschlossen. Die Stromstärke berechnet sich zu

$$i = \frac{E}{W + \omega}$$

wobei W den — willkürlich variablen — Widerstand im Rheostaten, ω den Widerstand der Galvanometerspule (resp. die Summe der beiden hinter-

einandergeschalteten Spulenwiderstände) bezeichnet. Der Wert von ω ist am Rahmen der Spulen angegeben.

c) Differentialgalvanometer. Die beiden Spulen S und S' besitzen die gleiche Windungszahl und den gleichen Widerstand; stehen sie daher symmetrisch in gleicher Entfernung zu beiden Seiten des Magnets, so kompensieren sie sich in ihrer ablenkenden Wirkung, wenn sie in entgegengesetztem Sinne (A — E und E' — A') vom selben Strome durchflossen werden. Sind die Stromstärken i und i' verschieden, so ist der Ausschlag durch die Differenz ($i - i'$) gegeben, und die Empfindlichkeit ist hierbei dieselbe wie in Schaltung (a). Auf diese Weise können zwei voneinander unabhängige nahe gleiche Ströme, die einzeln den Meßbereich des Galvanometers überschreiten würden, mit großer Genauigkeit miteinander verglichen werden.

d) Astatiches Galvanometer. Der bisher allein verwendete Magnet in der unteren Hülse erfährt bei einer Verdrehung um den Winkel φ aus seiner Ruhelage ein Drehungsmoment $MH \sin \varphi$, wenn M sein magnetisches Moment, H die Horizontalkomponente des erdmagnetischen Feldes bezeichnet. Hierzu kommt noch das von der Torsion des Aufhängefadens herrührende Drehungsmoment, welches praktisch gegen das obige zu vernachlässigen ist. Unter dem Einflusse eines Stromes nimmt der Magnet eine Lage an, bei der diese beiden Drehungsmomente das von der Spule herrührende kompensieren.

Wird ein zweiter Magnet vom Moment M' ($M' < M$) in umgekehrter Lage (N-Pol nach Süden) in die obere Hülse gesteckt, so ist das Drehungsmoment des erdmagnetischen Feldes gleich: $(M - M') H \sin \varphi$, also bedeutend verkleinert, wenn M' nahezu gleich mit M ist. Für $M' = M$ würde das Drehungsmoment des Erdfeldes gänzlich verschwinden und nur das der Aufhängung überbleiben, für $M' > M$ würde es seinen Sinn umkehren. In jedem Falle ist das rücktreibende Drehungsmoment beträchtlich verkleinert. Das Drehungsmoment der stromdurchflossenen Spule dagegen ist bei dieser Anordnung vergrößert, da der zweite Magnet außerhalb der Spule und mit verkehrten Polen liegt, also entsprechend der Ampere'schen Schwimmerregel eine Ablenkung im gleichen Sinne wie der untere Magnet erfährt. Der Ausschlag, den ein bestimmter Strom in Schaltung (a) oder (b) hervorruft, wird daher durch Anwendung des astatischen Magnetsystems bedeutend vergrößert.

III. Tangentenbusssole. Auf einem Dreifuß ist ein vertikalstehender Ring aus starkem Kupferdraht von zirka 16 cm Durchmesser befestigt. Auf das Tischchen des Dreifußes paßt das Magnetometer bzw. Demonstrationsgalvanometer. Die Spulen des Galvanometers können hierbei entfernt werden oder belassen und nicht weiter verwendet werden. Der Mittelpunkt des unteren Magneten (der hier allein eingesteckt wird) liegt bei dieser Aufstellung im Zentrum des Kupferinges. Wird durch diesen ein Strom geleitet (der Ring ist am tiefsten Punkte durchschnitten und mit zwei

Klemmschrauben versehen), so wirkt der Apparat als Tangentenbussole mit einer Windung.

In der Gleichung zwischen Stromstärke J und Ausschlagswinkel φ :

$$J = C \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

ist der »Reduktionsfaktor« C , d. i. diejenige Stromstärke, für welche $\varphi = 45^\circ$ und daher $\operatorname{tg} \varphi = 1$ ist, gegeben durch:

$$C = \frac{RH}{2\pi} \text{ (absolute elektromagnetische Einheiten)}$$

bezw., da 1 abs. E. = 10 A, durch:

$$C = 5 \frac{RH}{\pi} \text{ A}$$

Hierbei bezeichnet R den mittleren Radius des Ringes in cm, H die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus. Der Wert des Reduktionsfaktors ist also durch Ausmessen des Ringes und Einsetzen des für den Beobachtungsort giltigen Wertes von H (Tabelle 23 in Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik) leicht zu berechnen.

Ausführung der Versuche. 1) Strommessung mit Ampèremeter. Die eine Klemme (z. B. A) des Instruments wird direkt mit dem einen Pole der Leitung am Gleichstrom-Schaltbrett (110 Volt) verbunden, die andere mit dem zweiten Pole unter Zwischenschaltung einer 50-kerzigen Glühlampe und eines Stromschlüssels; die Stromstärke beträgt rund 1 A, ist daher bei ausgeschaltetem Nebenschluß (zur Seite gedrehtem Bügel CD) an der oberen Skala abzulesen. Bei Einschaltung des Bügels sinkt der Ausschlag auf $\frac{1}{5}$ des früheren Wertes, ist daher nur ungenau abzulesen.

Analog wird der Strom durch zwei hintereinander und durch zwei parallel geschaltete Glühlampen bestimmt; er ergibt sich im ersten Fall zu zirka 0.5 A, im zweiten zu 2 A.

Wird die Stromrichtung im Ampèremeter durch Vertauschung der Zuleitungen umgekehrt, so ändert sich der Sinn des Ausschlages hierdurch nicht.

2) Prüfung der Ampèremerteilung mit Tangentenbussole. Zur Kontrollierung der Richtigkeit der Teilung wird in den Stromkreis des vorigen Versuches (Schaltbrett — 2 parallel geschaltete Glühlampen — Ampèremeter) noch die oben beschriebene Tangentenbussole eingeschaltet.

Zur Justierung der Tangentenbussole wird zunächst bei abgehobener Glocke die Fixierungsschraube am oberen Ende des Bügels gelüftet und der Stift, an welchem die Suspension befestigt ist, vorsichtig so weit gehoben, daß der Magnet frei schwingt, und dann wieder fixiert. Der Zeiger wird am besten senkrecht zur Magnetachse gestellt und hierauf der Dreifuß derart orientiert, daß die Ebene des Kupferingens in den magnetischen Meridian fällt.

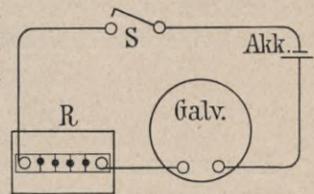
Durch Unterlegen von drei Keilen unter die Füße des Apparates wird erzielt, daß die vertikale Verlängerung der Fadensuspension durch das Zentrum des Teilkreises geht und daß der Zeiger auf beiden Seiten nahezu

gleich hoch über der Teilung schwebt. Bei wiederaufgesetzter Glasglocke wird das Magnetometer auf dem fixbleibenden Dreifußtischchen so gedreht, daß die Ruhelage des Zeigers auf die Teilstriche 0° und 180° fällt. Die Zuleitung zu den Klemmen des Ringes wird mit biegsamen Litzen (nicht mit steifen Drähten) hergestellt, damit keine Verschiebung des Instrumentes aus der justierten Position erfolge.

3) Bestimmung der Empfindlichkeit des Demonstrationsgalvanometers in verschiedenen Schaltungen. Das Galvanometer wird auf den einfachen Dreifuß aufgesetzt und mittels der drei Keile justiert, wie oben beschrieben; der Magnet steht parallel der Windungsebene der Spulen, der zum Magnet senkrechte Zeiger daher wieder auf 0° und 180° . Für Versuche vor einem Auditorium kann bei unveränderter Stellung der Grundplatte, also des Magnets und der Spulen, der separat bewegliche Teilkreis und der Zeiger um einen beliebigen Winkel verdreht werden, so daß der Nullpunkt dem Auditorium zugewendet ist. Die Spulen sind ganz zur Mitte geschoben.

a) Schaltung mit einer Spule. Zur Ermittlung der Empfindlichkeit wird ein Stromkreis hergestellt aus einem Akkumulator ($E = 2$ Volt), einem Stromschlüssel, einem Stöpselrheostaten (vergl. S. 168) und dem Galvanometer unter Verwendung bloß einer Spule (vgl. Schaltungsskizze in der Figur).

Man kontrolliert zunächst den Nullpunkt bei noch geöffnetem Stromschlüssel; hierauf wird im Rheostat zunächst ein Widerstand von 2000 Ohm eingeschaltet. Nach Schließen des Schlüssels entsteht ein Ausschlag, dem ein Schwingen um eine neue Ruhelage folgt. Man kann entweder (bei stärkerer Dämpfung) die Einstellung in die neue Ruhelage (Ablenkung α_1) abwarten, oder (zur Zeitersparnis bei geringer Dämpfung) die Ruhelage berechnen aus den beobachteten Umkehrpunkten nach dem bei der Wage üblichen Verfahren (vergl. Kohlrausch, Leitfaden S. 27).



Die Stromstärke i_1 wird berechnet aus: $i_1 = \frac{E}{w_1 + \omega}$, indem man für ω den angeschriebenen Wert einsetzt (vergl. S. 121). In analoger Weise werden die Ausschläge $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ bestimmt, die den Stromstärken i_2, i_3, i_4 entsprechen bei Einschaltung der Widerstände $w_2 = 1000, w_3 = 500$ und $w_4 = 200$ Ohm. Die berechneten Werte von i werden auf Millimeterpapier als Abszissen, die Werte von α als Ordinaten eingetragen und die so erhaltenen Punkte durch eine Kurve verbunden. Für kleine Ablenkungen ist α proportional i , und der Quotient $\frac{i}{\alpha}$ stellt den Reduktionsfaktor des Instrumentes dar. Es ergibt sich, daß 1° Ausschlag zirka $7 \cdot 10^{-5}$ A entspricht. Bei größeren Ausschlägen bleibt α etwas hinter der Proportionalität mit i zurück, der Reduktionsfaktor nimmt daher größere Werte an.

Wird die stromdurchflossene Spule von der Mitte entfernt, so nimmt die Empfindlichkeit ab.

b) Schaltung mit zwei Spulen. Die Hintereinanderschaltung der beiden Spulen (vergl. S. 120) ergibt bei gleicher Stromstärke den doppelten Ausschlag wie bei Schaltung a.

c) Prüfung des Differentialgalvanometers. Die Zuleitungen zur zweiten Spule werden kommutiert, so daß der Strom in der Richtung $A-E-E'-A'$ oder umgekehrt fließt. Wenn die Spulen exakt symmetrisch stehen, darf bei Schließen des Stromkreises kein Ausschlag entstehen.

d) Astatisches Galvanometer. Es wird wieder die Schaltung (a) hergestellt und der zweite Magnet in die obere Hülse gesteckt. Um die Lage der Pole richtig zu wählen, prüft man die des zweiten Magneten vorher durch die Anziehung oder Abstoßung des ersten bei Annäherung. Sollte das astatische Magnetsystem bei Stromlosigkeit der Spulen eine gegenüber dem einfachen Galvanometer veränderte Ruhelage aufweisen, so wird unter dem Dreifuß auf die Tischfläche ein kleiner Hilfsmagnet gelegt, welcher den näheren unteren Magnet stärker beeinflusst als den oberen, und welcher derart orientiert wird, daß das astatische System die ursprüngliche Ruhelage annimmt.

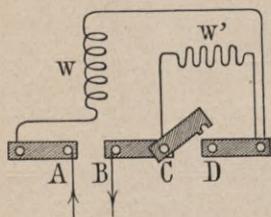
Die Prüfung der Empfindlichkeit erfolgt in analoger Weise wie früher bei größtem Werte von w (2000 Ohm) und ergibt gegenüber der Schaltung (a) eine beträchtliche Erhöhung der Empfindlichkeit.

50. Spannungsmesser.

Instrumentarium: Demonstrationsvoltmeter; Akkumulator; Chromsäureelement; Leclanché-Element; Daniel'sches Element; Exner'sches Elektrometer; Wasserwiderstand; Demonstrationsgalvanometer; Stöpselrheostat.

Beschreibung und Theorie der Apparate. I. Demonstrationsvoltmeter. Das Demonstrationsvoltmeter ist dem auf S. 118 beschriebenen

Demonstrationsampèremeter vollständig analog gebaut, nur die Schaltung der Spule und des Ergänzungswiderstandes an der Rückseite des Brettes ist verändert. Die Klemmen A und B dienen zur Zu- und Ableitung des Stromes, zwischen A und D liegt die Spule mit dem Widerstande w , zwischen C und D der Ergänzungswiderstand w' . Ist der Bügel CD eingeschaltet, so liegt bloß der Spulenwiderstand w zwischen A und B; ist dagegen CD geöffnet, so ist w' als Vorschaltwiderstand mit w hintereinandergeschaltet.



Allgemein ist in einer Leitung vom Widerstande w , die von einem Strom i durchflossen wird, das Produkt $i w = V$, der Potentialdifferenz zwischen den Enden dieser Leitung. Die obere Teilung (0 bis 3 Volt) ist nun derart beziffert, daß die einem bestimmten Ausschlage (Stromstärke)

entsprechende Zahl bereits das Produkt aus der in Ampere gemessenen Stromstärke in der Spule und dem in Ohm ausgedrückten Spulenwiderstande, somit die Potentialdifferenz der beiden Spulenden in Volt angibt. Wird bei geschlossenem Bügel CD eine Stromquelle (galvanisches Element etc.) an die Klemmen A und B angeschaltet, so ist unter der Voraussetzung, daß der innere Widerstand des Elementes und der Widerstand der Zuleitung klein gegen w sei, diese Potentialdifferenz zugleich die Größe der elektromotorischen Kraft E der Stromquelle. Ist aber der Widerstand der äußeren Leitung (ω) nicht zu vernachlässigen, so gilt: $E = V \frac{w + \omega}{w}$, wenn V die am Voltmeter abgelesene Spannung bezeichnet.

Durch Öffnen der Verbindung CD und somit Einschaltung des Vorschaltwiderstandes w' wird die Potentialdifferenz zwischen A und B bei gleichem Ausschlage auf den Betrag $V(1 + \frac{w'}{w})$ erhöht. Da hier $w' = 9w$ ist, gilt dann der zehnfache Wert, der direkt an der unteren Skala abzulesen ist. Hierdurch ist also zugleich der Meßbereich des Apparates bis 30 Volt ausgedehnt. Ist $(w + w')$ bekannt — beim Demonstrationsvoltmeter auf der Rückseite der Skalenplatte aufgeschrieben —, so kann mittels eines Stöpselrheostaten noch ein beliebiger Widerstand vorgeschaltet werden, so daß der Gesamtwiderstand ein rundes Vielfaches (z. B. das 20-, 50- oder 100-fache) des Spulenwiderstandes w wird; damit erhöht sich entsprechend der Meßbereich und der Wert des Skalenteiles in Volt.

II. Demonstrationsgalvanometer als Spannungsmesser. In ähnlicher Weise kann bei bekanntem Spulenwiderstand das im vorigen Abschnitt beschriebene Demonstrationsgalvanometer als Spannungsmesser verwendet werden, wenn man die der Eichabelle zu entnehmenden Werte der Stromstärke für einen bestimmten Ausschlag mit dem Spulenwiderstande multipliziert.

Handelt es sich darum, möglichst kleine Spannungen (z. B. von Thermoelementen oder dergl.) nachweisen zu können oder, wie man sich auch ausdrückt, »möglichst hohe Volttempfindlichkeit« des Apparates zu erlangen, so ist bezüglich der Schaltung der Spulen folgendes zu berücksichtigen:

In Schaltung (a) (vergl. S. 123), also bei einer Spule, entspricht einem Ausschlage von 1^0 ein bestimmter Strom von i Ampere resp. eine Potentialdifferenz von $i w$ Volt. Wird die zweite Spule in Hintereinanderschaltung mit der ersten benutzt (Schaltung b), so ist zwar die Stromempfindlichkeit des Galvanometers verdoppelt, ebenso aber auch sein Widerstand; dem Ausschlage von 1^0 entspricht daher dieselbe Potentialdifferenz wie im vorigen Falle, oder die »Volttempfindlichkeit« ist dieselbe geblieben. Werden dagegen die beiden Spulen S und S' parallel geschaltet, so teilt sich der eingeleitete Strom J in zwei gleiche Zweigströme $\frac{J}{2}$; der Ausschlag ist derselbe, als ob in Schaltung (a) der ganze Strom J die eine Spule durch-

fließen würde, da die beiden Spulen, von je $\frac{J}{2}$ durchflossen, ihre Wirkungen summieren. Die Stromempfindlichkeit ist also gegenüber Schaltung (a) nicht verändert; die Spannung aber, welche diesen Strom hervorruft, ist nun $\frac{J}{2} w$, also nur halb so groß wie jene, die bei Schaltung (a) den gleichen Ausschlag hervorruft; die Voltempfindlichkeit des Apparates ist also durch die Parallelschaltung der beiden Spulen verdoppelt.

Ausführung der Versuche. 1) Prüfung verschiedener galvanischer Elemente mit dem Demonstrationsvoltmeter. Bei geschlossenem Bügel CD (obere Skale bis 3 Volt giltig) werden der Reihe nach ein Chromsäureelement, ein Leclanché-, ein Daniel-Element und ein Bleiakkumulator unter Zwischenschaltung eines Stromschlüssels mit A und B verbunden und ihre EMK bestimmt.

Für zwei hintereinandergeschaltete Akkumulatoren (4 Volt) reicht der Meßbereich nicht mehr aus, es ist daher der Bügel zu öffnen und die untere Skale zu benutzen.

2) Bestimmung der Spannung am Gleichstrom-Schaltbrett. Der Widerstand ($w + w'$) des Voltmeters wird abgelesen, und in einem vorgeschalteten Stöpselrheostaten der Widerstand $\omega = 9(w + w')$ gezogen. Die freien Enden (Klemme A und freies Ende des an B angeschalteten Rheostaten) werden unter Zwischenschaltung eines Stromschlüssels mit den Polklemmen des Gleichstromschaltbrettes verbunden. Zur Umrechnung des Ausschlages in Volt ist die Ablesung an der oberen Skala mit 100 resp. die an der unteren mit 10 zu multiplizieren (also Meßbereich bis 300 Volt). Das Resultat ergibt rund $V_G = 110$ Volt. In analoger Weise wird A mit der positiven Klemme des Schaltbrettes, das freie Ende von ω mit der Erdleitung verbunden und die Potentialdifferenz V_1 : positives Kabel—Erde ermittelt und hierauf ebenso in einem dritten Versuche die Potentialdifferenz V_2 : negatives Kabel—Erde.

Sind V_1 und V_2 von gleichem Vorzeichen, so ist $(V_1 - V_2) = V_G$; sind sie entgegengesetzt, so ist: $(V_1 + V_2) = V_G$.

3) Eichung eines Exner'schen Elektrometers. Von einem Exner'schen Elektrometer (vergl. S. 109) wird das Gehäuse zur Erde abgeleitet, der Knopf zunächst mit dem positiven, dann mit dem negativen Pole des Gleichstromschaltbrettes verbunden, unter Zwischenschaltung eines Stromschlüssels und eines großen Flüssigkeitswiderstandes, bestehend aus einer mit Wasser gefüllten U-Röhre, durch deren Korke Drähte als Elektroden hindurchführen. Die Einschaltung dieses großen Widerstandes ist eine Vorsichtsmaßregel, welche verhüten soll, daß bei einem zufälligen Anschlagen eines Blättchens an das Gehäuse ein Kurzschluß eintrete und das Elektrometer beschädigt werde. Solange Blättchen und Gehäuse sich nicht berühren, ist natürlich die Größe des Widerstandes ohne Einfluß auf die Spannung.

Die den früher in Versuch (2) gemessenen Spannungen V_1 und V_2 ent-

sprechenden Ausschläge werden abgelesen und mit den Angaben der dem Elektrometer beigegebenen Eich-tabelle verglichen.

4) Berechnung der Volttempfindlichkeit des Demonstrationsgalvanometers. Unter Zugrundelegung der in Versuch 49 II (S. 120) ermittelten Werte für den Reduktionsfaktor des Galvanometers in verschiedenen Schaltungen, wird berechnet, welche Potentialdifferenz einen Ausschlag von 1^0 hervorruft bei Verwendung eines Magnetes und a) einer Spule allein, b) beider Spulen hintereinander, c) beider Spulen parallel, d) bei Anwendung des astatischen Magnetsystems. Eine praktische Verwendung des Instrumentes als Spannungsmesser erfolgt später bei der Prüfung von Thermosäulen.

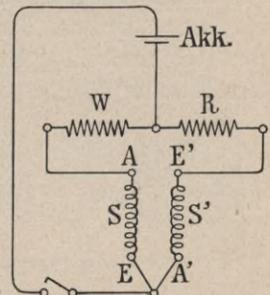
51. Widerstandsbestimmung.

Instrumentarium: Demonstrationsgalvanometer; Stöpselrheostat; Meßdraht; Vergleichswiderstand; Schaltbrett mit Glühlampen; Induktionsspule; Akkumulator.

Theorie der Versuche. I. Substitutionsmethode. Die prinzipiell einfachste Methode der Bestimmung eines Widerstandes besteht darin, in einem Stromkreise, der eine konstante EMK, einen Strommesser (Galvanometer) und den zu messenden Widerstand w enthält, diesen zu ersetzen durch einen bekannten Widerstand willkürlich variabler Größe R (Stöpselrheostat); wird der Rheostat derart reguliert, daß die Stromstärke i_2 — welche in willkürlichen Einheiten gemessen werden kann — ebenso groß ist wie die Stromstärke i_1 bei Einschaltung des zu bestimmenden Widerstandes, so ist auch $w = R$, da die EMK der Voraussetzung nach dieselbe geblieben ist und ebenso die Widerstände des Galvanometers, der Zuleitung und des Elementes in beiden Versuchen identisch sind.

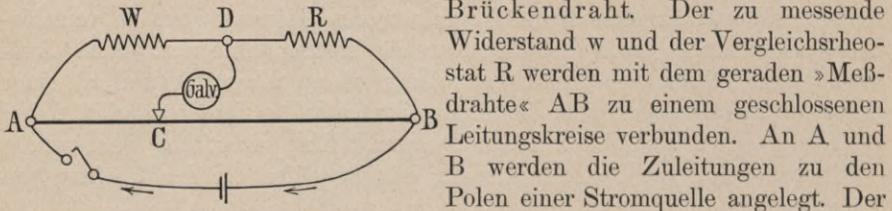
Diese Methode erfordert eine Stromquelle konstanter elektromotorischer Kraft und einen hinreichend fein abstufbaren Stöpselrheostaten. Die Genauigkeit des Resultates ist dieselbe, mit welcher die Gleichheit der Ausschläge des Strommessers in den beiden Versuchen konstatiert werden kann, also z. B. $\pm \frac{1}{10}^0$, wenn ein Ausschlag von 50^0 auf $\pm \frac{1}{2}^0$ genau abzulesen ist.

II. Widerstandsbestimmung mit Differentialgalvanometer. Der von einer Stromquelle gelieferte Strom wird in zwei Zweige geteilt, einerseits durch den zu messenden Widerstand w und die Spule S des Galvanometers, andererseits durch den Vergleichsrheostaten R und die Spule S' ; diese muß dabei in entgegengesetzter Richtung durchlaufen werden wie S (vergl. S. 121). Ist der Ausschlag des Galvanometers gleich Null, so ist auch $i = i'$ und daher auch $(w + \omega) = (R + \omega')$; da aber bei einem korrekten Differentialgalvanometer die Spulenwiderstände ω und ω' gleichgemacht sind, ergibt sich: $w = R$. Die EMK braucht bei dieser Methode nicht



konstant zu sein, da ihre eventuellen Variationen die Ströme i und i' in gleichem Verhältnisse beeinflussen. Der Vergleichsreostat muß wie bei Methode I hinreichend fein abstufbar sein.

III. Widerstandsmessung mit Wheatstone-Kirchhoff'schem Brückendraht.



Der zu messende Widerstand w und der Vergleichsreostat R werden mit dem geraden »Meßdrahte« AB zu einem geschlossenen Leitungskreise verbunden. An A und B werden die Zuleitungen zu den Polen einer Stromquelle angelegt. Der Punkt D zwischen den beiden Widerständen wird durch ein Galvanometer mit dem längs des Drahtes AB verschiebbarem Schleifkontakte C verbunden.

Wenn die Gleichung:

$$\frac{w}{AC} = \frac{R}{CB}$$

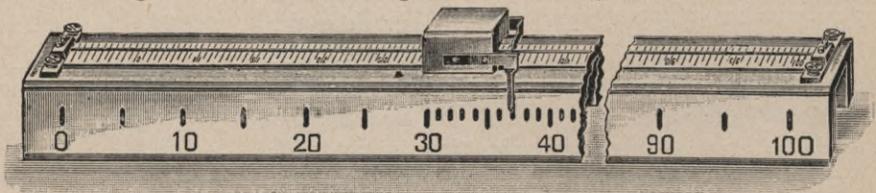
erfüllt ist, sind die Potentiale der Punkte C und D gleich, daher die Verbindung (»Brücke«) durch das Galvanometer stromlos. Man findet also:

$w = R \frac{AC}{CB}$; das Widerstandsverhältnis $\frac{AC}{CB}$ ist bei einem korrekten Meßdrahte (homogener Beschaffenheit und gleichmäßiger Dicke) durch das Längenverhältnis der beiden Stücke gegeben; zur Vereinfachung der Berechnung dienen Tabellen (z. B. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik,

Tabelle 52), in denen der Quotient $\frac{x}{1-x}$ für stufenweise Änderung von x um 0.001 1 angegeben ist.

Da der Wert dieses Quotienten durch Verschieben des Schleifkontaktes beliebig variiert werden kann, genügt prinzipiell ein unveränderlicher Vergleichsreostat R zur Bestimmung beliebiger Widerstände; die unvermeidlichen Fehler der Einstellung beeinflussen aber das Resultat am wenigsten, wenn diese in der Mitte erfolgt, also $w = R$ ist; für Messungen möglichst großer Genauigkeit ist daher ein Vergleichswiderstand von der gleichen Größenordnung wie der zu messende vorteilhaft; feine Abstufbarkeit von R , die bei den Methoden I und II erforderlich ist, wird aber hier entbehrlich.

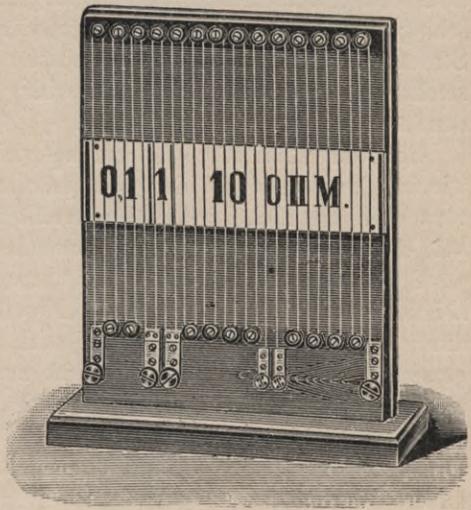
Beschreibung der Apparate. Das zur Verwendung kommende Demonstrationsgalvanometer wurde bereits S. 120 beschrieben. Als Zuleitung sind biegsame Drähte oder Drahtspiralen zu verwenden (vgl. S. 166). Der Meßdraht ist zur beliebigen Verwendung für Demonstrationsversuche oder für exaktere Messungen eines einzelnen Experimentators folgendermaßen konstruiert:



Auf einem Holzsockel von etwa 106 cm Länge ist ein Maßstab von 1 m Länge, in mm geteilt, befestigt; an der vorderen Wand des Sockels befindet sich eine auf größere Entfernung hin sichtbare Teilung mit dicken, großbezahlten Strichen, die im Intervall von 30 bis 70 cm in cm, sonst in $\frac{1}{2}$ dm geteilt ist. Über der mm-Skala liegt ein ebenfalls gerade 1 m langer Konstantendraht (dessen Widerstand mit der Temperatur nur sehr wenig veränderlich ist) zwischen 2 Doppelklemmen eingespannt. Als Gleitkontakt dient eine senkrecht zum Drahte stehende Metallschneide, die auf einem Schlitten längs der Teilung verschiebbar ist. Die Stelle, an welcher diese federnde Schneide in niedergedrücktem Zustande den Draht berührt, wird vom Experimentator selbst an der mm-Teilung auf Bruchteile eines mm genau, vom Auditorium an einem auf dem Schlitten befestigten, über die grobe Teilung reichenden Zeiger auf cm genau abgelesen. Eine mit der Schneide leitend verbundene Klemmschraube auf dem Schlitten gestattet die Anschaltung eines biegsamen Kabels, das vom Gleitkontakt zum Galvanometer führt. (Ohne Schlitten, mit Magnetträger an seiner Stelle, ist dieser Sockel samt Teilung für die Bestimmung magnetischer Momente verwendbar; vergl. S. 106.)

Der Konstantendraht, dessen Enden mit der Stromquelle verbunden werden, besitzt einen Widerstand von zirka 0.2 Ohm, soll aber dauernd höchstens mit 2.5 A Stromstärke beansprucht werden, damit nicht durch zu starke Erwärmung der Apparat Schaden leide. Es ist daher in die Zuleitung zur Stromquelle ein — am besten federnder — Stromschlüssel einzuschalten, der nur während der eigentlichen Messung vorübergehend auf einige Sekunden geschlossen wird, da sonst eine Stromstärke von zirka 10 A längere Zeit wirken würde.

Als Vergleichswiderstand R dienen 3 Widerstände von bezw. 0.1, 1 und 10 Ohm. Auf einem vertikalen Brette liegen zwischen Klemmschrauben 3 Schleifen eines Kupferdrahtes vom Gesamtwiderstand 0.1 Ohm, ferner eine Schleife aus Konstantendraht von 1 Ohm, endlich 10 Schleifen aus derselben Drahtsorte mit zusammen 10 Ohm. Eine Klemme in der Mitte dieses letztgenannten Widerstandes ermöglicht es, eventuell auch 5 Ohm einzuschalten. Da die Drahtdicken und die Längen der einzelnen Schleifen gleich sind, stellt der Widerstand einer Schleife (0.033 Ohm bei Kupfer, 1 Ohm bei Konstantan) zugleich den relativen Wert der spezifischen Widerstände der beiden Materialien dar.



Die oben angegebenen runden Werte des Widerstandes sind nicht exakt, aber für Demonstrationsversuche mit hinreichender Annäherung hergestellt. Für eventuelle genauere Messungen sind die Werte einzusetzen, die an der oberen Kante des Brettes angeschrieben sind.

Die maximale zulässige Stromstärke für diese Widerstände beträgt zirka 2 A. Sind daher (z. B. bei der Messung kleiner Widerstände) höhere Stromstärken in dem die Vergleichswiderstände enthaltenden Zweige zu erwarten, so ist wieder nur mit möglichst kurz dauerndem Stromschluß (federndem Schlüssel) zu arbeiten.

Bezüglich der Stöpselrheostaten vergl. S. 168.

Ausführung der Versuche. 1) Bestimmung eines Glühlampenwiderstandes nach der Substitutionsmethode. Als Stromquelle wird ein Akkumulator ($E =$ zirka 2 V) verwendet; die zu messende Glühlampe und das Demonstrationsgalvanometer (mit einem Magnet und unter Benutzung bloß einer Spule, entsprechend der Schaltung (a) nach S. 120) sowie ein Stromschlüssel werden — der Beschreibung auf S. 123 entsprechend — in den Schließungskreis desselben eingeschaltet. Da die Spannung rund 50 mal kleiner ist als die bei der Verwendung der Lampe als Lichtquelle, die Wärmeentwicklung somit 2500 mal kleiner ist, wird der Kohlenfaden nur wenig erwärmt; der gemessene Wert des Widerstandes bezieht sich also auf Zimmertemperatur; infolge des negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes von Kohle beträgt der Widerstand der Lampe in weißglühendem Zustande nur etwa die Hälfte.

Nachdem bei geöffnetem Schlüssel die Lampe durch den abstufbaren Stöpselrheostaten ersetzt wurde, zieht man zunächst den Stöpsel für 1000 Ohm und setzt erst nachträglich den gezogenen Widerstand herab, bis der Ausschlag den ursprünglichen Wert wieder angenommen hat; Schließen des Stromkreises bei zu kleinem Rheostatenwiderstande (z. B. alle Stöpsel gesteckt) würde einen heftigen Ausschlag im Galvanometer hervorrufen, der den Apparat beschädigen könnte.

Sind die Ausschläge a_1 und a_2 gleich geworden, so wird geprüft, um wieviel der Vergleichswiderstand geändert werden muß, damit eine Differenz eben merklich wird. Man erhält so einen Maßstab für die Genauigkeit des Wertes, den die hier verwendete Messungsmethode liefert.

2) Bestimmung eines Glühlampenwiderstandes mittels des Differentialgalvanometers. Dieselbe Glühlampe wird unter Verwendung der gleichen Nebenapparate nach dem Schaltungsschema c auf S. 121 gemessen. Im Stöpselrheostaten ist aus den gleichen Gründen wie vorhin ein zu kleiner Widerstand zu vermeiden, am einfachsten wird der aus (1) erhaltene Wert provisorisch eingesetzt und am Rheostaten gezogen. Die Differentialmethode ist empfindlicher als die vorige und liefert daher genauere Werte.

Vorteilhaft ist es, nicht bei dauernd geschlossenem Stromkreis R zu ändern, bis $a = 0$ wird, sondern jedesmal den Schlüssel zu öffnen, Ruhe

des Galvanometers abzuwarten und zu beobachten, ob beim Schließen des Stromes eine Ablenkung nach rechts oder links auftritt. Kleine Ablenkungen, die als Dauerausschläge nicht mehr mit Sicherheit konstatiert werden könnten, sind nämlich als Zucken der Nadel noch deutlich erkennbar. Natürlich liegt der Schlüssel im unverzweigten Teile der Leitung.

Ist vollständige Abgleichung der beiden Zweigströme unmöglich, so daß die kleinste mögliche Veränderung des Rheostatenwiderstandes den Sinn des Ausschlages umkehrt, so liegt der richtige Wert zwischen den beiden am Rheostaten hergestellten.

3) Widerstandsmessung in der Wheatstone'schen Brückenschaltung. Als Objekt einer fingierten Widerstandsmessung für Demonstrationszwecke wird ein Stöpselrheostat von 10 Ohm verwendet, als Vergleichswiderstand der auf S. 129 beschriebene. Als Stromquelle dient wieder ein Akkumulator (eventuell ein galvanisches Element), als Strommesser das Demonstrationsgalvanometer in der gleichen Schaltung (a) wie in den früheren Versuchen. Das Schema der Versuchsanordnung vergl. S. 128.

Um die Berechnung nach der Formel: $w = R \frac{x}{1000 - x}$ durchzuführen, muß man w an das mit 0, den Vergleichswiderstand R an das mit 1000 bezifferte Ende des Meßdrahtes anlegen. Man wählt zunächst als Vergleichswiderstand die Schleife von 10 Ohm und erhält als Einstellung des Schleifkontaktes angenähert 50 cm; wird 1 Ohm als Vergleichswiderstand gewählt, so liegt diese bei zirka 91 cm. Die Beobachtung erfolgt derart, daß zunächst bei niedergedrücktem Schlüssel der Kontakt rasch verschoben wird, bis nur ein kleiner Ausschlag bestehen bleibt (grobe Einstellung); die Feineinstellung erfolgt dann analog wie bei Versuch (2), indem die Stellung des Kontaktes so lange verändert wird, bis der momentane Stromschluß keinen merklichen Ausschlag des vorher zur Ruhe gekommenen Magnets bewirkt.

Ist die Indifferenzstellung des Kontaktes erreicht, so prüft man, welche Verstellung einen eben merklichen Ausschlag hervorruft, und berechnet hieraus den möglichen Fehler der Widerstandsmessung. Es ergibt sich, daß die Einstellung bei 50 cm (mit 10 Ohm Vergleichswiderstand) genauere Resultate liefert als die bei 91 cm (mit 1 Ohm Vergleichswiderstand). Zugleich wird die prozentuelle Genauigkeit der Resultate mit den nach den früher besprochenen Methoden erhaltenen verglichen.

Als zweites Meßobjekt dient ein mit Draht umwickelter Hohlzylinder, der in späteren Versuchen als Sekundärspule für Induktion zur Anwendung kommt und dessen Widerstand für die quantitative Berechnung des zu erwartenden Effektes bekannt sein muß. Die Messung erfolgt wie oben unter Anwendung von 10 Ohm als Vergleichswiderstand.

Nach Beendigung der Versuche ist das Galvanometer wieder vorsichtig zu arretieren! (Vergl. S. 106.)

52. Thermoelektrizität.

Instrumentarium: Thermoelement und Magnethadel; thermoelektrische Nadel; Demonstrationsgalvanometer; Peltier'scher Apparat; Demonstrations-thermoskop; Äther; Gefäß mit heißem Wasser; Bunsenbrenner; Thermometer; Kommutator; Stromschlüssel; Stativ; 2 Akkumulatoren; Ampèremeter; Neusilberdraht.

Theorie der Versuche. Ein geschlossener metallischer Stromkreis, bestehend aus 2 Metallen A und B, vom Gesamtwiderstand w liefert einen Strom $i = \frac{E}{w}$, wenn die beiden Kontaktstellen zwischen A und B auf verschiedene Temperatur gebracht werden. Die thermoelektrische Kraft E ist in erster Annäherung proportional der Temperaturdifferenz ϑ der beiden Lötstellen und beträgt z. B. pro 1°C für Bi/Sb: $100 \cdot 10^{-6} \text{V}$, für Neusilber/Fe: $25 \cdot 10^{-6} \text{V}$, für Cu/Sb: $40 \cdot 10^{-6} \text{V}$.

Wenn an der wärmeren Lötstelle der Strom in der Richtung von A nach B fließt, nennt man A das thermoelektrisch positive, B das thermoelektrisch negative Metall. In obigen Angaben ist das positive Metall (Bi, Neusilber) vorangestellt. Die Metalle lassen sich so in eine »thermoelektrische Spannungsreihe« einordnen.

Die geringe Größe der thermoelektrischen Spannungen bedingt zum Nachweis entweder die Anwendung von Leitungen sehr geringen Widerstandes oder die Benutzung von Galvanometern hoher Empfindlichkeit.

Wird ein geschlossener Kreis aus 3 Metallen A, B und C gebildet, und werden die Lötstellen C/A und B/C auf gleicher Temperatur erhalten, A/B dagegen erwärmt oder abgekühlt, so ist die wirksame thermoelektrische Kraft dieselbe, als ob die Enden von A und B direkt, statt durch C, miteinander verbunden wären.

Wird durch eine aus verschiedenen Metallen bestehende Leitung ein Strom beliebigen Ursprungs hindurchgeschickt, so tritt an jeder Lötstelle eine positive oder negative Wärmeentwicklung ein (Peltiereffekt). An der Lötstelle A/B tritt bei der Stromrichtung von A nach B eine Abkühlung ein, wenn A das thermoelektrisch positive Metall ist. Allgemein hat die durch die Peltierwärme hervorgerufene Temperaturänderung der Lötstellen die Tendenz, bei ausgeschaltetem erregenden Strom einen Thermostrom entgegengesetzter Richtung hervorzurufen.

Quantitativ ist die durch den Peltiereffekt pro Zeiteinheit erzeugte resp. verbrauchte Wärme der Stromstärke proportional zu setzen, also $Q = \pm p i$, wo p von der Natur der sich berührenden Metalle abhängt. Schließt man eine Lötstelle samt ihrer nächsten Umgebung in ein Kalorimeter ein, so ist die darin erfolgende Wärmeproduktion aus 2 Bestandteilen zusammengesetzt: aus der Joule'schen Wärme $i^2 w$, wenn w den Widerstand des eingeschlossenen Teiles der Leitung bezeichnet, und der Peltierwärme $p i$. Je nach der Stromrichtung erhält man also:

$$Q_1 = i^2 w + p i; \quad Q_2 = i^2 w - p i$$

Q_1 ist stets positiv, Q_2 nimmt für schwache Ströme einen negativen Wert an, wird Null für $i w = p$ und positiv für größere Werte von i . Der negative Absolutbetrag von Q_2 erreicht ein Maximum (größte Abkühlung), wenn $\frac{dQ_2}{di} = 0$, also $i w = \frac{p}{2}$ ist. Um also die Abkühlung durch den Peltiereffekt zu demonstrieren, ist die Stromstärke $i = \frac{p}{2w}$ die günstigste; der absolute Betrag der Differenz $(Q_1 - Q_2) = 2 p i$ steigt dagegen der Stromstärke proportional an.

Zur Berechnung der günstigsten Stromstärke nach obiger Formel sei angenommen, daß ein Wismuth-Antimonstab von 0.4 cm^2 Querschnitt (7 mm Durchmesser) und 10 cm Länge (je 5 cm jeden Metalles) in ein Kalorimeter eingeschlossen sei. Der Widerstand berechnet sich dann aus den Dimensionen des Stabes und den spezifischen Widerständen $\sigma_{\text{Bi}} = 1.2 \cdot 10^{-4}$ und $\sigma_{\text{Sb}} = 0.4 \cdot 10^{-4}$ nach der Formel $w = \sigma \frac{l}{q}$ zu $2 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm}$.

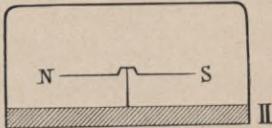
Die Peltierwärme p , die einem Strome von 1 A entspricht, hat die Dimension einer Energie, dividiert durch eine Zeit und eine Stromstärke, also $\frac{\text{cal}}{\text{sec. Amp}}$ resp. $\frac{\text{Watt}}{\text{Amp}} = \text{Volt}$. Für Bi/Sb ist ungefähr anzunehmen:

$$p = 7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{sec. A}} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ Volt.}$$

Aus obiger Gleichung erhält man daher die günstigste Stromstärke

$$i_0 = \frac{p}{2w} = \frac{29 \cdot 10^{-3} \text{ Volt}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm}} = \text{rund } 7 \text{ Amp.}$$

Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche.

1) Thermoelement Kupfer-Antimon. Ein dicker Antimonstab und ein Kupferbügel bilden einen geschlossenen Kreis von sehr geringem Widerstande, so daß selbst geringe elektromotorische Kräfte einen starken Strom erzeugen, welcher die innerhalb des Rahmens auf eine Spitze aufgesetzte Magnetnadel merklich ablenkt. I 

a) Nachdem der auf einem hölzernen Stativ drehbar befestigte Thermokreis in die Ebene des magnetischen Meridians eingestellt ist, wird Lötstelle I mittels eines brennenden Zündhölzchens erwärmt; da Antimon leicht schmelzbar (bei 630° C) und schwer zu löten ist, muß eine zu starke Erhitzung vermieden werden, daher ist vom Gebrauch eines Bunsenbrenners besser abzusehen oder doch große Vorsicht dabei anzuwenden.

Der Ausschlag der Nadel zeigt nach der Ampère'schen Schwimmerregel einen Strom an, der bei I im Sinne Kupfer-Antimon fließt, also ist Kupfer das thermoelektrisch positive Metall.

b) Wird die Lötstelle II erwärmt, so wechselt der Strom und damit die Ablenkung der Magnetnadel die Richtung.

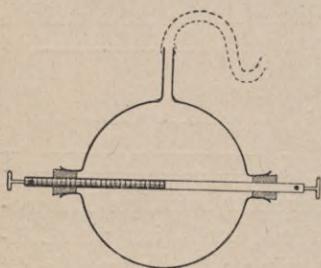
c) Nach Abwarten des Temperatenausgleiches mit der Zimmerluft wird die Lötstelle I mit Filtrierpapier umwickelt und dieses mit Äthyläther befeuchtet. Durch die Verdunstungskälte entsteht ein Strom umgekehrter Richtung wie in Versuch (a).

2) Thermoelektrische Nadel. Zwei Streifen von Eisen und Neusilber sind am einen Ende miteinander verlötet, im übrigen durch einen zwischengelegten Hartgummistreifen voneinander isoliert und an den andern Enden mit Kupferdrähten verlötet, die Klemmschrauben tragen. Das ganze Thermoelement steckt in einem Glasrohr, aus dessen unterem Ende die spitz zugefeilte Lötstelle Eisen-Neusilber, aus dessen oberem Ende die Kupferdrähte herausragen. Mittels zweier Korke ist dieses Glasrohr in eine zweifach tubulierte Glaskugel eingesetzt; Füllung dieser Kugel mit Wasser von Zimmertemperatur hält die beiden Lötstellen Eisen-Kupfer und Neusilber-Kupfer auf konstanter Temperatur.

Die Klemmschrauben der Kupferdrähte werden mit dem Demonstrationsgalvanometer in Verbindung gesetzt, das — zur Erhöhung der Voltempfindlichkeit — mit parallel geschalteten Spulen verwendet wird (vgl. S. 125). Die Spitze des Thermoelementes wird in siedendes Wasser getaucht; aus dem Ausschlage des Galvanometers und der im Versuche 4c, S. 127 bestimmten Volttempfindlichkeit (unter Vernachlässigung des Widerstandes der Zuleitung und des Thermoelementes selbst) wird die wirksame elektromotorische Kraft E berechnet. Bezeichnet ϑ die Differenz der Siede- und der Zimmertemperatur, so gilt $\frac{E}{\vartheta}$ die thermoelektrische Kraft des Elements pro 1°C an.

3) Peltier'scher Apparat. Eine Glaskugel ist mit 2 Ansatzrohren versehen, die mit durchbohrten Kautschukstöpseln versehen sind. Durch die Bohrungen führt ein Stab, der zur Hälfte aus Wismuth, zur Hälfte aus Antimon besteht und an den Enden mit Klemmschrauben versehen ist. Das dritte vertikal nach oben führende Ansatzrohr wird in ein Stativ geklemmt und durch einen Kautschukschlauch mit dem Demonstrationsthermoskop (vergl. S. 59) verbunden. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit ist es günstig, vorher etwas Äthyläther in die Glaskugel zu bringen (vergl. Ätherthermoskop S. 60).

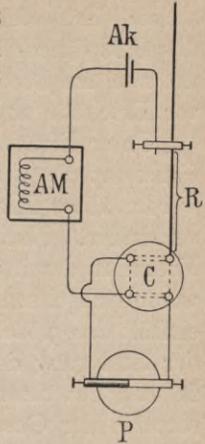
Die Klemmen des Peltier'schen Apparates werden mit einem Kommutator (vergl. S. 169) verbunden; als Stromquelle wird ein Akkumulator verwendet; um die richtige Stromstärke zu erzielen, schaltet man zwischen Akkumulator und Kommutator das Demonstrationsampèremeter (vergl. S. 119) mit dem Meßbereiche bis 10 A und als Regulierwiderstand ein Stück Neusilberdraht, dessen eingeschaltete Länge durch Verschieben der Klemmschraube derart reguliert wird, daß die Stromstärke zirka 6 bis 8 A beträgt.



Nach Herstellung der Verbindungen warte man zunächst bei unterbrochenem Stromkreis den Temperatenausgleich ab und schalte zuerst den Strom so ein, daß der positive Pol des Akkumulators mit dem Wismuthstab verbunden ist. Es zeigt sich dann eine Abkühlung am Thermoskop. Nach etwa 1 bis 2 Minuten wird der Ausschlag des Thermoskopes stationär. Durch Kommutation des Stromes ergibt sich eine Erwärmung, und zwar im Absolutbetrage größer als die Abkühlung; denn es ist unter Voraussetzung der maximalen Abkühlung:

$$Q_2 = i^2 w - pi = -\frac{1}{2} pi; \quad Q_1 = i^2 w + pi = \frac{3}{2} pi$$

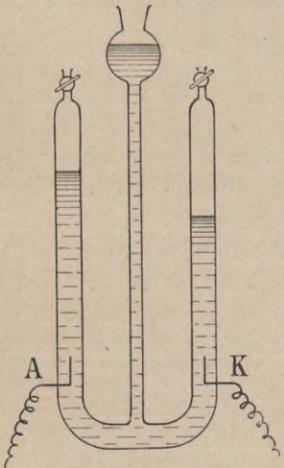
Es ist darauf zu achten, daß die Kautschukstöpsel, durch welche der Doppelstab geführt ist, gut dichten.



53. Elektrolyse.

Instrumentarium: Hoffmann'scher Wasserzersetzungsgapparat; U-Rohr mit Elektroden; Glastrog mit Elektroden; Glühlampenwiderstand; Lösung von $Mg_2 SO_4$; Lackmustinktur; Lösung von Bleiazetat; Ampèremeter; verdünnte Schwefelsäure (1:10); Stopuhr; Bogenlampe mit Kondensator; Projektionslinse; Schirm.

Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche. 1) Hoffmann's Wasserzersetzungsgapparat. Auf einem Stative ist ein Rohr von der in der Figur gezeichneten Form befestigt. Die beiden Schenkel des U-förmigen Teiles sind in cm^3 geteilt und oben mit Hähnen versehen; im unteren Drittel sind Platinelektroden eingeschmolzen. Das mittlere Rohr und das kugelförmige Reservoir sind mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt (1 Volumteil $H_2 SO_4$ auf 10 Volumteile Wasser). Sollte von früheren Versuchen im oberen Teile der U-Rohrschenkel noch Gas zurückgeblieben sein, so werden nacheinander die Hähne vorsichtig halb geöffnet, so daß die Flüssigkeit bis zum Hahn steigt, und dann sofort geschlossen. Ansammlung von Flüssigkeit oberhalb des Hahnes ist zu vermeiden, da sonst bei der nächsten Justierung die Säure durch das ausströmende Gas herausgespritzt wird und Kleider und Apparate beschädigt. Sind trotzdem Säuretropfen in den Ausflußröhrchen angesetzt, so werden sie mittels des am Stativ angebundenen und vorher befeuchteten Schwämmchens entfernt und Hütchen aus Filtrierpapier als Schutz über die Rohrenden gestülpt. Steht das Niveau im Kugelreservoir unterhalb der Höhe der Hähne,



so wird Schwefelsäure der oben angegebenen Verdünnung nachgefüllt. Die das Glas durchsetzenden Platindrähte sind bereits durch elastische Spiralen mit zwei am Stativ isoliert befestigten Klemmschrauben verbunden; sie sollen vor Erschütterungen möglichst bewahrt werden.

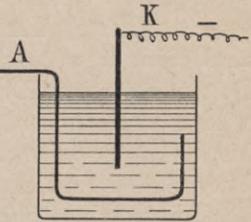
Unter Einschaltung eines Vorschaltwiderstandes (2 parallel geschaltete Glühlampen), des Demonstrationsampèremeters und eines Stromschlüssels werden diese Klemmschrauben mit den Polen des Gleichstromschaltbrettes verbunden. Nach einigen Minuten wird der Strom unterbrochen, und die Volumina der in den beiden Schenkeln des U-Rohres abgeschiedenen Gase werden abgelesen; es ergibt sich annähernd das Verhältnis 1:2, und zwar enthält das größere Volum Wasserstoff, das kleinere Sauerstoff, entsprechend der Zerlegung des Wassers in H_2 und O. Die eventuell nicht exakte Erfüllung des theoretischen Verhältnisses 1:2 rührt von der teilweisen Absorption der Gase in der Flüssigkeit her; wird daher durch einen Vorversuch die Flüssigkeit in beiden Schenkeln mit den Gasen fast gesättigt, so gibt nach erneuerter vollständiger Füllung der zweite Versuch bessere Übereinstimmung. Der Wasserstoff entwickelt sich an der Kathode, der Sauerstoff an der Anode, die Polbezeichnung des Schaltbrettes kann somit an dem Ergebnis der Wasserzersetzung geprüft werden.

Wird die Zeitdauer des Stromdurchganges mit der Stopuhr gemessen, so kann auch die Stromstärke aus dem Volum der Gase bestimmt werden (Knallgasvoltmeter); hierbei sind die Volumina von H und O zu addieren (das getrennte Auffangen der beiden Gase wäre für das Voltmeter nicht notwendig). Die Stromstärke berechnet sich aus der Formel: $v = A \cdot i \cdot t$, wo v in cm^3 , i in Ampere und t in Minuten auszudrücken ist und A den Wert von $10 \cdot 44 \frac{cm^3}{min. Amp}$ besitzt. Genau genommen, muß das abgelesene Volum v auf die Temperatur $0^\circ C$ und den Druck von 760 mm reduziert werden.

2) Elektrolyse von Magnesiumsulfat; Polprüfer. Magnesiumsulfat- ($Mg_2 SO_4$) Lösung wird mit neutral violett gefärbter Lackmüstinktur versetzt und in ein U-Rohr gefüllt; die dasselbe verschließenden Stöpsel sind durchbohrt und enthalten die mit Klemmschrauben versehenen Zuführungen zu den in die Flüssigkeit tauchenden Platinelektroden. Unter Zwischenschaltung einer Glühlampe werden diese mit dem Gleichstromschaltbrette verbunden. Durch die sekundäre Reaktion der abgeschiedenen Anionen und Kationen mit der Lösung entsteht an der Anode $H_2 SO_4$, an der Kathode $Mg OH$. Dementsprechend wird die Lackmüstinktur in der Umgebung der Anode durch die Säure rot, an der Kathode durch das basische Produkt blau gefärbt. Die Stromrichtung bzw. die Polbezeichnung des Schaltbrettes kann daher analog wie bei der Wasserzersetzung geprüft werden.

3) Elektrolyse von Bleiazetat. Ein Glastrog mit planparallelen Seitenwänden ist auf einem Brettchen befestigt und mit zwei Bleidrähten

als Elektroden versehen, die die in der Figur schematisch gezeichnete Lage haben und bereits mit Klemmschrauben im Fußbrettchen verbunden sind. Der Trog wird mit einer Lösung von Bleiazetat gefüllt und vor den Kondensator einer Bogenlampe gestellt. Mittels der Projektionslinse wird ein scharfes, stark vergrößertes Bild der zentralen Elektrode auf dem Schirm entworfen.



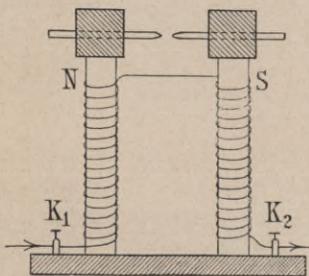
Unter Einschaltung eines Kommutators und einer Glühlampe werden die Klemmen mit dem Gleichstromschaltbrette verbunden, und zwar zunächst so, daß die zentrale Elektrode Kathode ist. Das an ihr sich abscheidende metallische Blei bildet rasch anwachsende baumartige Massen. Durch Kommutierung des Stromes wird die Elektrode zur Anode, die abgeschiedenen Massen lösen sich wieder auf und bröckeln teilweise ab.

Nach Beendigung der Versuche sind das U-Rohr aus Versuch (2) und der Trog aus Versuch (3) zu entleeren und abzuspülen; der Hoffmann'sche Apparat ist von eventuell an der Außenseite haftender Schwefelsäure sorgfältig zu reinigen.

54. Elektromagnetismus.

Instrumentarium: Elektromagnet mit Polschuhen; Schutzkasten mit Suspension; Kassette mit diversen Stäbchen; Regulierwiderstand; Glühlampewiderstand; Stromschlüssel; Stativ mit Platindraht; Hufeisenmagnet; Unterlagsklötze; Ampèremeter.

Beschreibung der Apparate. Der Elektromagnet besteht aus zwei Säulen aus weichem Eisen, die auf einem massiven Fußbrette fixiert und



mit Drahtwicklungen umwunden sind, die — von oben gesehen — die Eisenkerne im entgegengesetzten Sinne umkreisen. Wird daher der Strom bei Klemme K_1 zu-, bei K_2 abgeleitet, so wird das obere Ende der linken Säule ein Nordpol, der rechten ein Südpol. Auf die oberen Endflächen der Säulen werden die sogen. »Polschuhe« aufgesetzt: zwei Würfel aus weichem Eisen mit Bohrungen, in denen zugespitzte runde

Eisenstäbe festgeklemmt werden können. Zwischen den einander zugekehrten Spitzen ist die magnetische Feldstärke am größten. Nach Entfernung der runden Stäbe erhält man zwischen den Flächen der Würfel ein magnetisches Feld größerer räumlicher Ausdehnung, aber geringerer Intensität. Mit der Stromstärke steigt die Feldintensität an, etwa 10 bis 12 A genügen.

Auf ein in der Höhe der Endflächen der Eisenkerne angebrachtes, am Grundbrette fixiertes (in der Zeichnung nicht dargestelltes) Tischchen läßt sich ein Schutzkasten aus Glas aufstellen; in der Mitte hängt an einer

Suspension (Kokonfaden) ein leichter Drahtbügel, in den Stäbchen von einigen mm Länge verschiedener Stoffe horizontal eingelegt werden können, derart, daß sie zwischen den Polspitzen schweben.

Ausführung der Versuche. 1) Untersuchung paramagnetischer und diamagnetischer Substanzen. In die Polschuhe werden die Spitzen mit einer Distanz von zirka 3 cm eingesetzt. Der Elektromagnet wird unter Zwischenschaltung des Demonstrationsampèremeters (Meßbereich bis 10 A) und eines Regulierwiderstandes für Starkströme (vergl. Beschreibung S. 167) mit den Polen des Gleichstromschaltbrettes verbunden.

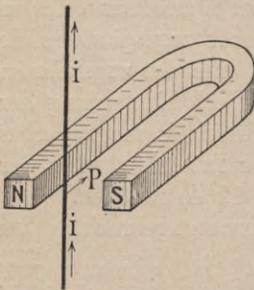
Bei unterbrochenem Strome wird der Schutzkasten mit Suspension aufgesetzt, nachdem in den Drahtbügel ein Wismuthstäbchen eingelegt wurde. Der Strom wird hierauf geschlossen und am Regulierwiderstand auf zirka 10 A gebracht. Als stark diamagnetischer Körper stellt sich das Wismuthstäbchen senkrecht zu den von Spitze zu Spitze laufenden Kraftlinien.

In derselben Weise wird eine Anzahl von Stäbchen verschiedenen Materials (Metalle, Kristalle, Röhren und Flüssigkeiten) geprüft, ob sie paramagnetisch sind (Stellung parallel den Kraftlinien) oder diamagnetisch (Stellung senkrecht zu den Kraftlinien).

2) Ponderomotorische Wirkung eines konstanten Magnetfeldes auf Gleich- und Wechselströme. Ein Platindraht, der zwischen zwei auf einem gläsernen Stativ voneinander isolierten Klemmen vertikal gespannt ist, wird durch einen Strom von etwa 2 bis 4 A zum Glühen gebracht. Zu diesem Zwecke wird ein Stromschlüssel und ein Glühlampenwiderstand (Beschreibung S. 167) vorgeschaltet, in dem 2, 3 Glühlampen nach Belieben parallel eingeschaltet werden können. Durch Ausprobieren — beginnend mit 1 Glühlampe — ermittelt man jene Lampenzahl, bei der der Draht zu mäßiger Weißglut erhitzt wird; höhere Stromstärken würden ein Durchschmelzen oder Reißen des Drahtes herbeiführen. Infolge der Wärmeausdehnung wird der vorher gespannte Draht schlaff und daher beweglich.

a) Als Stromquelle verwendet man zunächst das Schaltbrett des Gleichstromes.

Auf entsprechend angeordnete Unterlagsklötze wird ein hufeisenförmiger Stahlmagnet in horizontaler Lage derart aufgelegt, daß sich der Draht in der Mitte zwischen den Polen befindet. Im stromdurchflossenen Zustande erfährt er eine ponderomotorische Kraft senkrecht zur Stromrichtung und zur Richtung der Kraftlinien, und zwar im Sinne des Pfeiles P, wenn die in der Figur angedeuteten Voraussetzungen bezüglich Lage der Pole und Stromrichtung erfüllt sind.



Bei Umkehrung der Pole durch verkehrtes Auflegen des Magnets kehrt sich auch der Sinn der Ablenkung um.

b) An Stelle des Gleichstromes wird Wechselstrom durch den Draht geleitet. Dieser erfährt abwechselnd entgegengesetzt gerichtete Ablenkungen und gerät in Schwingungen analog einer Saite.

NB. Eine Berührung des glühenden Drahtes mit dem Magnet ist zu vermeiden, besonders wenn Eisenfeilspäne an dessen Polen haften, da hierbei sehr leicht ein Durchschmelzen des Drahtes an der Berührungsstelle stattfindet.

55. Induktion.

Instrumentarium: Demonstrationsgalvanometer; Induktionsspule; Stabmagnet; Akkumulator; federnder Stromschlüssel; Drähte und biegsame Kabel.

Beschreibung des Apparates und Theorie der Versuche. Eine hölzerne Spule ist mit vielen Windungen (zirka 1000) eines dünnen Drahtes umwickelt, dessen Enden zu an der Spule befestigten Klemmschrauben führen, mit welchen das Demonstrationsgalvanometer (vergl. S. 120) verbunden wird.

Schiebt man in den hohlzylindrischen Raum der Spule einen Stabmagnet ein, bis dessen Mitte im Zentrum der Spule steht, so wird während der Bewegung des Magnets in der Spulenwicklung ein Strom induziert, der bei hinreichender Empfindlichkeit des Galvanometers einen merklichen Ausschlag hervorruft. Beim Herausziehen des Magnets entsteht ein Induktionsstrom entgegengesetzter Richtung; ebenso kehrt sich die Stromrichtung um bei Vertauschung der Pole des bewegten Magnets.

Statt eines permanenten Stabmagnets kann auch ein Elektromagnet verwendet werden in Form der sogenannten »Primärspule«, einer in den Hohlraum der induzierten Sekundärspule hineinpassenden Spule, die relativ wenige Windungen eines dicken Drahtes und als Kern ein Bündel weicher Eisendrähte enthält und mittels einer beliebigen Stromquelle mit einem starken elektrischen Strome beschickt wird.

Dem Hineinschieben bezw. Herausziehen des Elektromagnets äquivalent ist seine Erregung durch Schließen des Primärstromes bezw. Entmagnetisierung durch Öffnen.

Zur Beantwortung der Frage, welche Galvanometerempfindlichkeit notwendig ist, damit ein deutlich erkennbarer Ausschlag entsteht, sei die quantitative Berechnung durchgeführt.

In einer geschlossenen Leitung wird eine bestimmte elektromotorische Kraft induziert, wenn die Anzahl der magnetischen Kraftlinien (der sogenannte »magnetische Induktionsfluß« \mathfrak{M}), welche die von der Leitung umschlossene Fläche in bestimmtem Sinne durchsetzen, eine Änderung erfährt. Bei Anwendung des absoluten elektromagnetischen Maßsystems ist die EMK gegeben durch:

$$E = \frac{d\mathfrak{M}}{dt}$$

Da 1 Einheit der Spannung im absoluten System gleich 10^{-8} Volt ist, gibt $10^{-8} \frac{d\mathfrak{M}}{dt}$ die EMK in Volt an. Wird die einfache geschlossene Schleife durch n Windungen (im selben Sinne kreisend) ersetzt, so erreicht auch der Induktionsfluß durch die gesamten Windungen den n -fachen Wert.

Die Stromstärke in der induzierten Leitung hängt außer von dieser EMK noch vom Widerstande ab; es ist also ein Galvanometer möglichst geringen Widerstandes und daher möglichst hoher Empfindlichkeit als Spannungsmesser (vergl. S. 125) zu verwenden.

Besitzt ein Magnetstab das bekannte magnetische Moment M , so wird durch Division mit der Poldistanz l ($= \frac{5}{6}$ der Stablänge, vergl. S. 105) die Polstärke μ gefunden.

Da jeder Pol $4\pi\mu$ positive resp. negative Induktionslinien aussendet, ist auch die Anzahl der Induktionslinien (der »Induktionsfluß«), welche den mittleren Querschnitt des Stabes durchsetzen, gegeben durch:

$$\mathfrak{M} = 4\pi\mu = 4\pi \frac{M}{l}$$

Wird daher der Magnet in der früher beschriebenen Weise aus großer Entfernung in die Spule eingeführt, so ist für diese der sie durchsetzende Induktionsfluß vorher und nachher:

$$\mathfrak{M}'_0 = 0; \mathfrak{M}'_1 = n\mathfrak{M} = 4\pi n \frac{M}{l}$$

wenn n die Zahl der Windungen ist.

$(\mathfrak{M}'_1 - \mathfrak{M}'_0)$ ist aber das Zeitintegral der während der Bewegung wirkenden EMK in absoluten Einheiten. In Voltsec ausgedrückt, erhält man

$$\text{hierfür also: } 10^{-8} \cdot 4\pi n \frac{M}{l}.$$

Ist w der Widerstand der Leitung (Spulenwiderstand plus Galvanometerwiderstand), so ist das Zeitintegral der Stromstärke über die Dauer der Bewegung oder die während dieser einen beliebigen Querschnitt passierende Elektrizitätsmenge Q gegeben durch:

$$Q = \int i dt = \frac{4\pi n M}{w \cdot l} \cdot 10^{-8} \text{ Cb.}$$

Ein Galvanometer, das durch einen kurzdauernden Strom eine stoßartig erfolgende Ablenkung erhält, wird ballistisches Galvanometer genannt. Der »ballistische Ausschlag« α ist proportional der Elektrizitätsmenge $Q = \int i dt$, und der Proportionalitätsfaktor \mathfrak{P} der Gleichung $Q = \mathfrak{P} \alpha$ wird der »ballistische Reduktionsfaktor« genannt.

Bezeichnet τ die (einfache, wie beim Pendel) Schwingungsdauer der Galvanometernadel, so besteht zwischen dem ballistischen Reduktionsfaktor \mathfrak{P} und dem Reduktionsfaktor \mathfrak{C} für Dauerstrom (vgl. S. 123) die Relation: $\mathfrak{P} = \mathfrak{C} \frac{\tau}{\pi}$.

[Über den Beweis vgl. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, § 109.]

Der Ausschlag des Galvanometers beim Induktionsversuche berechnet sich also theoretisch nach der Formel:

$$\alpha = \frac{4 \pi^2 n M}{\mathfrak{C} w \tau l} \cdot 10^{-8} \text{ partes.}$$

Ausführung der Versuche. 1) Der zu erwartende Effekt wird theoretisch auf Grund obiger Formel berechnet, indem man für M den in Versuch 44 (S. 104) bestimmten Wert des magnetischen Momentes, für w den Widerstand des Galvanometers und den der Induktionsspule (ermittelt in Versuch 51, 3, S. 131), für \mathfrak{C} den Reduktionsfaktor des Demonstrationsgalvanometers (ermittelt in Versuch 49, 3, S. 123) einsetzt, und die Schwingungsdauer τ an der abgelenkten Galvanometernadel beobachtet. Für n wird der an der Induktionsspule vermerkte Wert eingesetzt. Es ergibt sich z. B.:

$$M = 3000 \text{ abs. E.}, l = 30 \text{ cm}, w = 25 \text{ Ohm, also } Q = 48 \cdot 10^{-5} \text{ Cb};$$

ferner $\tau = 3 \text{ sec}$, $\mathfrak{C} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}}{\text{pars}}$, $\mathfrak{B} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Cb}}{\text{pars}}$, also $\alpha = \frac{Q}{\mathfrak{B}} = \frac{48 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-5}} = \text{rund } 10 \text{ partes.}$

Ist der Widerstand der Sekundärspule größer als der einer einzelnen Galvanometerspule, so ist die Hintereinanderschaltung der beiden Spulen vorteilhafter, im entgegengesetzten Falle die Parallelschaltung.

2) Induktion durch Magnetstab. Die Sekundärspule wird durch hinreichend lange biegsame Kabel mit dem Galvanometer verbunden; die Entfernung soll so groß sein, daß eine direkte Fernwirkung des bewegten Magnetstabes auf die Galvanometernadel nicht mehr merklich ist.

Es wird die Richtung der entstehenden Induktionsströme notiert: a) für Einschieben des Magnets mit Nordpol voran; b) für Herausziehen nach (a); c) für Einschieben mit Südpol voran; d) für Herausziehen nach (c). Die ermittelte Richtung des Induktionsstromes ist zu vergleichen mit der theoretischen Bedingung, daß der induzierte Strom in der Sekundärspule auf den induzierenden Magnet eine Kraft ausübt, die dessen tatsächliche Bewegung zu hemmen strebt.

Sollte der Ausschlag, der durch einmaliges Hineinschieben bzw. Herausziehen entsteht, für die Demonstration nicht groß genug sein, so wendet man das »Multiplikationsverfahren« an. Der Magnet wird abwechselnd in die Spule geschoben und wieder herausgezogen in einem Rhythmus, der der Schwingungsdauer der Galvanometernadel entspricht, und zwar so, daß der induzierte Strom jedesmal im Sinne der vorhandenen Bewegungsrichtung verstärkend wirkt.

3) Induktion durch bewegten Elektromagnet. Die Primärspule wird ohne Zwischenschaltung eines Widerstandes mit einem Akkumulator verbunden und an Stelle des Magnetstabes verwendet. Die Versuche werden ganz analog wie bei (2) ausgeführt.

4) Induktion durch Schließen und Öffnen des Primärstromes. Die Primärspule bleibt dauernd in der sekundären stehen. Mittels eines federnden Schlüssels wird der Primärstrom abwechselnd geschlossen und

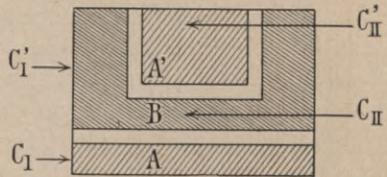
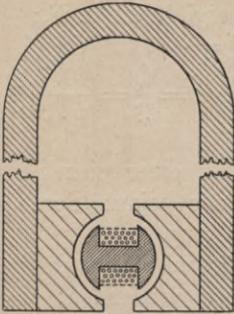
unterbrochen; die Richtungen der entstehenden Induktionsströme werden mit den in Versuch (3) beobachteten verglichen. Das Multiplikationsverfahren (siehe oben) läßt sich hier bequem anwenden.

56. Dynamomaschinen und Motoren.

Instrumentarium: Magnetelektrische Maschine; Gramme'sche Maschine; Demonstrationsvoltmeter; Demonstrationsampèremeter; Rheostat; Drähte; Stromschlüssel.

Beschreibung und Theorie der Apparate. I. Die magnetelektrische Maschine. Auf einem Grundbrette sind mehrere Hufeisenmagnete mit analog liegenden Polen vertikal nebeneinander aufgestellt, die Pole nach abwärts. Zur Erzeugung eines möglichst starken magnetischen Feldes sind sie mit einem gemeinsamen Polschuhpaar versehen, das einen zylindrischen Hohlraum frei läßt. In diesem ist um eine zur Bildebene senkrechte Achse der sogenannte »Anker« drehbar, ein Kern von weichem Eisen des in der Figur dargestellten Querschnittes, mit einer Drahtbewicklung versehen. Der Anker kann mittels einer zweifachen Zahnradübertragung durch eine Kurbel in rasche Rotation versetzt werden. Die freien Enden der Wicklung führen zu einem auf der Achse angebrachten »Kollektor«. Denkt man sich die Mantelfläche des Zylinders aufgeschnitten und aufgerollt, so bilden die auf einer isolierenden Unterlage befestigten, durch Fugen getrennten leitenden Teile einerseits die beiden Flächen A und A', die durch einen (nicht gezeichneten) Draht im Innern des Zylinders leitend verbunden sind, andererseits die zusammenhängende Fläche B. A und B sind dauernd mit den freien Enden der Ankerwicklung verbunden. Diametral einander gegenüberstehend, schleifen zwei fixe Kontakte (»Kollektorbürsten«) auf dem Umfange des mit dem Anker mitrotierenden Kollektors. In der Stellung $C_1 - C_2$ schleift jede Bürste dauernd auf derselben Fläche (A bzw. B); in der Stellung $C'_1 - C'_2$ dagegen wird nach je einer halben Umdrehung die Verbindung von A' und B mit den Bürsten kommutiert. Von C_1 und C_2 führen Leitungen zu Klemmschrauben, von denen der Strom abgenommen wird.

In der im konstanten magnetischen Felde rotierenden Ankerbewicklung wird eine EMK induziert, deren zeitlicher Verlauf durch $E_0 \sin \frac{2\pi t}{\tau}$ gegeben ist, wenn τ die Umdrehungsdauer des Ankers bezeichnet; E_0 ist dabei proportional der Tourenzahl. In der Kontaktstellung $C_1 - C_2$ wird daher von den Klemmen Wechselstrom abgenommen; in der Stellung $C'_1 - C'_2$ da-



gegen wird die Verbindung der Klemmen mit A' und B in demselben Momente kommutiert, in dem die Richtung des induzierten Stromes wechselt. Die Stromrichtung in der äußeren Verbindungsleitung ist daher immer dieselbe; allerdings kann der abgenommene Strom nicht als Gleichstrom bezeichnet werden, da er zwar konstante Richtung hat, in seiner Stärke aber periodisch (mit der Periode $\frac{\tau}{2}$) zwischen Null und einem Maximum wechselt.

II. Gramme'sche Maschine. Bei der Gramme'schen Maschine ist der Feldmagnet ein aus mehreren Lamellen zusammengesetzter hufeisenförmiger Stahlmagnet, der gleichfalls mit Polschuhen versehen ist. Der Anker ist ein sogenannter Gramme'scher Ring, dessen Bewicklung und Verbindung mit dem Kollektor derart angeordnet ist, daß von den Kollektorklemmen Gleichstrom, d. i. Strom konstanter Richtung und Stärke, abgenommen wird. Die genauere Beschreibung der Konstruktion und Wirkungsweise würde hier zu weit führen, es sei daher bloß auf die ausführliche Darstellung in *Müller-Pouillet*, Band III, S. 762—779 verwiesen.

Beide Generatoren, die magnetelektrische Maschine und die Gramme'sche, liefern bei gegebener Tourenzahl eine bestimmte elektromotorische Kraft, da durch die Intensität des konstanten magnetischen Feldes und die Winkelgeschwindigkeit des Ankers die pro Zeiteinheit erfolgende Änderung des Induktionsflusses (vergl. S. 139) durch die Ankerbewicklung gegeben ist. Die Stromstärke hängt dann noch von dem Widerstande der äußeren Leitung ab, der zum Widerstande des Ankers selbst hinzukommt.

Die pro Zeiteinheit geleistete elektrische Arbeit wird — in Watt ausgedrückt — gemessen durch das Produkt $A = Ei$. Je kleiner der äußere Widerstand ist, um so größer ist i und daher A . Die an der Kurbel zu leistende mechanische Arbeit hat außerdem noch die Überwindung der Reibungswiderstände zu decken.

Wird der Anker zunächst durch Drehen der Kurbel in Bewegung gesetzt und diese dann losgelassen, so dauert die Trägheitsbewegung so lange an, bis die kinetische Energie des rotierenden Systems durch die geleistete mechanische und elektrische Arbeit aufgebraucht ist. Bei ungeschlossener Leitung ($i = 0$) kommt bloß die Überwindung der Reibungswiderstände in Betracht, und die Bewegung hält relativ lange an. Bei geschlossener wird die noch hinzukommende Stromarbeit Ei um so größer, je kleiner der eingeschaltete Widerstand ist, und dementsprechend steigt die Bremswirkung. [Anwendung bei der Kurzschlußbremse der elektrischen Straßenbahnen, Demonstration in Versuch (2).]

Da der Vorgang im Generator: Umwandlung mechanischer Arbeit in elektrische Energie, umkehrbar ist, können beide Maschinen auch als Motoren verwendet werden, indem beim Durchleiten eines Stromes (einer fremden Stromquelle zu entnehmen) durch den Anker dieser in Bewegung gesetzt, also elektrische Energie in mechanische umgesetzt wird. Natürlich dient dieser Versuch (vergl. später Versuch 3) nur zur Demonstration des

Principes, während in der praktischen Ausführung behufs ökonomischer Ausnutzung der Energie Generatoren und Motoren verschiedene Konstruktionstypen besitzen.

Ausführung der Versuche. 1) Bestimmung der EMK bei verschiedenen Tourenzahlen. Die magnetelektrische (mit Kollektorstellung für Strom konstanter Richtung) und die Gramme'sche Maschine werden nacheinander mit dem Demonstrationsvoltmeter (vergl. S. 124) verbunden und bei verschiedenen Tourenzahlen (etwa 30 bis 120 in der Minute) bezüglich der EMK geprüft (Ergebnis zirka 30 bzw. 12 Volt bei mittlerer Tourenzahl).

2) Versuche über die elektrische Arbeitsleistung. Die Maschinen werden durch einen Starkstromrheostaten, der bei 128 Ohm Gesamtwiderstand in Stufen von je 4 Ohm veränderlich ist, geschlossen. Die Zunahme der Muskelanstrengung zur Erzielung einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit bei sinkendem Widerstande ist deutlich erkennbar. Wird statt des Rheostaten ein federnder Schlüssel eingeschaltet, der praktisch einen Kurzschluß der Ankerwicklung darstellt, und zunächst bei geöffnetem Schlüssel die Kurbel in möglichst rasche Rotation versetzt, so bewirkt das plötzliche Schließen des Schlüssels einen fühlbaren Chok.

In analoger Weise wird bei geöffnetem Schlüssel und eingeschaltetem Rheostatenwiderstand w die Kurbel in rascheste Rotation versetzt und losgelassen, unter gleichzeitigem Schließen des Schlüssels; die Laufdauer bzw. die Zahl der noch erfolgenden Umdrehungen der Kurbel wird in ihrer Abhängigkeit vom eingeschalteten Widerstand beobachtet.

An Stelle des Rheostaten wird das Demonstrationsampèremeter (vergl. S. 119), mit dem Meßbereiche bis 10 A, eingeschaltet und die Stromstärke beobachtet. Das Produkt aus der Spannung E (in Versuch 1 ermittelt) und der Stromstärke i gibt die Tourenzahl der angewandten Stromarbeit in Watt. In Pferdestärken umgerechnet ($1 \text{ PS} = 735 \text{ Watt}$), erhält man hieraus die mechanische Arbeit (abgesehen von den Reibungswiderständen), welche in diesem Falle aufzuwenden ist.

3) Verwendung als Motoren. Die beiden Maschinen werden gegeneinander geschaltet durch direkte gegenseitige Verbindung ihrer Polklemmen; die magnetelektrische Maschine ist hierbei zunächst mit der Kollektorstellung für Strom konstanter Richtung verwendet. Wird eine der beiden Maschinen angetrieben, so kommt die andere in Rotation; Umkehrung der Drehungsrichtung am Generator kehrt auch die Rotationsrichtung der als Motor funktionierenden Maschine um.

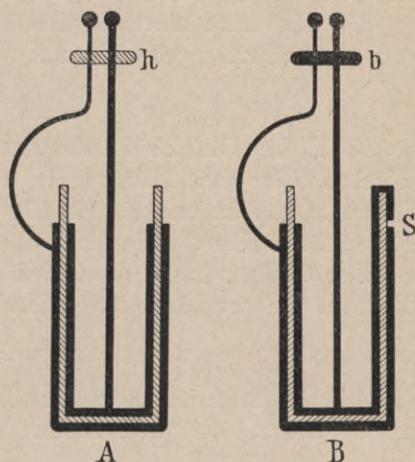
Wird der Kollektor der magnetelektrischen Maschine auf Wechselstromstellung gebracht und die Gramme'sche Maschine als Generator verwendet, so tritt bei der ersten keine dauernde Rotation ein, sondern der Anker stellt sich derart ein, daß seine Windungsebene senkrecht zu den Kraftlinien des Magnetfeldes, also vertikal steht, und behält diese Stellung als stabile Ruhelage bei.

57. Resonanz von Leydnerflaschen.

Instrumentarium: 2 Leydnerflaschen; Influenzmaschine; Drähte; Blechplatte; Paraffinpapier; Brettchen; Schublehre.

Beschreibung der Apparate. Die eine der beiden Leydnerflaschen (»Sender« A) hat mit den Belegungen fix verbunden zwei starke Metall-

drähte, die oben in Kugeln endigen; der mit der inneren Belegung verbundene ist gerade, der andere halbkreisförmig gebogen. Ein Hartgummistäbchen *h* unterhalb der Endkugeln hält die beiden Drähte in konstanter Entfernung. Die zweite Flasche (»Empfänger« B) ist in ihren Dimensionen (Größe der Belegungen, Glasdicke) der ersten möglichst gleichgemacht. Auch die mit den Belegungen verbundenen Drähte sind denen der ersten in Form und Dicke gleich, nur etwas verlängert und nicht mit Endkugeln versehen. Ein



durchbohrtes Metallstäbchen *b* stellt zwischen den beiden Drähten eine leitende Brücke her, die mit mäßiger Reibung beliebig in der Höhe verstellt werden kann. Außerdem sind die Belegungen der Flasche B durch einen Staniolstreifen, der über den Rand des zylindrischen Glasgefäßes geführt und bei *s* durch einen Schnitt unterbrochen ist, miteinander verbunden. Dieser Spalt *s* bildet also die einzige, wenige Zehntelmillimeter breite Unterbrechung in der leitenden Verbindung der beiden Belegungen.

Theorie des Versuches. Werden die Belegungen eines geladenen Kondensators von der Kapazität *C* durch eine leitende Verbindung mit dem Widerstande *w* und dem Selbstinduktionskoeffizienten *S* miteinander verbunden, so gilt für den Strom *i* in der Verbindungsleitung die Differentialgleichung:

$$\frac{Q}{C} = iw + S \frac{di}{dt}$$

Hierbei ist *Q* die jeweilige Ladung (positiv oder negativ) jeder Belegung, und daher ist $\frac{dQ}{dt} = i$.

Ist die Bedingung: $4S > Cw^2$ erfüllt, so ist die Entladung eine gedämpft oszillatorische. Ist Cw^2 gegen $4S$ ganz zu vernachlässigen, so ist die Schwingungsdauer (volle Periode, entsprechend der Dauer einer Doppelschwingung beim Pendel) gegeben durch:

$$\tau = 2\pi \sqrt{C \cdot S}$$

(Vergl. die genauere Ausführung der Theorie in *Kohlrausch*, Lehrbuch der praktischen Physik, S. 606.)

Die Größen C, S, w sind dabei in einem zusammenhängenden Maßsysteme zu messen, z. B. beziehungsweise in Farad, Quadrant und Ohm.

In der Umgebung der vom oszillatorischen Entladungsstrom durchflossenen Leitung entstehen dann elektromagnetische Schwingungen. Die quantitativen Verhältnisse lassen sich in grober Annäherung der Größenordnung nach abschätzen, indem man die Werte für C und S berechnet.

Die Kapazität einer Leydnerflasche ist in elektrostatischen Einheiten (cm) angenähert gegeben durch:

$$C = K \frac{f}{4 \pi d}$$

worin K die Dielektrizitätskonstante der Glassorte (rund $K=5$), f die Flächengröße einer Belegung in cm^2 , d die Glasdicke in cm bezeichnet. Durch Multiplikation mit $1 \cdot 1 \cdot 10^{-12}$ wird der in cm berechnete Wert der Kapazität in Farad umgerechnet.

Der Selbstinduktionskoeffizient S einer Leitung aus zwei parallelen Drähten von der Länge l, vom Radius ϱ und vom gegenseitigen Abstände a berechnet sich in abs. elektromagnetischen Einheiten (cm) zu: $S = 4 l \log \text{nat} \frac{a}{\varrho}$ (natürlicher Logarithmus!); der Selbstinduktionskoeffizient einer kreisförmigen Leitung mit dem Radius R und dem Drahtradius ϱ analog zu: $S = 4 \pi R \log \text{nat} \frac{R}{\varrho}$. Die Umrechnung in Quadrant erfolgt durch Multiplikation mit 10^{-9} .

Indem man auf diese Weise die Kapazität der Leydnerflasche, Summe der Selbstinduktionen des halbkreisförmigen und des aus zwei parallelen Drähten bestehenden Teiles der Verbindungsleitung, berechnet, läßt sich ermitteln, ob die Bedingung der oszillierenden Entladung erfüllt sei bzw. von welcher Größenordnung die Schwingungsdauer ist. Natürlich darf die Exaktheit des gewonnenen Resultates nicht überschätzt werden, es genügt eine beiläufige Ermittlung der Größenordnung.

Findet man z. B. $C = 400 \text{ cm} = \text{zirka } 4 \cdot 10^{-10} \text{ Farad}$ und $S = 250 \cdot 10^{-9} \text{ Quadrant}$, so muß $w < \sqrt{\frac{4S}{C}}$, d. i. kleiner als 50 Ohm sein, damit die Bedingung der oszillatorischen Entladung erfüllt sei. Da der Widerstand der Verbindungsleitung gegenüber dieser Größe verschwindend klein ist, der — schwer abzuschätzende — der Funkenstrecke äquivalente Widerstand erfahrungsgemäß ebenfalls viel kleiner ist, kann diese Bedingung bei der vorliegenden Versuchsanordnung als erfüllt betrachtet werden. Für die Schwingungsdauer τ ergibt sich dann die Größenordnung 10^{-7} sec .

Wird durch passende Einstellung der Brücke an der Flasche B dieselbe Schwingungsdauer hergestellt, so tritt Resonanz ein, und jeder oszillierenden Entladung der Senderflasche entspricht ein Funkenübergang im Spalte s bei der Empfängerflasche.

Ausführung der Versuche. 1) Durch Ausmessen der Dimensionen

mittels der Schublehre werden die oben besprochenen Größen theoretisch ermittelt.

2) Die Belegungen der Senderflasche werden durch Drähte mit den Polen der Influenzmaschine verbunden. Bei kontinuierlichem Drehen dieser springen dann zwischen den Endkugeln der Leitung in kurzen Intervallen Funken über.

Die Empfängerflasche wird der ersten in einer Distanz von zirka 10 cm gegenübergestellt bei paralleler Orientierung der beiden Bügel. Die metallische Verbindungsbrücke wird zunächst etwa in die gleiche Höhe mit den Endkugeln der Senderflasche eingestellt. Durch langsame Verschiebung der Brücke ermittelt man jene Stellung, bei welcher sich die Entfernung der beiden Flaschen am größten machen läßt (zirka 20 bis 25 cm erreichbar), ohne daß der Funkenübergang im Spalte s aufhört; diese Stellung entspricht der maximalen Resonanz. Durch absichtliches Verstellen der Brücke (»Verstimmung«) wird die Resonanzwirkung geschwächt oder ganz unterdrückt.

In der Stellung maximaler Resonanz wird zwischen die beiden Flaschen eine Blechplatte eingeschoben; der Funkenübergang in der induzierten Leitung hört auf, da die gutleitende Metallplatte für die elektromagnetischen Schwingungen undurchlässig ist. Platten aus isolierenden oder halbleitenden Materialien (Paraffinpapier, Holz) lassen dagegen selbst bei einer Dicke von mehreren Millimetern die Wirkung hindurch.

58. Gasentladungen.

Instrumentarium: Exner'sches Elektrometer; Zamboni-Säule; Metallschälchen; Alkohol; Eisenstäbchen; Influenzmaschine; Probescheibchen; Luftpumpe; Drähte; Hufeisenmagnet; Spitzenelektroden; Entladungsrohr; Ventilröhre; Crookes'sche Röhre; Bouquetröhre; Ablenkungsröhre; Röntgenröhre; Röntgenschirm; Bleiblech; Stativ.

Theorie der Versuche. Der Elektrizitätstransport durch Gase, die normalerweise nur sehr geringe Elektrizitätsleitung zeigen, durch Einwirkung bestimmter Agentien aber diese beträchtlich erhöhen, wird von der modernen Theorie analog wie bei den flüssigen Elektrolyten zurückgeführt auf das Vorhandensein resp. die Erzeugung von Gasionen, d. i. mit bestimmten Ladungen (positiv und negativ) versehenen materiellen Trägern, die sich je nach ihrer Masse in einem elektrischen Felde mit größerer oder geringerer Geschwindigkeit bewegen. Bezüglich der verschiedenen Arten von Ionen (Elektronionen, Atomionen, Molionen) und des Mechanismus ihrer Erzeugung entweder durch Dissoziation elektrisch neutraler Gasmoleküle in zwei entgegengesetzt geladene Ionen oder durch Austritt aus der Oberfläche fester und flüssiger Körper muß auf die Spezialwerke [J. Stark, *Elektrizität in Gasen*; J. J. Thomson, *Electricity through Gases*] verwiesen werden.

Ohne besondere Einwirkung ist die Anzahl der Ionen in atmosphärischer Luft oder in abgeschlossenen Gefäßen eine sehr geringe (Zerstreuung,

vergl. Versuch 1). Starke Ionisation wird hervorgerufen bei hinreichend hoher Temperatur, z. B. in Flammen (vergl. Versuch 2). Glühende Oberflächen fester Körper senden unter bestimmten Umständen nur Ionen eines Vorzeichens aus, z. B. nur positive. Der nur positive Ionen enthaltende Gasraum kann daher die Ladung eines negativ elektrischen Körpers neutralisieren und ihn so entladen, während ein positiv geladener Körper im selben Gasraum die positiven Ionen abstößt und seine Ladung behält (Unipolare Leitung, vergl. Versuch 3).

Ionenbildung durch die Wirkung des Lichts auf bestimmte Körper wird noch im nächsten Abschnitte besprochen.

Röntgenstrahlen und die Strahlen radioaktiver Substanzen (vergl. Abschnitt 60, S. 154) erzeugen im Gas gleiche Anzahlen positiver und negativer Ionen.

Eine weitere Quelle starker Ionisierung, der bei den leuchtenden Entladungen die Hauptrolle spielt, ist der sogenannte Ionenstoß. Da die Geschwindigkeit, mit der sich Ionen in einem nicht allzu stark verdünnten Gase bewegen, der elektrischen Feldstärke proportional ist, wird bei hinreichend großen Feldintensitäten eine solche Geschwindigkeit erzielt, daß die Ionen durch ihren Stoß gegen neutrale Gasmoleküle diese in Ionen zerlegen. An spitzen Elektroden (vergl. Versuch 4) wird der dazu erforderliche Wert der Feldintensität am leichtesten erreicht.

Die Lage der Ionisierungspartien bei verschiedenen Formen der Gasentladungen und die daraus folgende Struktur der Lichterscheinungen kann hier nicht weiter ausgeführt werden.

In sehr verdünnten Gasen nehmen bei hinreichender Feldstärke die negativen Elektronen, die an der Kathode erzeugt und von ihr abgestoßen werden, eine beschleunigte Bewegung an und erreichen Endgeschwindigkeiten bis zu $\frac{1}{30}$ der Lichtgeschwindigkeit (Kathodenstrahlen, vergl. Versuche 6, 7, 8). Als bewegte negative Ladungen stellen sie einen Konvektionsstrom dar und erleiden in einem magnetischen Felde, das senkrecht zur Bewegungsrichtung steht, eine ponderomotorische Kraft, die den allgemeinen elektrodynamischen Gesetzen entsprechend dieselbe ist, die ein in gleicher Richtung fließender Leitungsstrom erfahren würde.

Durch die plötzliche Hemmung der rasch bewegten Elektronen beim Auftreffen auf feste Körper entstehen elektromagnetische Impulse, die sich im Äther als »Röntgenstrahlen« mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und um so größere Durchdringungsfähigkeit besitzen, je größer die Endgeschwindigkeit der sie erzeugenden Kathodenstrahlen war (vergl. Versuch 9).

Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche. 1) Das S. 109 beschriebene Exner'sche Elektrometer wird mit dem aufsetzbaren Tischchen versehen. Nach Ladung mittels einer Zambonisäule wird zunächst die Isolation geprüft.

Nähert man dem geladenen Elektrometer einen abgeleiteten Körper, z. B. die Hand, so tritt infolge der Vergrößerung der Kapazität eine Ab-

nahme des Potentials, also eine Verringerung des Ausschlages ein; bei Entfernung des abgeleiteten Körpers stellt sich der ursprüngliche Ausschlag wieder her. Diese auf Kapazitätsänderungen beruhenden Potentialschwankungen bei konstanter Ladung sind mit Entladungsvorgängen nicht zu verwechseln.

Die bei längerer Beobachtungsdauer (z. B. 5 Minuten) merkliche kontinuierliche Entladung beruht teilweise auf mangelhafter Isolation der festen Träger, teils auf der sogenannten »Zerstreuung« der normalerweise schwach ionisierten Luft.

2) Auf das Tischchen des Elektrometers wird ein mit Alkohol gefülltes Schälchen gestellt und dieser entzündet. Wird das Elektrometer hierauf mit der Zambonisäule geladen, so verliert es diese Ladung sofort (binnen weniger Sekunden) infolge der relativ guten Elektrizitätsleitung (starken Ionisierung) der Flamme und der aufsteigenden Flammengase. Auch die Annäherung eines brennenden Zündhölzchens auf etwa 1 dm Entfernung genügt, um das Elektrometer zu entladen, wenn sich die Flamme unterhalb des Tischchens befindet, so daß die aufsteigenden Flammengase dieses treffen.

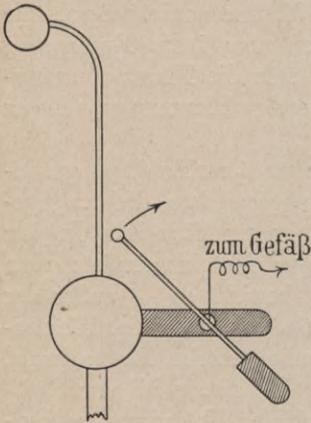
3) Eine Gebläselampe (vergl. S. 161) wird in etwa $\frac{1}{2}$ m Entfernung aufgestellt und der Flamme eine vom Elektrometer abgewendete Richtung gegeben, so daß ein entladender Einfluß nicht mehr merklich ist. In der Gebläseflamme wird ein Eisenstäbchen zu mäßiger Rotglut erhitzt; dem Elektrometertischchen bis auf einige cm genähert, bewirkt es — außer der vorhin erwähnten Kapazitätswirkung — keine Entladung, wenn das Elektrometer positiv geladen wurde, dagegen eine ziemlich rasche Entladung, wenn die Ladung negativ war. Treibt man die Erhitzung bis zur Gelbglut, so ist auch bei positiver Ladung eine merkliche Entladung zu konstatieren. Vor dem Versuche ist das Eisenstäbchen mit Schmirgelpapier blankzuputzen.

4) Büschelentladungen. Eine Wimshurst'sche Influenzmaschine wird in verdunkeltem Zimmer aufgestellt. Nachdem man die Polkugeln auseinandergezogen und die Maschine in Gang gebracht hat, wird mittels des Probescheibchens (vergl. S. 113) durch Ladungsübertragung das Vorzeichen der beiden Pole am Elektrometer geprüft und ihre Lage notiert. Hierauf wird die eine der Polkugeln abgeschraubt und an ihrer Stelle ein spitziges Metallstäbchen eingesetzt, so daß die Spitze etwa 2 bis 3 cm von der zweiten Polkugel entfernt ist. Man beobachtet im dunklen Zimmer das Aussehen der an der spitzen Elektrode auftretenden Büschelentladung, einmal bei positiver Spitze, das zweitemal — nach Aufsetzen der Spitze an Stelle der anderen Polkugel — bei negativer Spitze. Das Büschel an der positiven Elektrode ist gestielt und mehrere mm lang, an der negativen Spitze ist nur ein leuchtender Punkt zu sehen.

Man vergleiche auch die analogen Unterschiede in der Lichterscheinung, die an den Saugkämmen (oder Saugpinseln) der Influenzmaschine auftreten.

An der Saugvorrichtung des positiven Poles tritt hier die kleiner dimensionierte negative Entladungsform auf (da hier negative Elektrizität ausströmt), an der des negativen Poles die längere positive Büschelentladung. Hieran kann eventuell ohne Prüfung mittels Elektrometers das Vorzeichen der Pole erkannt werden.

5) Entladung bei verschiedenem Druck. Ein mit zwei Elektroden und einem offenen Ansatzrohr versehenes Glasgefäß wird durch einen starkwandigen Kautschukschlauch mit der Luftpumpe verbunden (vergl. S. 35). Die Elektroden werden durch Spiralen aus dünnem Draht mit den Polen der Influenzmaschine verbunden. Für diese wie für die folgenden Versuche ist es zweckmäßig, in die Zuleitung zu dem evakuierten Gefäße eine kleine Funkenstrecke einzuschalten. Man legt daher die Verbindungsdrähte nicht direkt an die Bügel, welche die Polkugeln tragen, sondern an das mit isolierendem Handgriff versehene drehbare Stäbchen, das neben dem Bügel angebracht ist, und dessen Ende in beliebige Entfernung vom Bügel eingestellt werden kann.



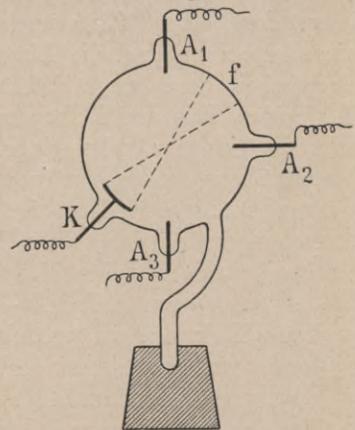
Bei Atmosphärendruck und bei mäßiger Verdünnung nach den ersten Pumpenzügen reicht die Spannung der Elektrisiermaschine zur Erzielung einer leuchtenden Entladung nicht aus; ist der Druck (an der Barometerprobe der Pumpe abzulesen) auf einige cm gesunken, so tritt eine leuchtende Entladung auf, die bei fortgesetztem Pumpen und daher sinkendem Drucke allmählich ihr Aussehen ändert. Die Unterschiede der Struktur der Leuchterscheinungen an der Anode

und an der Kathode werden hierbei deutlich erkennbar.

6) Crookes'sches Rohr. Ein kugelförmiges Gefäß, dessen zugeschmolzenes Ansatzrohr gleichzeitig zum Einstecken in die Bohrung eines Klötzchens dient, ist mit einer hohlspiegelförmigen Kathode und 3 Anodenstiften versehen.

Der Druck innerhalb des Rohres ist sehr gering (einige Tausendstel Millimeter). Die Elektrode K wird mit dem negativen Pole der Elektrisiermaschine verbunden, eine der drei Anoden mit dem positiven. Die von K ausgehenden Kathodenstrahlen erzeugen bei f einen angenähert kreisförmigen Fleck, der das der Glassorte eigentümliche grüne Fluoreszenzlicht aussendet (eine Emission von Röntgenstrahlen ist hier nicht vorhanden).

Welche der drei Anoden zur Stromzufuhr verwendet wird, ist für die Bahn der Kathoden-



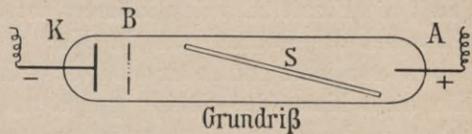
strahlen und daher auch für die Lage des Fluoreszenzfleckes gleichgültig, wie sich bei Wechseln der benutzten Anode ergibt.

Beim Annähern eines Magnets verschiebt sich der Fleck (vergl. auch Versuch 8). Durch oftmalige Bestrahlung verliert das Glas seine Fluoreszenzfähigkeit teilweise, die in der Regel getroffene Stelle fluoresziert daher schwächer als die vom magnetisch abgelenkten Bündel getroffene.

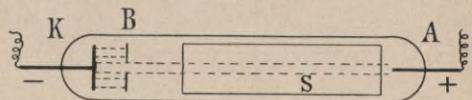
7) Röhre mit fluoreszierenden Substanzen. Ein ungefähr kugelförmiges Glasgefäß mit beiläufig gleichem Grade der Verdünnung wie beim vorigen Versuch enthält eine scheibenförmige Kathode am Scheitel und eine Anode an der Seite. Vertikal unterhalb der Kathode befindet sich, an einem Stiele befestigt, ein aus dünnem Bleche hergestelltes Bouquet, dessen einzelne Blätter mit verschiedenen unter dem Einfluß der Kathodenstrahlen lebhaft fluoreszierenden Stoffen (hauptsächlich diverse Metallsulfide) bestrichen sind. Die Verbindung mit der Elektrisiermaschine erfolgt wieder so, daß die scheibenförmige Elektrode zur Kathode wird. Die Schatten, welche die oberen Blätter auf die unteren werfen, beweisen die Undurchlässigkeit dünner fester Körper für Kathodenstrahlen. Wird die Drehung der Maschine eingestellt, so beobachtet man durch einige Zeit ein Nachleuchten (Phosphoreszenz).

8) Magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen. Ein zylindrisches horizontalstehendes Rohr, analog wie die vorigen evakuiert, besitzt

die in der Figur im Grundriß und im Aufriß gezeichnete Anordnung: links die scheibenförmige Kathode K, dann eine vertikalstehende Blende B, die in der Mitte einen horizontalen Spalt hat, hierauf ein schief zur Längsachse des Rohres gestellter vertikaler Schirm S, dessen Vorderseite mit einer fluoreszierenden Substanz überzogen ist, und endlich die



Grundriß



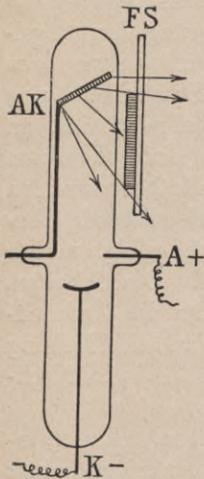
Aufriß

Anode A. Das von der Kathode durch den Spalt hindurchgehende bandförmige Strahlenbündel erregt längs eines geraden Streifens ss' auf dem Schirme Fluoreszenz. Wird ein Hufeisenmagnet in vertikaler Stellung derart über das Rohr gehalten, daß dessen Mitte zwischen den Polen liegt, daß also die horizontal verlaufenden magnetischen Kraftlinien senkrecht zu den Kathodenstrahlen stehen, so tritt eine Ablenkung der Strahlen ein, und zwar nach oben, wenn der Nordpol hinten, nach unten, wenn er vorn liegt; der fluoreszierende Streifen erscheint entsprechend gebogen.

Bringt man dagegen die Pole des Magnets über und unter die Röhre, so daß das Feld vertikal verläuft, so biegt sich das Strahlenbündel in einer horizontalen Ebene nach vorn oder nach hinten, je nach der Lage der Pole; im ersten Falle tritt dann auch Fluoreszenz auf der vorderen Glaswand ein, während der Streifen auf dem Schirm verkürzt ist.

9) Röntgenröhre. Die verwendete Röhre gibt nur Röntgenstrahlen geringer Intensität und mäßiger Durchdringungsfähigkeit, ist aber mittels einer gewöhnlichen Elektrisiermaschine oder eines kleinen Funkeninduktors zu betreiben, während die größeren Röntgenröhren sehr hohe Spannung, somit große Induktoren oder vielplattige Influenzmaschinen erfordern.

Die zylindrische Röhre wird in vertikaler Stellung mit einem der beiden seitlichen Ansatzrohre in ein Stativ geklemmt; die scheibenförmige Elektrode K dient als Kathode, sendet also die Kathodenstrahlen vertikal nach aufwärts; die ringförmige Anode A und die sogenannte »Antikathode« AK, ein unter 45° geneigtes Platinblech, werden miteinander und mit dem positiven Pole der Maschine verbunden. Die von den Kathodenstrahlen getroffene Antikathode ist der Ausgangspunkt der Röntgenstrahlen.



In ein zweites Stativ klemmt man dicht vor AK einen mit Baryum-Platin-Cyanür beschriebenen Fluoreszenzschirm FS, die beschriebene Seite dem Beobachter zugewendet. Die durch die Kathodenstrahlen hervorgerufene Glasfluoreszenz wird zweckmäßig durch einen beliebigen Schirm (schwarzes Papier) vom Beobachter abgeblendet, damit die Fluoreszenz des Schirmes infolge der Röntgenstrahlen, welche die Glaswand des Rohres und die Kartonschicht des Schirmes durchdrungen haben, deutlicher erkennbar wird (das Zimmer ist hierbei gut zu verdunkeln). Ein dicht hinter den Schirm gehaltenes Blechstück wirft einen deutlichen Schatten, da es die Röntgenstrahlen merklich absorbiert.

59. Lichtelektrische Entladung (Hallwachseffekt).

Instrumentarium: Exner'sches Elektrometer mit Tischchen; Zambonisäule; amalgamierte Zinkplatte; Quecksilber; Seidenpapier; Aluminiumblech; Magnesiumband; Pinzette; Stativ; Blende; Quarzplatte; Glasplatte; Kaliumzelle; farbige Gläser.

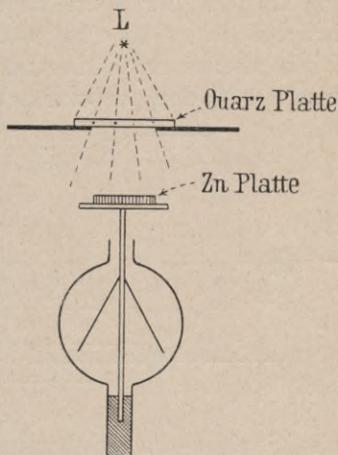
Theorie der Versuche. Unter dem Einflusse geeigneter Belichtung, hauptsächlich ultravioletter Strahlen, senden viele Stoffe negative Elektronen aus, die sich im Vakuum als Kathodenstrahlen relativ geringer Geschwindigkeit bewegen, in Gasen größerer Dichte aber nach Durchlaufen sehr kleiner Schichtdicken gehemmt und in negative Molionen umgewandelt werden, indem eine Anlagerung mehrerer Gasmoleküle stattfindet. Bei negativer Ladung des Körpers werden diese Molionen abgestoßen, bei positiver dagegen zum Körper zurückgetrieben. Es erfolgt daher bei einer solchen »lichtelektrisch empfindlichen« Oberfläche durch Belichtung mit »wirksamen«, d. h. Elektronenemission hervorrufenden Strahlen eine Entladung bei negativem Vorzeichen der Ladung, dagegen keine Entladung bei

positivem Vorzeichen (lichtelektrische Entladung oder Hallwachseffekt).

Zink, besonders amalgamiertes Zink, und Aluminium sind Substanzen großer lichtelektrischer Empfindlichkeit, wenn die Oberfläche rein metallisch (blankgeputzt resp. frisch amalgamiert) ist. Einzelne Stoffe, z. B. Natrium, Kalium, Rubidium, sind nicht nur für ultraviolette Strahlen, sondern auch in sichtbarem Licht empfindlich; doch nimmt die Wirkung für das langwellige Ende des Spektrums stark ab.

Beschreibung der Apparate und Ausführung der Versuche.

1) Lichtelektrische Entladung an Zink und Aluminium. Das Exner'sche Elektrometer wird mit dem Tischchen versehen und auf dieses eine Zinkplatte gelegt, deren obere Fläche frisch amalgamiert wurde. Zu diesem Zwecke bringt man einige Quecksilbertropfen auf die Fläche und verreibt sie mit Seidenpapier. In zirka 10 cm Abstand wird oberhalb des Elektrometers eine Blende (Blechplatte) in einem Stative festgeklemmt, so daß das Loch (von etwa 5 cm Durchmesser) sich gerade über der Zinkplatte befindet. Über dieses Loch wird zunächst eine Quarzplatte gelegt.



Ein wenige cm oberhalb des Quarzfensters gehaltenes brennendes Magnesiumband (Lichtquelle, die reich an ultravioletten Strahlen ist) belichtet die Zinkplatte und ruft rasche Entladung hervor, wenn das Elektrometer negativ geladen wurde, während bei positiver Ladung die Belichtung wirkungslos ist. Die ionisierende Wirkung der Flamme ist hierbei durch Blende und Fenster abgehalten.

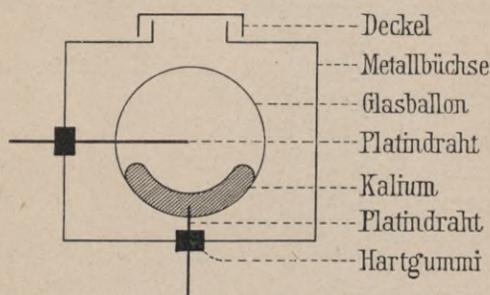
Wird das Quarzfenster durch eine Spiegelglasplatte ersetzt, so wird die lichtelektrische Entladung bedeutend verkleinert, da hauptsächlich die von der Quarzplatte durchgelassenen, von der Glasplatte absorbierten ultravioletten Strahlen wirksam sind.

Analog wie die amalgamierte Zinkplatte verhält sich ein blankgeputztes Aluminiumblech. Das Messingtischchen allein dagegen erweist sich als lichtelektrisch unempfindlich.

2) Lichtelektrische Entladung in Kaliumzelle nach Elster und Geitel. Die lichtelektrische Kaliumzelle nach Elster-Geitel besteht aus einem kugelförmigen Glasballon, in dem metallisches Kalium die eine Hälfte der Innenwand bedeckt; durch einen das Glas durchsetzenden Platindraht ist das Kalium nach außen hin mit einem Elektroskop in leitende Verbindung zu setzen. Ein zweiter Platindraht bildet die andere Elektrode für die Entladung, die in der Zelle entstehen soll. Da das Kalium in Luft oxydieren würde, ist der Glasballon statt mit Luft mit verdünntem Wasser-

stoff gefüllt. Die ganze Zelle ist in eine Metallbüchse eingebaut, die bloß zwei mit Hartgummipfropfen verschlossene Öffnungen besitzt zur isolierten Durchführung der Zuleitungen zu den Elektroden. Der Kaliumfläche gegenüber befindet sich in der Metallbüchse eine kreisförmige Öffnung, die durch einen gut passenden Deckel lichtdicht verschlossen werden kann (vergl. Figur).

Wird die Kaliumelektrode mit dem Elektroskop verbunden, die zweite Elektrode zur Erde abgeleitet, so erhält sich die Ladung des Elektroskops — ohne Rücksicht auf ihr Vorzeichen —, solange der Deckel geschlossen bleibt. Wird der Deckel abgehoben und die Kaliumfläche durch eine Glühlampe belichtet, so erhalten wir die gleiche Erscheinung wie früher bei der Zinkplatte: eine positive Ladung bleibt unbeeinflusst, eine negative wird rasch entladen, daher rasches Zusammenfallen der Elektroskopblättchen.



Werden nun statt des Deckels verschieden gefärbte Glasplatten über die Öffnung gelegt, so zeigt sich folgendes: bei rotem Glase findet keine Entladung statt, bei gelbem eine langsame, bei grünem eine etwas raschere; bei blauem Glase ist die Entladung fast ebenso rasch wie im direkten Lichte ohne Farbenfilter. In diesem Falle sind

also Strahlen des sichtbaren Lichtes wirksam gewesen, besonders das blaue Licht; nur Rot war unwirksam.

60. Radioaktivität.

Instrumentarium: Projektionselektrometer mit Reserveteller und -topf; Zambonisäule; Urannitrat; Auerstrumpf; Pecherz; Platinblech mit Poloniumüberzug; Röhrenchen mit Radium-Baryum-Chlorid; Flasche mit Radium-Baryum-Chloridlösung; 2 Metallschälchen; Kork mit Metallstift; Bleiplatte; Bleizylinder; Staniol; Stopuhr.

Theorie der Versuche. Die von radioaktiven Substanzen ausgehenden Becquerelstrahlen zerfallen in drei Gruppen: α -, β - und γ -Strahlen. Gemeinsam ist allen drei Arten die Fähigkeit, ein Gas, das sie durchsetzen, zu ionisieren und damit leitend zu machen, auf die photographische Platte einzuwirken und bei hinreichender Intensität an verschiedenen Stoffen Fluoreszenz zu erregen.

Unterschiede bestehen hinsichtlich dieser Wirkungen in quantitativer Beziehung sowie bezüglich der Absorbierbarkeit und des Verhaltens gegen magnetische und elektrische Kräfte.

Die α -Strahlen sind positiv geladene Partikel (wahrscheinlich von der Masse eines Heliumatoms), die sich mit einer Geschwindigkeit von der

Größenordnung $10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ (etwas verschieden bei verschiedenen α -strahlenden Substanzen) bewegen; ihr Ionisierungsvermögen ist ein großes, ihre Durchdringungsfähigkeit aber klein, so daß einige cm Luft normaler Dichte oder dünne Metallschichten (z. B. Zinn von 0.1 mm Dicke) vollständige Absorption bewirken (Versuch 7).

Die β -Strahlen sind ihrer Natur nach mit den Kathodenstrahlen identisch, d. h. raschbewegte negative Elektronen. Ihre Geschwindigkeit ist viel größer als bei künstlich erzeugten Kathodenstrahlen (vergl. S. 148) und reicht bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit heran; dementsprechend ist auch ihr Durchdringungsvermögen ein viel größeres als das der Kathodenstrahlen in evakuierten Gefäßen, und ihre Wirkung ist durch dünne Metallbleche, Glas etc. noch leicht konstatierbar (Versuche 2 und 8).

Die γ -Strahlen sind in ihrem Wesen mit Röntgenstrahlen identisch und wie diese sehr durchdringungsfähig (Versuch 9).

Sowohl zur Demonstration wie zu genaueren quantitativen Bestimmungen eignet sich am besten die ionisierende Wirkung der Strahlen. Die Entladungsgeschwindigkeit eines isolierten Systems (z. B. Elektrometer mit aufgesetztem Tischchen) in einem durch die Strahlung ionisierten Gasraum ist ein relatives Maß der Strahlungsintensität.

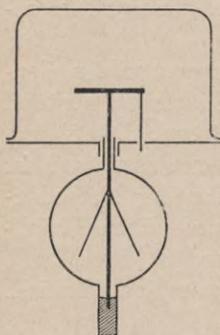
Nach der von *Rutherford* und *Soddy* aufgestellten sogenannten Zerfallstheorie beruhen die radioaktiven Erscheinungen darauf, daß die Atome radioaktiver Elemente aus elektrisch geladenen Elementarbestandteilen (α -Partikeln von der Masse eines Heliumatoms mit der positiven Ladung eines zweiwertigen Ions und negativen Elektronen) zusammengesetzte instabile Gebilde sind, die unter Aussendung solcher Bestandteile, d. h. α - und β -Strahlen aussendend, in Atome geänderter Masse und damit in Atome eines neuen Elementes übergehen. Die Geschwindigkeit der Umwandlung, d. h. der Bruchteil der pro Zeiteinheit zerfallenden Atome, und damit die Intensität der ausgesendeten Strahlung ist für verschiedene radioaktive Stoffe verschieden.

Von den vor Entdeckung der Radioaktivität bekannten Elementen sind schwach radioaktiv das Uran (Versuch 1) und das Thor (Versuch 5). Bedeutend stärker aktiv (millionenfach) sind die besonders in Uranerzen (Versuch 4) in geringer Menge enthaltenen Stoffe: Radium (Versuch 8 und 9), Aktinium und Polonium (Versuch 6 und 7).

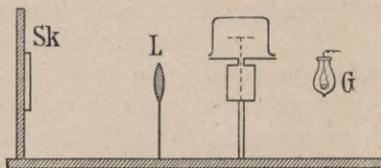
Aus den Atomen der genannten Stoffe entstehen beim Zerfall zunächst wieder instabile Atome, die daher gleichfalls radioaktive Stoffe (Zerfallsprodukte) größerer oder geringerer Umwandlungsgeschwindigkeit bilden. Die Aufzählung der derzeit bekannten Zerfallsprodukte würde hier zu weit führen. Erwähnt sei nur die gasförmige Radiumemanation, die unmittelbar aus Radium entsteht und z. B. im Luftraume oberhalb einer Radium enthaltenden Lösung angesammelt ist, sowie die sogenannte »induzierte Aktivität«, die aus der Radiumemanation entsteht und rasch

zerfällt (Versuch 10). Auch Polonium ist als Zerfallsprodukt des Radiums aufzufassen.

Beschreibung des Apparates. (Projektionselektrometer für Versuche über Radioaktivität). Ein Exner'sches Elektrometer von der S. 109 beschriebenen Form ist mit einem aufsetzbaren Tischchen versehen, außerdem mit einem metallischen Teller, der auf den Hals des Elektrometers mittels eines kurzen Ansatzrohres aufgesteckt ist. Über den Teller ist ein Metalltopf gestülpt, der infolge des metallischen Kontaktes mit Teller und Gehäuse wie dieses zur Erde abgeleitet ist. Ein durch ein kleines Loch des Tellers herausragender Draht führt zum Tischchen und gestattet, das isolierte System jederzeit mittels der Zambonisäule zu laden.



Das Elektrometer ist zusammen mit einer Projektionslinse und einem mit Skala versehenen Schirme fix montiert auf einem Grundbrette. Wird das Elektrometer mit einer bei G aufgestellten Glühlampe beleuchtet, so entwirft die Linse L ein scharfes Bild der Blättchen auf dem Schirme, derart, daß die Divergenz der Blättchen an der Skala abgelesen werden kann.



Ausführung der Versuche. 1) Das Projektionselektrometer wird zunächst mit der Zambonisäule geladen und bezüglich seiner Isolation geprüft.

Ein Metallschälchen von etwa 5 cm Durchmesser und 1 cm Höhe wird mit Uranylнитratkristallen gefüllt und auf das Tischchen des Elektrometers gestellt; hierauf wird der Topf wieder darübergestülpt und die Entladungsgeschwindigkeit, einmal bei positiver, das andre Mal bei negativer Ladung, mittels der Stopuhr beobachtet; die Zeit τ_1 , in welcher der Ausschlag von 20 auf 10 Skalenteile sinkt, wird notiert. $\frac{1}{\tau_1}$ ist ein relatives Maß der Intensität der Strahlung.

2) Das Metallschälchen wird mit einem Blatte Staniol überdeckt und hierauf wie früher die Zeit τ_2 für die Entladung von 20 auf 10 Skalenteile bestimmt. $\frac{1}{\tau_2}$ ist ein Maß der durchdringenden (β - und γ -) Strahlung, die nur einen Bruchteil der in Versuch (1) bestimmten Gesamtstrahlung ausmacht.

3) Das Schälchen wird mit einer zirka 2 mm dicken Bleiplatte bedeckt. Die Entladungsgeschwindigkeit ist nicht merklich von der bei der Isolationsprobe beobachteten verschieden.

4) An Stelle des Schälchens mit Uranylнитrat wird ein gleichdimensioniertes mit feinkörnig zermahlenem Pecherz aufgesetzt. Die Entladungsgeschwindigkeit ist größer als bei Uranylнитrat.

5) Ein Auerstrumpf (Thoroxyd enthaltend) wird auf das Tischchen gesetzt und bezüglich seiner Radioaktivität geprüft.

Bei Versuch 4 und 5 kann eventuell die aus Radium- resp. Thorium-emanation entstehende induzierte Aktivität an den Wänden des Topfes sich niederschlagen; die Isolation wird daher neuerlich geprüft, eventuell wird für die folgenden Versuche Topf und Teller gewechselt.

6) Ein Platinblech, das auf elektrolytischem Wege mit einer unsichtbaren und unwägbaren Menge Polonium (zirka 10^{-6} mg) überzogen wurde, wird auf das Tischchen gelegt. Die Blättchen fallen so rasch zusammen, daß die Messung der Zeit unausführbar ist.

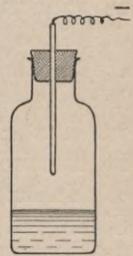
7) Das Poloniumpräparat wird in eine zweifache Staniolhülle eingewickelt und wie vorher geprüft. Die Entladungsgeschwindigkeit ist unmerklich, da Polonium bloß α -Strahlen aussendet, die durch eine doppelte Lage gewöhnlichen Staniols bereits vollkommen absorbiert werden.

8) Ein zugeschmolzenes Glasröhrchen, das Ra-Ba-Chlorid enthält, wird auf das Elektrometertischchen gelegt; die Entladungsgeschwindigkeit ist sehr groß, trotzdem nur mehr die β - und γ -Strahlen wirksam sind.

9) Dasselbe Röhrchen wird in eine zylindrische Bleibüchse von einigen mm Wandstärke gebracht und neuerlich geprüft. Die Wirkung der γ -Strahlen, die allein noch das Blei durchdringen, ist noch deutlich erkennbar.

10) Eine in separiertem Raume aufbewahrte Flasche enthält eine sehr verdünnte wässrige Lösung von Ra-Ba-Chlorid. Bei ruhigstehender Flasche wird der Glasstöpsel entfernt und ein Kork eingesetzt, der ein Metallstäbchen trägt. Es ist darauf zu achten, daß dieses mit der Flüssigkeit nicht in Berührung kommt, sondern bloß in die Luft oberhalb der Lösung eintaucht.

Nach etwa einer halben Stunde wird der Kork wieder vorsichtig (ohne Berührung des Stäbchens mit der eventuell benetzten Gefäßwand) herausgenommen und die Flasche sofort wieder verschlossen. Das aus dem Kork entfernte Stäbchen wird auf seine Aktivität geprüft, indem die Entladungszeit τ wiederholt in kurzen Intervallen gemessen wird. Die zunehmenden Werte von τ zeigen die zeitliche Abnahme der induzierten Aktivität an. Nach einigen Stunden ist sie bereits unmerklich klein geworden. Die induzierte Aktivität wird verstärkt, wenn man das Stäbchen während der Exposition im Gefäße durch Verbindung mit dem negativen Pole einer Zambonisäule negativ geladen hält.



Anhang.

1. Reinigung von Quecksilber.

Instrumentarium: 2 Flaschen mit Glasstöpsel; Salpetersäure; Kalilauge; Abdampfschale; Glasplatte; Kuvette; Bunsenbrenner; Dreifuß; Drahtnetz; Papier; Thermometer.

NB. Sämtliche Operationen sind auf dem Quecksilbertische (mit Randleiste, Rinnen und Lade unter der Abtropföffnung) vorzunehmen!

Durch geringe Mengen gelöster Metalle verunreinigtes Quecksilber wird gereinigt, indem man es in einer Flasche, die es etwa zu $\frac{1}{3}$ füllt und ein weiteres Drittel stark verdünnter Salpetersäure enthält, bei gut verschlossenem Halse (am besten dichtsitzender, eingeriebener Glasstöpsel) kräftig schüttelt. Das Schütteln wird so lange fortgesetzt, bis das Quecksilber in sehr kleine Kügelchen zerfällt, die erst einige Sekunden nach Aufhören des Schüttelns zusammenfließen. Nach Abgießen (Vorsicht, daß kein Hg ausläuft!) der Salpetersäure wird das Quecksilber mit reinem Wasser geschüttelt und zuletzt in eine größere Abdampfschale gegossen. Die Hauptmasse des Wassers wird durch vorsichtiges Abgießen entfernt, der Rest zunächst mittels Filtrierpapiers und zuletzt durch Erwärmen auf etwa 110° C. Hierzu wird in eine größere Porzellankuvette ein Bunsenbrenner gestellt und die Schale auf einen darübergestellten Dreifuß mit Drahtnetz gegeben; die Schale wird mit einer Glasplatte überdeckt, damit die beim Sieden des Wassers eventuell emporgeschleuderten Quecksilbertröpfchen aufgefangen werden. Diese Trocknung wird nicht auf dem Quecksilbertische, sondern im chemischen Herde bei brennender Abzugsflamme ausgeführt.

Zuletzt wird das getrocknete und wieder ausgekühlte Quecksilber von Staub und Oxydschichten durch Filtrieren befreit. Aus $\frac{1}{4}$ Bogen gewöhnlichen weißen Schreibpapiers wird eine Tüte gedreht, die an der Spitze ein feines Loch freiläßt. Diese Tüte wird vertikal in den Hals der eventuell vorher gereinigten und getrockneten zweiten Flasche eingesteckt und nur so weit mit Quecksilber gefüllt, daß der Papiertrichter weder zerreißt noch umkippt. Filtrieren von nassem Quecksilber auf diese Weise ist zu vermeiden, da sich sonst das Papier erweicht und zerreißt.

Während reines Quecksilber in feinem Strahle durch das Loch ausfließt, bleiben die auf der Oberfläche schwimmenden Verunreinigungen beim Sinken des Niveaus an der Papierwand haften. Der letzte Rest wird zweckmäßigerweise vor Beendigung des Ausflusses in ein bereitgehaltenes Schälchen gegossen und mit dem Vorrat verunreinigten Quecksilbers vereinigt.

Erfordert die vorhandene Menge ein Filtrieren in mehreren Partien, so wird der Papiertrichter jedesmal erneuert. Ist das Quecksilber nicht amalgamiert, aber fettig, so wird statt mit verdünnter Salpetersäure mit ver-

dünnter Kalilauge (oder mit Benzin) geschüttelt und nachher gewaschen, getrocknet und filtriert wie oben. Häufig sind bloß Staub und Oxydschichten als Verunreinigungen vorhanden; in diesem Falle genügt das einfache Filtrieren durch Papier.

Reines trockenes Quecksilber, nasses, aber sonst reines und verunreinigtes sind nach ihrer Verwendung getrennt in den entsprechend bezeichneten Vorratsflaschen aufzubewahren.

2. Trocknen von Glasgefäßen.

Instrumentarium: Absoluter Alkohol; Äthyläther; Wasserstrahlpumpe; 2 Flaschen mit Waschalkohol und mit Waschäther.

Ausführung. Handelt es sich darum, ein Glasgefäß (Pyknometer, Flasche, Röhre etc.) rasch zu trocknen, so ersetzt man das Wasser durch eine rasch verdampfende Flüssigkeit wie Äthyläther (= Schwefeläther). Da aber Äther sich mit Wasser fast nicht mischt, muß eine Zwischenspülung mit Alkohol erfolgen. Es wird also erst das Gefäß mit Alkohol ausgespült, so daß nach dem Abgießen bloß einige Tropfen spurenweise wasserhaltigen Alkohols haften bleiben, die sich in dem hierauf eingegossenen Äther vollständig lösen. Nach Abgießen des Äthers verdampft der zurückgebliebene Rest sehr rasch, besonders wenn mittels der Wasserstrahlpumpe ein Luftstrom durch das Gefäß hindurchgesaugt wird, der die Dämpfe entfernt. Das Verdampfen der Ätherreste durch Erwärmung über einer Flamme wird besser vermieden, da hierbei leicht Explosionen auftreten.

Die abgegossenen Mengen des bei dieser Operation verunreinigten Alkohols und Äthers sind noch zu Reinigungszwecken verwendbar und werden daher in die mit den Aufschriften »Waschalkohol« und »Waschäther« versehenen Flaschen geschüttet.

Handelt es sich nicht darum, ein nasses Gefäß wirklich zu trocknen, sondern bloß das Wasser zu entfernen, damit eine zweite, nachträglich einzufüllende Flüssigkeit nicht verdünnt werde (z. B. bei Bestimmung spezifischer Gewichte mittels des Pyknometers u. dergl.), so ist es einfacher, das Gefäß mit der betreffenden Flüssigkeit einmal, eventuell zweimal vorzuspülen und dann die definitive Füllung vorzunehmen. Natürlich ist dieses Verfahren nur anwendbar bei Flüssigkeiten, die sich mit Wasser mischen und deren Wert ein so geringer ist, daß die zur Vorspülung verwendeten Quanten weggeschüttet werden können.

3. Herstellung einer Seifenlösung für Kapillaritäts- und optische Versuche.

Instrumentarium: 2 Literflaschen mit eingeriebenem Glasstöpsel; Messur; Handwage; ölsaures Natron; Glyzerin; Heber.

Ausführung. Nach dem von *Boys* stammenden Rezept wird eine

gut haltbare Seifenlösung etwa eine Woche vor ihrer erstmaligen Verwendung in folgender Weise hergestellt:

In eine gut gereinigte Glasflasche von etwa 1 l Inhalt werden 750 cm³ destilliertes Wasser und 20 g ölsaures Natron eingefüllt. Zur vollständigen Auflösung bleibt die Flasche zunächst einen Tag stehen. Hierauf wird $\frac{1}{4}$ l reinen Glycerins zugesetzt und die Flasche geschüttelt, bis eine vollständige Durchmischung eingetreten ist. An lichtgeschützter Stelle wird dann die luftdicht verschlossene Flasche durch etwa eine Woche aufbewahrt und dann die Flüssigkeit mittels eines Hebers in eine zweite reine Flasche übergeleitet, während der vom Schütteln herrührende Schaum zurückgelassen wird. Zur Erhöhung der Haltbarkeit setzt man noch einige Tropfen Ammoniak zu und bewahrt die Vorratsflasche gut verschlossen im dunklen Raume auf.

4. Einige einfache glastechnische Operationen.

Instrumentarium: Glasblasetisch mit Gebläselampe; Bunsenbrenner; Schmetterlingsbrenner; Glasfeile; Glasröhren.

Ausführung. Ausführliche Anleitung zu glastechnischen Arbeiten findet man in »H. Ebert, Anleitung zum Glasblasen; Leipzig, A. Barth, 1895«. Hier sollen bloß einige der allereinfachsten Operationen behandelt werden, die bei improvisierten Versuchsanordnungen oder als Reparaturen besonders häufig vorkommen und ohne besondere Übung in wenigen Minuten ausgeführt werden können. Es wird bloß die Verwendung von Kapillarröhren oder sogenannten »Biegeröhren« von 5 bis 15 mm äußerem Durchmesser und 1 bis 2 mm Wanddicke vorausgesetzt. Weite Röhren, besonders bei geringer Wandstärke, sind schwieriger zu bearbeiten.

NB. Es sollen bloß reine und trockene Glasstücke in die Flamme gebracht werden!

1) Abschneiden von Glasröhren. Soll aus einem längeren geraden Röhrenstück ein kürzeres herausgeschnitten werden, so wird an der Stelle, wo die Trennung erfolgen soll, mittels einer dreikantigen Feile ein kurzer Feilstrich senkrecht zur Röhrenachse gezogen. Hierauf faßt man das Rohr zu beiden Seiten des Feilstriches mit den Händen, wobei der Strich dem Gesicht zugewendet ist. Das Abbrechen erfolgt, indem man hauptsächlich die gefaßten Enden auseinanderzieht und mit nur ganz mäßiger Kraftanwendung gleichzeitig derart zu biegen versucht, daß die geritzte Stelle an der konvexen Seite liegt; die Bruchstelle bildet dann eine in der Ebene des Feilstriches gelegene glatte Fläche. Ist das abzubrechende Stück nur kurz, so daß das Anfassen erschwert ist, so umwickelt man die Hand vorher mit einem Tuche.

2) Abrunden der Enden. Der scharfkantige Rand einer nach (1) abgeschnittenen Röhre kann leicht Verletzungen herbeiführen, auch eventuell darüberzuschiebende Kautschukschläuche durchschneiden, soll daher stets

sofort nach der Herstellung abgerundet werden. Man fährt daher mit dem abzurundenden Ende zunächst einige Male durch eine nichtleuchtende Bunsenflamme, um etwas vorzuwärmen; dann hält man den Endquerschnitt unter stetigem Drehen des Rohres um seine Längsachse in den Saum der Bunsenflamme, bis sich diese gelb färbt. Das erweichte Glas bildet infolge der Oberflächenspannung eine abgerundete Kante.

Zum Abkühlen legt man die Röhre so auf, daß das vorher erhitzte Ende nicht die Tischplatte berührt, sondern freisteht.

3) Zuschmelzen eines Röhrenendes. Soll ein abgeschnittenes Rohr an einem Ende zugeschmolzen werden, so verwendet man statt des Bunsenbrenners die Gebläselampe. Die Luftzufuhr erfolgt bei dieser durch einen Schlauch, der mit dem unterhalb des Tisches angebrachten Blasebalg in Verbindung steht. Die beiden Zuführungen von Leuchtgas und Luft sind mit Hähnen versehen, an denen die Zufuhr geregelt werden kann, so daß nach Belieben verschiedene Flammenformen entstehen: a) leuchtende und russende Flamme bei voller Gaszufuhr und abgesperrter Luftzufuhr; b) die rauschende, pinselförmige, sogenannte »Brause-« oder »Besenflamme« bei voller Gaszufuhr und ziemlich reichlicher Luftzufuhr; c) die sehr heiße, bloß blau leuchtende Stichflamme bei mäßiger Gas- und entsprechend regulierter Luftzufuhr.

Die Gebläselampe wird so aufgestellt, daß die Flamme vom Arbeitenden weg unter zirka 45° aufsteigt.

Das zuzuschmelzende Rohrende wird zunächst in der Brauseflamme vorgewärmt, dann unter stetigem Drehen in der Stichflamme erhitzt, so daß etwa auf eine Länge von $\frac{1}{2}$ cm ein Erweichen des Glases eintritt. Bei dünneren Röhren — wie hier vorausgesetzt — tritt bald von selbst ein Zusammenfließen der Ränder ein. Nun wird die Röhre aus der Flamme genommen und mit dem zugeschmolzenen Ende nach abwärts vertikal gehalten; man bläst beim oberen offenen Ende kurz hinein, damit die weiche Glasmasse, welche den Verschluß bildet, sich kuppenförmig aufwölbt.

Beim Kühlen ist wieder Berührung mit der Tischfläche zu vermeiden.

4) Ausziehen von Röhren. Will man ein Glasrohr mit konisch sich verjüngendem Ende herstellen (z. B. als Ansatzstück für Schläuche, zur Erzeugung empfindlicher Flammen etc.), so schneidet man zunächst ein Stück ab, das um etwa 5 cm länger ist als das gewünschte Stück. Mit beiden Händen wird es horizontal gehalten und unter stetigem Drehen zunächst in der leuchtenden Flamme an einer vom Ende etwa 5 cm entfernten Stelle vorgewärmt. Hierauf erzeugt man die Stichflamme und läßt das Rohr an dieser Stelle auf eine Länge von 1 bis 2 cm erweichen. Die beiden Enden werden hierbei fortwährend gedreht; es erfordert einige Übung, mit der rechten und linken Hand so gleichmäßig zu drehen, daß die erweichte Stelle nicht schraubenförmig zusammengedreht wird.

Sobald die Erweichung eingetreten ist, hebt man die Röhre aus der Flamme heraus und zieht die beiden Enden mehr oder weniger rasch aus-

einander, das gleichmäßige Drehen dabei wie früher fortsetzend. Bei langsamem Auseinanderziehen entsteht ein langgestreckter, allmählich sich verjüngender Doppelkegel, bei raschem ein kurzer mit größerem Öffnungswinkel.

Nach dem Erkalten wird an der gewünschten Stelle die Trennung nach demselben Verfahren wie in (1) ausgeführt.

5) Biegen von Röhren. (Herstellung eines U-Rohres.) An Stelle der Gebläselampe wird ein Schmetterlingsbrenner verwendet. Die Stelle des Rohres, an welcher die Biegung stattfinden soll, wird unter stetigem Drehen auf eine Länge von mindestens 5 cm in der Flamme erhitzt, indem man das Rohr zu beiden Seiten dieser Stelle mit den Händen faßt und parallel der Flammenebene hält. Nach Erweichen des Glases wird außerhalb der Flamme mit sanfter — nicht heftiger — Bewegung die Biegung vorgenommen und dabei darauf geachtet, daß die beiden Schenkel des Rohres in der gleichen Ebene liegen.

Handelt es sich bloß um die Herstellung eines rechtwinklig gebogenen Rohres, so erwärmt man wie vorher unter Drehen nicht ganz bis zum Erweichen des Glases, stellt dann das Drehen ein und läßt mit der einen Hand los, so daß der losgelassene Teil beim Erweichen sich durch die eigene Schwere allmählich vertikal stellt, während der andere in horizontaler Lage festgehalten wird.

5. Behandlung der Projektionslampe.

Instrumentarium: Bogenlampe; Vorschaltwiderstand; 2 Kondensoren-linsen; Projektionslinse; Schirm.

Ausführung. Die Bogenlampe selbst besteht aus einem Stativ, das die beiden Kohlenstäbe in ihrer gegenseitigen Verlängerung stehend, und zwar entweder in vertikaler Stellung oder unter zirka 45° geneigt, enthält. Die Änderung der Entfernung der beiden Kohlen spitzen voneinander ist bei dem hier verwendeten Typus (sogenannter Handregulator) durch einen Trieb zu bewerkstelligen. Ein zweiter Trieb gestattet, bei konstanter Entfernung der beiden Kohlen das ganze System zu heben oder zu senken. Die Lampe ist eingebaut in einen mit Asbestpappe ausgekleideten Schutzkasten, der vorn eine kreisförmige Öffnung für den Lichtaustritt, zu beiden Seiten kleine Fensterchen enthält, die — mit übereinandergelegten farbigen Gläsern (am besten rotes und grünes Glas) bedeckt — eine Beobachtung des Bogens gestatten; direktes Hineinsehen in den Bogen ist des grellen Lichtes halber zu vermeiden. Die Rückwand des Lampenkastens ist durch einen schwarzen Vorhang ersetzt. Innerhalb des Kastens ist die Lampe in einer Schlittenführung noch horizontal nach vorn und hinten verschiebbar.

Der Betrieb einer Bogenlampe erfordert mindestens eine Spannung von rund 40 Volt, bei höherer Spannung ist ein in die Zuleitung fix eingebauter Vorschaltwiderstand entsprechend zu regulieren. Da die Kohlenelektroden

beim Übergang einer leuchtenden Entladung (Bogenentladung) sich einigermaßen analog verhalten, wie die Elektroden einer polarisierten elektrolytischen Zelle mit einer »elektromotorischen Gegenkraft« von rund 40 Volt, berechnet sich die tatsächliche Stromstärke i in der Lampe aus der EMK der Stromquelle E und dem Vorschaltwiderstande w (bei Vernachlässigung der übrigen Widerstände in der Leitung) zu:

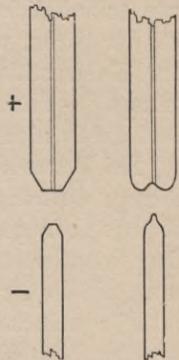
$$i = \frac{E - 40}{w}$$

Bei selbstregulierenden Lampen, die für eine bestimmte angegebene Stromstärke (z. B. 12 oder 15 A) gebaut sind, ist daher der Widerstand w entsprechend zu wählen. Bei Handregulatoren ist die Stromstärke innerhalb gewisser Grenzen (natürlich jedenfalls unterhalb der für die Zuleitungskabel zulässigen Maximalstromstärke) willkürlich variabel; im vorliegenden Falle ist z. B. $E = 110$ Volt (Gleichstromschaltbrett), $w = 7$ Ohm, also i rund 10 A. Im allgemeinen kann man bei Bogenlampen pro Ampere etwa 100 Kerzen Lichtstärke ansetzen.

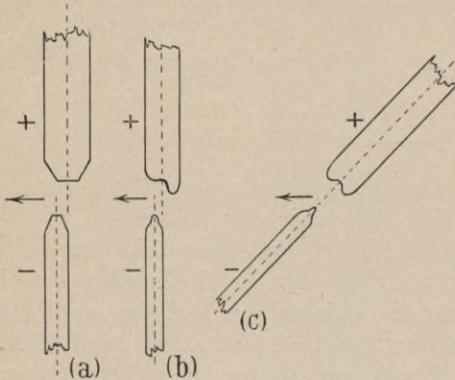
Da die Geschwindigkeit, mit der die Kohlenstäbe abbrennen, und die Form, die sie hierbei annehmen, für die positive und für die negative Elektrode verschieden sind, werden diese auch in voneinander verschiedenen Formen hergestellt. Die positive Kohle, welche doppelt so rasch verbraucht wird und an der Ansatzstelle des Flammenbogens sich kraterförmig aushöhlt, wird auch als Stäbchen doppelter Dicke hergestellt und besteht aus einem zentralen Teile, dem sogenannten »Docht«, aus lockerer Kohlenmasse, die der fortschreitenden Krateraushöhlung eine Führung gibt, und einem Mantel aus harter Kohle (»Dochtkohle«). Die negative Elektrode, welche sich beim Abbrennen zuspitzt, ist dünner und aus durchaus gleichartigem Material hergestellt (»Homogenkohle«).

Die Form der Kohlen in ungebrauchtem Zustande und nach einiger Benutzung zeigt nebenstehende Figur. (Vertikaler Schnitt.) Als Lichtquelle kommt nicht der Flammenbogen selbst, sondern die intensiv weißglühenden Spitzen der Elektroden, insbesondere die kraterförmige Vertiefung der positiven Kohle in Betracht. Um daher das Licht des Kraters auszunutzen, wird bei Lampen, die einfach allgemeinen Beleuchtungszwecken dienen, die positive Kohle oben, die negative unten angebracht.

Bei Projektionslampen, wo die Hauptmenge des Lichtes in horizontaler Richtung ausgestrahlt werden soll, stellt man dann beim Einsetzen der Kohlen absichtlich diese nicht exakt in axialer Verlängerung auf, sondern die positive Kohle etwas zurück, so daß die frisch eingesetzten und die teilweise abgebrannten Kohlen die in der Figur S. 164 angedeutete Stellung und Form haben. Eventuell werden auch die Kohlen in der Lampe um 45° geneigt aufgestellt, wobei dann die axiale Stellung beibehalten wird.



Beim Aufstellen einer Bogenlampe resp. beim Einsetzen frischer Kohlen ist daher die Stellung der beiden Kohlenstäbchen in der Lampe und die richtige Anschaltung des Stromes zu beachten (Gedächtnisregel: positiv, Docht, oben).



Zum Inbetriebsetzen der Lampe wird zunächst der in die Leitung eingeschaltete Schlüssel geschlossen, hierauf mittels des Triebes die Kohlen bis zur Berührung einander genähert und sofort wieder auseinandergezogen; die eingetretene Berührung ist erkennbar durch den Widerstand, den die Bewegung findet, ohne daß es nötig wäre, mit

dem Auge zu beobachten. Da beim Kontakt der Kohlen die elektromotorische Gegenkraft wegfällt, also die Stromstärke größer ist (z. B.

$$\frac{110}{7} = 16 \text{ A})$$

als bei normalem Betriebe, soll das Auseinanderziehen sofort nach dem Eintreten der Berührung erfolgen. Die größte Lichtintensität erhält man bei einer Bogenlänge (Distanz der Kohlenspitzen) von etwa 4 bis 8 mm. Da die Kohlen abbrennen, muß beim Handregulator von Zeit zu Zeit die Distanz auf ihren anfänglichen Wert zurückgebracht werden. Bei zu großer Distanz wird der Bogen erst lichtschwächer, dann flackernd, zuletzt erlischt er.

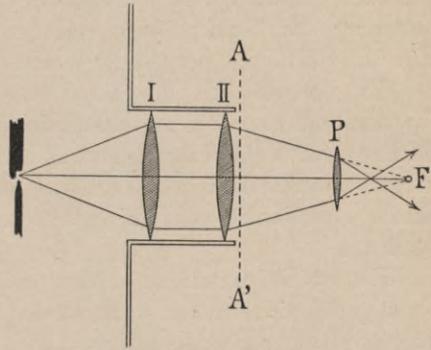
Bei längerdauernden Versuchen wird in den zur Aufstellung der Apparate erforderlichen Pausen, in denen das Brennen der Lampe nicht nötig ist, der Strom unterbrochen. Von Zeit zu Zeit kontrolliere man die Länge der Kohlenstäbe; sind diese kurz (etwa kleiner als 3 cm) geworden, so müssen — nach Abkühlung der Lampe! — frische Kohlen eingesetzt werden, damit nicht die Fassungen durch die Hitze Schaden leiden.

Bei Verwendung der Lampe zu optischen Versuchen wird vor die kreisförmige Öffnung des Lampenkastens der aus zwei Sammellinsen bestehende Kondensator gestellt. Die beiden Linsen sind entweder auf getrennten Stativen montiert oder verschiebbar in einer gemeinsamen röhrenförmigen Fassung, die an der Außenseite des Lampenkastens festgeschraubt werden kann.

Für manche Versuche verwendet man ein Bündel paralleler Lichtstrahlen. In diesem Falle wird nur eine Kondensatorlinse angewandt und unmittelbar an die Öffnung gerückt; die Lampe wird dann in ihrer Schlittenführung derart verschoben, daß der Bogen in den Brennpunkt der Linse zu stehen kommt. Praktisch wird diese Stellung daran erkannt, daß dann auf einem mehrere Meter entfernten Schirm ein Bild der Kohlenspitzen entsteht (genau genommen müßte dieses Bild auf einem unendlich entfernten Schirm scharf erscheinen; wenn aber die Schirmdistanz groß gegen

die Brennweite der Kondensorlinse ist, kann die schwache Konvergenz der Lichtstrahlen praktisch vernachlässigt werden).

Für andere Zwecke bedarf man eines zunächst konvergenten Lichtkegels. Die aus der ersten Linse parallel austretenden Strahlen werden durch die zweite Linse konvergent gemacht. Bisweilen ist es notwendig, in den Strahlengang gebrachte Objekte (z. B. Nikol'sche Prismen und dergl.) vor zu großer Erwärmung zu schützen. In diesem Falle wird zwischen die beiden Kondensorlinsen ein mit Wasser gefüllter Glastrog gestellt, der die ultraroten Strahlen absorbiert.



Um ein Objekt zu projizieren, stellt man es unmittelbar hinter die zweite Linse (Ebene $A A'$ der Zeichnung).

Die Projektionslinse — für Abbildungen mit geringen Ansprüchen auf Bildschärfe eine gewöhnliche Sammellinse von etwa 20 bis 25 cm Brennweite, für weitergehende Ansprüche eine achromatische Linse oder ein photographisches Objektiv — wird dann in solcher Entfernung von $A A'$ aufgestellt, daß das Bild auf dem Schirm maximale Schärfe erlangt, also in einer Entfernung, die etwas größer als die Brennweite der Linse ist.

Damit der Lichtkegel von der Projektionslinse vollkommen aufgefangen und ausgenutzt werde, muß die Brennweite der zweiten Kondensorlinse, die die Lage des Konvergenzpunktes bestimmt, dem verwendeten Projektionssystem angepaßt sein, d. h. ungefähr die gleiche Brennweite wie dieses besitzen.

Die Achse des Zylinders oder Doppelkegels, den die aus dem Kondensortretenden Strahlen bilden, soll im allgemeinen horizontal verlaufen, was stets dadurch zu erzielen ist, daß das Kohlenpaar als Ganzes mittels des S. 162 erwähnten Triebes in der Höhe entsprechend verstellt wird.

6. Stromleitungen.

Bei der Ausführung elektrischer Versuche ist auf die richtige und zweckmäßige Herstellung der Leitungen besondere Sorgfalt zu verwenden; es ist darauf zu achten, daß die fertiggestellte Versuchsanordnung übersichtlich bleibt, daß die stromführenden Leitungen an den Verbindungsstellen einen verlässlichen Kontakt besitzen, daß dagegen durch entsprechende Isolation der Stromübergang auf nicht beabsichtigten Wegen verhindert wird, insbesondere daß Kurzschlüsse, durch welche nicht bloß die Leitungen und eingeschaltete Apparate zerstört werden können, sondern auch der Experimentator Gefahr läuft, unbedingt ausgeschlossen bleiben.

Es ist ferner darauf Rücksicht zu nehmen, daß die verwendeten Apparate und Verbindungsleitungen der im Versuche auftretenden Stromstärke angepaßt sind, daß also durch entsprechende Vorschaltwiderstände (vergl. unten) von vornherein die Stromstärke in den zulässigen Grenzen gehalten werde, und daß in Fällen, wo der Versuchszweck die Anwendung von Starkströmen erfordert, die Leitung aus Drähten entsprechender Stärke hergestellt werde.

Es sind endlich die mechanischen Wirkungen der hergestellten Verbindungsleitungen zu berücksichtigen und daher die Verbindungen von Meßapparaten (Galvanometern, Elektrometern) oder anderen Apparaten geringer Standfestigkeit (elektrolytischen Zellen, Vakuumröhren und dergl.) durch elastische oder biegsame, nicht aber durch steife Drähte herzustellen.

Ebenso ist darauf zu achten, daß Apparate, an denen Ablesungen oder sonstige Manipulationen während des Versuches vorzunehmen sind, an leicht zugänglicher Stelle stehen.

In allen Fällen soll vor der wirklichen Ausführung der Versuchsanordnung eine schematische Schaltungsskizze gezeichnet werden, bei der die obenerwähnten Momente bereits berücksichtigt sind.

Bei komplizierteren verzweigten Leitungssystemen ist es im Interesse der Übersichtlichkeit oft zweckmäßig, die verschiedenen Zweige mit Drähten verschiedener Farbe herzustellen, z. B. bei der Wheatstone'schen Brückenordnung, beim Differentialgalvanometer und dergl.; in analoger Weise erleichtert in manchen Fällen die Anwendung des gleichen Prinzips die Ausführung von Versuchen, in denen die Stromrichtung von Bedeutung ist, also z. B. verschiedene Färbung der positiven und der negativen Zuleitung bei Versuchen über Elektrolyse, Kathodenstrahlen etc.

Bei elektrostatischen Versuchen und anderen, die mit Stromquellen hoher Spannung (Elektriermaschine, Induktor) ausgeführt werden, genügt der Kontakt bei einfacher Berührung der leitenden Teile (Einhängen von Draht haken in Ösen). Bei allen Versuchen über galvanische Elektrizität, besonders wenn quantitative Bestimmungen (Messung von Stromstärken, Spannungen und Widerständen) angeschlossen werden, ist die leitende Verbindung durch sorgfältiges Einklemmen der freien Enden in Klemmschrauben herzustellen. Bloßes Hineinstecken des Drahtendes in die Klemmschraube ohne Anziehen der Schraube läßt oft bedeutende, bei zufälligen Erschütterungen unregelmäßig sich ändernde Übergangswiderstände bestehen.

Unter allen Umständen soll in die Leitung ein Stromschlüssel (Ausschalter) eingeschaltet werden, und zwar am besten unmittelbar in die Ableitung von der Stromquelle, damit eventuell der Strom in der ganzen Leitung sofort unterbrochen werden kann, falls ein Schaltungsfehler vorliegen sollte.

Bei Anwendung des Straßenstromes (Gleichstrom oder Wechselstrom) ist besondere Vorsicht nötig; nicht nur eine leitende Verbindung zu geringen

Widerstandes der beiden Pole des Schaltbrettes untereinander, sondern auch die Verbindung bloß eines Poles mit einer Erdleitung (Gas- oder Wasserleitung) führt zu Kurzschlüssen. Man soll daher die gesamte Schaltung zuerst fertigstellen und zuletzt die freien Enden bei noch geöffnetem Stromschlüssel an die Polklemmen des Schaltbrettes anlegen.

Umgekehrt beginnt man bei der Demontierung der Versuchsanordnung damit, die Zuleitungen von der Stromquelle zu entfernen.

Die Verbindungen werden im allgemeinen aus mit einem Isoliermaterial (Seide oder wachsgetränktes Gewebe) überspannenen Drähten gebildet, damit eine zufällige Berührung zweier sich kreuzender Leitungen keinen Kontakt liefert. Es ist aber zu bemerken, daß diese isolierende Schicht nicht genügt bei elektrostatischen Versuchen und bei sehr hohen Spannungen (Elektrisiermaschine); in diesen Fällen müssen die Leitungen in der Luft gespannt, eventuell über Stützen aus gut isolierendem Material (Glas, Hartgummi) geführt werden. Als biegsame und geschmeidige Leitungen (Zuführung zu Meßapparaten, elektrolytischen Zellen, beweglichen Schleifkontakten etc.) verwendet man entweder statt der Drähte aus feinen Kupferdrähten zusammengeflochtene und mit einer isolierenden Umhüllung versehene Litzen oder dünnen Draht, der über einem runden Stabe zu einer Spirale aufgewickelt wurde.

Bei Stromintensitäten von mehr als 2 A sind die dünnen seidenüberspannenen Drähte nicht anzuwenden.

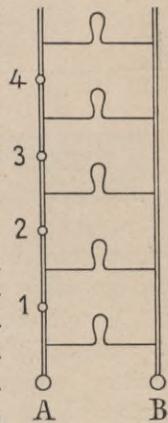
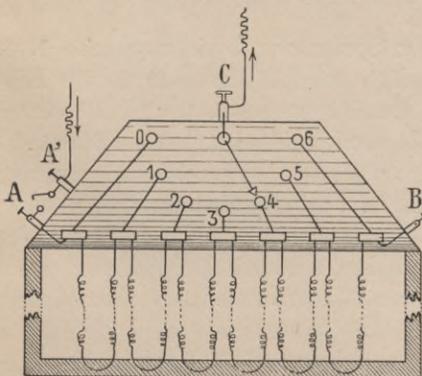
Vorschaltwiderstände. Glühlampenwiderstand. Auf einem Grundbrette sind zwei Messingschienen angebracht; die eine besteht aus mehreren durch Stöpsellöcher getrennten Abteilungen. A und B bilden die Endklemmen, I bis V stellen Glühlampen dar, 1 bis 4 die Stöpsellöcher.

Sind alle Stöpsel eingesteckt, so sind 5 Glühlampen parallel geschaltet; wird bzw. No. 1, 2, 3 oder 4 gezogen, so sind nur eine resp. zwei, drei und vier parallel geschaltete Lampen im Stromkreis.

Bei Versuchen mit Straßenstrom und Apparaten von zu vernachlässigendem Widerstande kann ein solcher Glühlampenwiderstand angewandt werden, um Ströme von

rund 1, 2, 3, 4, $5 \times \frac{1}{2}$ A, also bis zu 2·5 A, zu erzeugen.

Regulierwiderstand für starke Ströme. Für Versuche, die höhere Stromstärke erfordern, dient ein Regulierwiderstand aus dickem Neusilberdraht, der mit 15 A belastet werden kann.

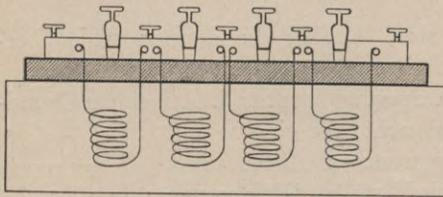


In einem vertikalstehenden Holzrahmen sind eine Reihe von Drahtspiralen (in der Figur durch einfache Schleifen angedeutet) zwischen je zwei Messingklötzchen eingespannt. Die freien Enden führen zu den Klemmen A und B, zwischen denen also der Gesamtwiderstand liegt. Von jedem Messingklötzchen führt eine Drahtverbindung zu einem Kontaktknopf; über diese Kontaktknöpfe, welche längs eines Kreisbogens angeordnet sind, schleift eine um den Punkt 0 drehbare Kurbel. Der Drehungspunkt ist mit der Klemme C leitend verbunden.

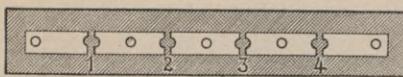
Zur Benutzung als stufenweise variablen Widerstand schaltet man die Zuleitungen bei A' und C ein; zwischen A und A' liegt ein Stromschlüssel. Je nachdem die Kurbel den Knopf No. 1, 2, 3 16 berührt, sind 1, 2, 3 16 Spulen (von zirka je 2 Ohm Widerstand), zwischen A und C eingeschaltet. Steht die Kurbel auf dem letzten Knopf (No. 17), so ist die leitende Verbindung von A und C unterbrochen.

Um bei der Ein- und Ausschaltung starker Ströme die Funkenbildung, welche im Laufe der Zeit die Kontakte beschädigt, zu vermeiden, soll die Verstellung der Kurbel bei geöffnetem Schlüssel AA' erfolgen.

Stöpselrheostat. Innerhalb eines Holzkästchens ist eine Reihe von Drahtspulen angeordnet, deren Enden zu je zwei isoliert voneinander auf einem Hartgummistreifen aufgesetzten Messingklötzchen führen. Ein konischer Metallstift (Stöpsel) stellt zwischen benachbarten Klötzchen eine praktisch widerstandslose Verbindung her; wird der Stöpsel herausgezogen, so ist ein Widerstand im Betrage des Spulenwiderstandes eingeschaltet, sein Wert wird durch die neben dem Stöpselloche stehende Ziffer in Ohm angegeben. Sind mehrere Stöpsel gezogen, so sind die Widerstände hintereinandergeschaltet, somit die bei den offenen Stöpsellöchern stehenden Zahlen zu addieren.



Aufriß



Grundriß

einandergeschaltet, somit die bei den offenen Stöpsellöchern stehenden Zahlen zu addieren.

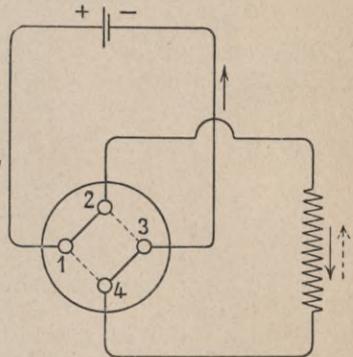
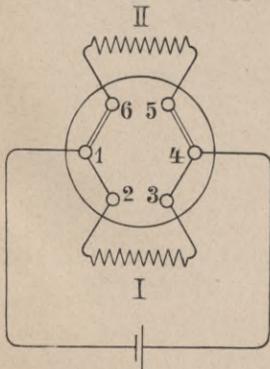
Gewöhnlich sind in einer Reihe vier Spulen von beziehungsweise 1, 2, 3 und 4 Einheiten hintereinandergeschaltet, so daß ihre Summe 10 Einheiten beträgt und alle ganzzahligen Beträge zwischen 0 und 10 durch entsprechende Kombinationen hergestellt werden können. Als Einheit ist 0·1 resp. 1, 10, 100, 1000 Ohm verwendet, eventuell sind mehrere Reihen mit $(1 + 2 + 3 + 4) \times 0·1$, 1, 10 miteinander verbunden. Die Endklemmen dienen zur Einschaltung der Stromzufuhr und -ableitung, die Klemmen an den mittleren Klötzchen finden eventuell Verwendung, wenn von einem bekannten stromdurchflossenen Widerstande eine Abzweigung vorgenommen werden soll.

Die Stöpsel sollen rein gehalten, besonders vor Amalgamierung ge-

schützt werden, sie sind daher nach dem Herausziehen in einen eigenen Behälter (Schachteldeckel oder dergleichen) zu legen. Die Stöpsel und die Löcher sind untereinander gleich, so daß eine beliebige Vertauschung der Stöpsel vorgenommen werden kann. Locker eingesetzte Stöpsel lassen oft einen nicht zu vernachlässigenden Übergangswiderstand an der Kontaktstelle bestehen, so daß der tatsächlich eingeschaltete Widerstand größer als der abgelesene ist; es sind daher vor jeder Messung die nicht gezogenen Stöpsel durch Drehung mit mäßigem Drucke fest einzusetzen. Vor dem Aufbewahren des Rheostaten nach Beendigung der Versuche stecke man die Stöpsel absichtlich in möglichst lockerer Stellung ein, damit Temperaturänderungen keine Verwerfung des Hartgummibrettchens und keine Verklebung der Stöpsel bewirken können.

Die zulässige maximale Beanspruchung von Stöpselrheostaten beträgt etwa 0.1 A.

Kommutator. Bei vielen Versuchen ist es notwendig, in einem bestimmten Teile der Leitung willkürlich die Stromrichtung umzukehren. Um dies rasch — ohne Umlegen der Verbindungsleitungen — ausführen zu können, verwendet man zweckmäßig einen Kommutator. In einem zylindrischen Klotze aus isolierendem Material befinden sich vier mit Quecksilber gefüllte Näpfe, die mit Klemmschrauben verbunden sind. Ein Deckel mit zwei Drahtbügeln stellt entweder gleichzeitig Verbindungen 1 mit 2 und 3 mit 4 her oder — um 90° verdreht eingesetzt — die Verbindungen 1 mit 4 und 2 mit 3. Die diametral gegenüberstehenden Klemmen 1 und 3 werden mit der Stromquelle verbunden; in diese Leitung kommen auch alle sonstigen Nebenapparate, in denen die Stromrichtung nicht umgekehrt werden soll. Zwischen 2 und 4 werden jene Apparate (Galvanometer, Zersetzungsapparate und dergl.) eingeschaltet, in welchen die Stromrichtung zu wechseln ist. Der Stellung I entspricht dann eine Stromrichtung $2 \rightarrow 4$, der Stellung II die entgegengesetzte $4 \rightarrow 2$. Herausheben des Deckels mit den Bügeln unterbricht den Strom vollständig, so daß der Kommutator zugleich einen Stromschlüssel ersetzt.



Stromwippe. Wenn es sich darum handelt, einen Strom rasch entweder in eine Leitung I oder in eine Leitung II einzuleiten, so wendet man eine sogenannte Wippe an. Analog wie früher sind in einer isolierenden Scheibe 6 Quecksilbernäpfe, mit Klemmschrauben verbunden; ein umlegbarer Bügel

stellt entweder die in der Figur einfach gezeichnete Verbindung 1 mit 2 und 4 mit 3 her oder, nach Umlegen, die (doppelt gezeichneten) Verbindungen von 1 mit 6 und von 4 mit 5. An die Klemmen 1 und 4 werden die Zuleitungen von der Stromquelle angelegt, zwischen die Klemmen 2 und 3 die Leitung I, zwischen 5 und 6 die Leitung II. Diejenigen Apparate, welche dauernd im Stromkreis bleiben sollen, z. B. Galvanometer, Vorschaltwiderstände etc., werden natürlich in die 1 und 4 verbindende Leitung eingeschaltet.

**BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW**

Inhaltsverzeichnis.

	Seite		Seite
Vorwort	3	35. Spektralanalyse	80
1. Atwood's Fallmaschine	5	36. Wiedervereinigung der Spektral-	
2. Das Kräfteparallelogramm	9	farben zu Weiß; Komplementär-	
3. Die Zentrifugalmaschine	10	farben	83
4. Die Demonstrationswage	14	37. Addition und Subtraktion von	
5. Apparat für Torsionsschwingungen	22	Farben	84
6. Das Toricelli'sche Ausflußgesetz .	25	38. Fluoreszenz und Phosphoreszenz	85
7. Vergleich der inneren Reibung ver-		39. Interferenzfarben dünner Platten	89
schiedener Flüssigkeiten	27	40. Gitterspektren	90
8. Oberflächenspannung	27	41. Doppelbrechung und Polarisation	92
9. Kapillarität	30	42. Photometrie	101
10. Ausströmung von Gasen durch		43. Magnetische Kraftfelder	103
enge Öffnungen	31	44. Bestimmung des magnetischen	
11. Diffusion der Gase durch poröse		Momentes eines Stabes	104
Scheidewände	34	45. Demonstrationselektrometer . . .	107
12. Die Luftpumpe	35	46. Oberflächenverteilung elektrischer	
13. Demonstration einer fortschreiten-		Ladungen	113
den transversalen Welle	38	47. Influenz	115
14. Mach'sche Wellenmaschine	39	48. Kondensator	117
15. Zusammensetzung aufeinander		49. Strommesser	118
senkrechter Schwingungen	43	50. Spannungsmesser	124
16. Kundt'sche Staubfiguren	46	51. Widerstandsbestimmung	127
17. Chladni'sche Klangfiguren	48	52. Thermoelektrizität	132
18. Lochsirenen	49	53. Elektrolyse	135
19. Resonanz	52	54. Elektromagnetismus	137
20. Schwebungen	54	55. Induktion	139
21. Wärmeausdehnung	55	56. Dynamomaschinen und Motoren	141
22. Ausdehnung des Kautschuks	58	57. Resonanz von Leydnerflaschen .	145
23. Thermoskope	58	58. Gasentladungen	147
24. Dichtemaximum des Wassers	61	59. Lichtelektrische Entladung (Hall-	
25. Unterkühlung von Thymol	61	wachseffekt).	152
26. Regelation des Eises	62	60. Radioaktivität	154
27. Kalorimetrische Versuche	63		
28. Versuche mit fester Kohlensäure	65	Anhang:	
29. Wärmeleitung	67	1. Reinigung von Quecksilber	158
30. Wärmestrahlung	68	2. Trocknen von Glasgefäßen	159
31. Optische Scheibe nach Hartl	70	3. Herstellung einer Seifenlösung	159
32. Optische Homogenität und Inhomo-		4. Einige einfache glastechnische	
genität	74	Operationen	160
33. Luftlinsen	76	5. Behandlung der Projektions-	
34. Objektive Darstellung der Disper-		lampe	162
sionserscheinungen	77	6. Stromleitungen	165

S - 96

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000297533