DER PHYSIK UND CHEMIE.

NEUE FOLGE. BAND XXXVI.

**I. Zur objectiven Darstellung der Schallintensität;
von A. Raps.****(Hierzu Taf. IV u. V.)**

Die erste Anregung zu vorliegender Arbeit ging von einem Aufsätze aus, welchen Hr. Prof. Kundt: „Ueber ein Maximum- und Minimummanometer für die Druckänderungen in tönenden Luftsäulen,“ veröffentlichte.¹⁾ Dort beschreibt Kundt ein Verfahren, durch welches ermöglicht wird, das Maximum (resp. Minimum) des in dem Knoten einer Orgelpfeife herrschenden Druckes sichtbar zu machen und der Messung zu unterwerfen. Dies wurde dadurch erreicht, dass zwischen Pfeife und Manometer ein sich einseitig öffnendes Membranventil eingesetzt wurde, welches nur die Verdichtungen (resp. Verdünnungen) der Pfeife auf das Manometer wirken lässt, während es bei der entgegengesetzten Druckphase einen Abschluss bildet.

Hierdurch war in der That die Möglichkeit gegeben, die Intensität von Luftschwingungen, welche durch tönende Körper erzeugt werden, objectiv darzustellen und zu messen. Zu genauen Messungen zeigten sich diese Ventile jedoch noch nicht geeignet. Denn, wie Kundt selbst angibt, lassen sich Ventile von so grosser Beweglichkeit nur sehr schwer luftdicht herstellen; ferner ist immer noch ein Ueberdruck von merklicher Grösse auf einer Seite nothwendig, um das Ventil zu öffnen.

Hierzu kommt noch, dass man keinen Anhalt dafür hat, ob die Membran auch dann wirklich luftdicht abschliesst, wenn in der Pfeife die dem Manometerdrucke entgegengesetzte Druckphase herrscht, und ob sie sich auch gerade in dem Augenblicke luftdicht anlegt, wenn der Druck im

1) Kundt, Pogg. Ann. **137**. p. 563. 1868.

Knoten seinen Maximalwerth (positiv oder negativ) durchlaufen hat. Würde das Abschiessen nicht in diesem Augenblicke erfolgen, so könnte wieder Luft zurückströmen.

Auch Dvořák¹⁾ hat viele Versuche mit diesen Schallventilen angestellt und gefunden, dass die Angaben verschiedener Manometer sehr ungleich ausfielen. Es lässt sich eben nicht bestimmen, wann ein derartiges Ventil vollkommen functionirt.

Bei den in dieser Untersuchung beschriebenen Versuchen hatte ich es mir zur Aufgabe gestellt, Schallventile herzustellen, bei welchen die oben erwähnten Fehler möglichst vermieden sind. Alsdann würden Instrumente gegeben sein, mit welchen die Schallintensität sich weit genauer bestimmen lässt.

Diese Versuche wurden im königlichen physikalischen Institut der Universität Berlin ausgeführt.

Es sei mir an dieser Stelle vergönnt, meinen Lehrern, Hrn. Geheimrath v. Helmholtz, sowie Hrn. Prof. Kundt, für die vielfache Unterstützung durch Rath und That meinen besten Dank auszusprechen.

§ 1. Gang der Untersuchung; Theorie der Schallventile.

Um die eben erwähnten Uebelstände der Schallventile abzustellen, wurden die Membranventile durch solide Metallventile ersetzt, welche sich viel besser dicht herstellen und auf ihre Dichtigkeit prüfen lassen. Diese können aber durch die Luftverdichtungen in der Pfeife nicht mehr bewegt werden. Deshalb mussten sie durch eine äussere periodische Kraft, den Dichtigkeitsvariationen der Pfeife entsprechend, in Bewegung gesetzt werden. Damit war aber auch die Trägheit der Ventile beseitigt und dieselben für die geringsten Druckschwankungen empfindlich gemacht.

Die Bewegung der Ventile wurde anfangs durch einen Electromagnet bewirkt, der von einem intermittirenden Strome durchflossen wurde. (Die genaue Beschreibung dieser Ventile folgt im nächsten Abschnitte.)

Dieser Strom konnte auf verschiedene Weise unterbrochen

1) Dvořák, Pogg. Ann. **150**. p. 410. 1873.

werden. Einmal durch die Pfeife selbst, deren Luftschwingungen auf eine gleichgestimmte Membran einwirkten. An dieser Membran war ein Platingäbelchen befestigt, welches, intermittirend in Quecksilber tauchend, eine Schliessung des Stromes und hiermit ein Oeffnen des Ventiles bewirkte, wenn der Luftstrom in der Nähe der Mundöffnung nach aussen gerichtet war. Bei dieser Anordnung war das Ventil zu einer bestimmten Phase offen, und das Manometer zeigte den Druck an, welcher während dieser Phase in der Pfeife herrschte. Eine andere Art der Stromunterbrechung bot jedoch dieser gegenüber viele Vortheile. Dies war eine Oeffnung bei wechselnder Phase. Der Strom wurde nämlich durch eine Helmholtz'sche Unterbrechungsgabel, welche mit der Pfeife sehr nahe zur Uebereinstimmung gebracht war, unterbrochen, und so eine Bewegung des Ventiles bewirkt. Dann zeigt das Manometer natürlich keinen constanten Druck mehr, vielmehr setzt es sich bei jeder Oeffnung mit dem zu dieser Zeit in dem Knoten vorhandenen Drucke ins Gleichgewicht und gibt so in langsamer Folge alle Druckphasen an, welche in der Pfeife schnell wechseln. Ist nämlich die Periode der Ventilöffnung etwas grösser als jene der Pfeifenschwingung, so ist bei jeder folgenden Oeffnung des Ventiles der Druck in der Pfeife schon über die Phase hinausgeeilt, welche bei der vorhergehenden Oeffnung herrschte, und das Manometer gibt den Druck dieser späteren Phase an. Das Manometer macht also eine verlangsamte Schwingung in der natürlichen Folge der Pfeifenschwingung durch. Ist umgekehrt die Periode des Ventiles kleiner als die der Pfeife, so bewegt sich das Manometer in umgekehrtem Sinne. Je grösser die Uebereinstimmung dieser beiden Perioden ist, um so langsamer findet die Manometerschwingung statt.

Angenommen, die Pfeife mache in einer Secunde p Schwingungen, das Ventil öffne sich q mal, so wird sich letzteres wieder zu der zuerst angezeigten Phase öffnen (d. h. das Manometer wird eine Schwingung vollendet haben), wenn das Ventil um eine ganze Schwingungsdauer der Pfeife vorausgeeilt (resp. zurückgeblieben) ist. Bezeichnen wir diese Zeit mit τ , so muss die Gleichung:

$$q\tau = p\tau \mp 1 \quad \text{oder} \quad \tau = \mp \frac{1}{q-p} = \frac{1}{\pm(p-q)}$$

erfüllt sein. Diese Zeit ist gleich derselben, in welcher die Pfeife eine Schwebung mit der Gabel macht.

Aus diesen Betrachtungen sieht man, dass zwischen dieser Beobachtungsart und dem sogenannten stroboskopischen Verfahren eine merkwürdige Analogie herrscht.

Wenn auf das Auge sehr rasch veränderliche Lichteindrücke wirken, so ist dasselbe nicht im Stande, diese klar zum Bewusstsein zu bringen. Da nämlich der Eindruck eines bestimmten Lichtbildes noch nicht verschwunden ist, wenn ein neuer zu wirken anfängt, so gehen die einzelnen Eindrücke in einander über und verwischen sich gegenseitig. Lässt man nun durch irgend eine Vorrichtung den Lichtreiz, den ein periodisch sich bewegendes Körper auf das Auge in einer bestimmten Phase ausübt, erst dann durch einen neuen ersetzen, wenn der alte beinahe erloschen ist, so werden wir den Eindruck einer continuirlichen Bewegung gewinnen. Andererseits darf die Zeit, welche von einer bis zur anderen Beleuchtung vergeht, nicht so gross sein, dass der erste Lichteindruck schon ganz verschwunden ist. Dann würde nämlich keine continuirliche, sondern eine sprungweise Bewegung wahrgenommen werden. Das stroboskopische Sehen erfüllt die angegebenen Bedingungen. Die Unfähigkeit des Auges, sehr schnelle Schwingungen klar zum Bewusstsein zu bringen, können wir gleichsam als eine Trägheit auffassen. Diese Trägheit wird durch das stroboskopische Verfahren in gewissem Sinne aufgehoben.

Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse bei einem Manometer, welches sehr schnelle Druckschwankungen der Luft anzeigen soll. Die Masse des Manometers besitzt eine so grosse Trägheit, dass sie dem Druckwechsel nicht folgen kann; denn ehe die Manometermasse angefangen hat, sich durch die Verdichtung zu bewegen, ist schon eine Verdünnung da, und so fort. In der That ändert ein Wassermanometer, in den Knoten einer Pfeife eingesetzt, seinen Stand durchaus nicht (wenn wir von einer etwaigen constanten Druckangabe absehen, welche direct durch den Anblasestrom

hervorgerufen wird). Langsamen Druckänderungen folgt jedoch ein Manometer willig.

Durch die Schallventile wird nun die Trägheit des Manometers dadurch aufgehoben, dass man demselben bei jeder Ventilöffnung nur einen so kleinen Ueberdruck (resp. Verdünnung) aus der Pfeife zuführt, dass derselbe sich bis zur nächsten Oeffnung mit dem Manometer ins Gleichgewicht setzen kann.

Die Analogie zwischen dem hier beschriebenen Verfahren und dem stroboskopischen Sehen besteht demnach darin, dass die Verbindung des schwingenden Körpers mit der Vorrichtung, welche die Schwingung darstellen soll (dies ist das Auge, resp. das Manometer), plötzlich abgeschnitten wird. Alsdann wird dem Auge Zeit gegeben, den Lichtreiz verlöschen zu lassen, dem Manometer, sich mit dem Drucke ins Gleichgewicht zu setzen, ehe ein neuer Licht-, resp. Druckimpuls zugeführt wird. (Auch für die Kundt'schen Schallventile findet sich eine Analogie bei dem stroboskopischen Verfahren. Dies ist nämlich die von Mach¹⁾ eingeführte stroboskopische Selbstregulirung, bei welcher dem tönenden Körper selbst das Geschäft der Beleuchtung in einer gewissen Phase übertragen wird.)

Die Druckunterschiede zwischen Pfeife und Manometer gleichen sich bei jeder Ventilöffnung dadurch aus, dass ein Theil der Luft überströmt. Die immerhin enge Ventilöffnung kann aber in der kurzen Zeit der Oeffnung nur eine sehr kleine Menge Luft durchströmen lassen. Sollen daher die Druckschwankungen im Manometer den Druckänderungen der Pfeife wirklich entsprechen, so muss offenbar der Druckunterschied in der Pfeife zwischen zwei aufeinanderfolgenden Oeffnungen so klein sein, dass folgende zwei Bedingungen erfüllt werden.

Erstens muss die ganze überschüssige Menge Luft durchströmen können, zweitens muss sich dieser abgeschlossene Ueberdruck (resp. Verdünnung) mit dem Manometer ins Gleichgewicht setzen können. Angenommen, die erstere der beiden Bedingungen wäre nicht erfüllt, so wird blos ein Theil

1) Mach, *Optisch-akustische Versuche*. Prag 1873.

der Luft überströmen können. Der im Manometer angegebene Druck wird also kleiner sein, als der wirklich vorhandene. Dies wird namentlich für das Maximum und Minimum des Druckes gelten.

Ist die zweite Bedingung nicht erfüllt, so wird schon ein neuer Druck in das Manometer eintreten, ehe der frühere sich ins Gleichgewicht gesetzt hat. Das Maximum wird in der Pfeife schon eintreten, ehe das Manometer den entsprechenden Werth erreicht hat. Dann wird sich das Ventil wieder bei Phasen geringeren Druckes öffnen, der Ueberdruck wird zurückströmen und so das Manometer den Druck immer zu klein angeben.

Experimentell hat man die Macht, die Druckänderung zwischen zwei aufeinander folgenden Ventilöffnungen beliebig klein zu machen. Bedeutet A nämlich den Unterschied zwischen dem Druckmaximum und -minimum im Knoten, und nehmen wir der Einfachheit halber an, dieser Druckwechsel gehe mit einer gleichförmigen, mittleren Geschwindigkeit vor sich, so ändert sich der Druck d zwischen einer Ventilöffnung bis zur nächsten im Mittel um:

$$d = \frac{2A(p - q)}{q},$$

wobei die Buchstaben die frühere Bedeutung haben. Betrachten wir q als fest gegeben, p als veränderlich, so hindert nichts, die Differenz $p - q$ beliebig klein zu machen, indem man die Pfeife mit der Unterbrechungsgabel in immer grössere Uebereinstimmung bringt. Stellt sich nun heraus, dass das Manometer bei einer gewissen Schwingungszeit Maximalwerthe angibt, welche bei einer grösseren Schwingungszeit (genaueres Abstimmen) durch grössere ersetzt werden, so ist dies ein Zeichen, dass d noch nicht klein genug war. Als dann muss p dem q noch so lange genähert werden, bis keine Aenderung in den Maximalangaben des Manometers mehr eintritt.

Dieses Gleichbleiben der Maximalwerthe der Manometerschwingung bei grösser gemachter Uebereinstimmung ist demnach das Kriterium für das richtige Arbeiten der Ventile (wenn man dieselben technisch als vollkommen betrachten würde).

In diesem Punkte unterscheidet sich das hier beschrie-

bene Verfahren allerdings von dem stroboskopischen, da auch bei den raschesten stroboskopischen Schwingungen die Maximalwerthe sich nicht ändern, wenn auch die ganze Schwingung verwaschen ist. Der Unterschied liegt darin, dass beim Auge der Eindruck langsam aufhört, während beim Manometer der Anfang der Erregung träge vor sich geht.

Es fragt sich nun, ob die gestellten Bedingungen für das richtige Arbeiten der Ventile in der Wirklichkeit mit gehöriger Schärfe erfüllt werden können. Dies ist bei einfachen (oder nahe einfachen) Pendelschwingungen der Luft, welche bei schwachem Anblasen der Pfeife auftreten, sicherlich der Fall. Aber auch bei starkem Anblasedruck konnte in den meisten Fällen eine genügende Abstimmung erzielt werden, wie dies aus § 3 hervorgehen wird.

Um bei dem stroboskopischen sowohl wie bei diesem Verfahren ein wahres Bild des Schwingungsvorganges zu erhalten, ist es unerlässliche Bedingung, dass sich die Periode der Pfeife während der Darstellung einer Schwingung nicht ändert. Wenn es auch für die Art der stroboskopischen Schwingung gleichgültig ist, ob diese (innerhalb gewisser Grenzen) schneller oder langsamer vor sich geht, so darf sich doch, um wahre Angaben zu erhalten, die Periode der Pfeife, während der Dauer einer stroboskopischen Schwingung, absolut nicht ändern. Geht eine derartige Schwingung in einer Zeit von drei (bis 32) Secunden vor sich, wie dies bei dieser Untersuchung der Fall war, so darf sich während dieser Zeit die Tonhöhe der Pfeife, also auch der Anblasedruck, gar nicht ändern. Konnte auch der Anblasedruck sehr constant gemacht werden, so sind doch kleine, in unregelmässigen kurzen Zeiten folgende Druckstösse nicht zu umgehen. Da nun die tönende Luftsäule der Pfeife eine sehr geringe elastische Kraft besitzt, so folgen die Tonhöhen den Druckschwankungen fast augenblicklich, und es wird daher sowohl von dem stroboskopischen als dem hier beschriebenen Verfahren kein absolut richtiges Bild der Pfeifenschwingung zu erwarten sein. Mit diesen Schwierigkeiten hat die stroboskopische Untersuchung der Schwingungen von Körpern mit grosser elastischer Kraft in weit geringerem Maasse zu kämpfen, da deren Tonhöhe nicht solch unregel-

mässigen Schwankungen untenworfen ist. Diese Betrachtungen sollen an einer graphischen Darstellung veranschaulicht werden. (Siehe Tafel.)

Es soll in Taf. IV Fig. 1 AA' die Schwingung der Pfeife darstellen (welche der Einfachheit halber als gebrochene Curve dargestellt ist), BB' die des Ventiles. Die Zeiten sind als Abscissen, die Druckunterschiede der Pfeifen als Ordinaten abgetragen. Jedesmal, wenn die Schwingungscurve des Ventiles die Abscissenaxe BB' erreicht, soll eine Oeffnung stattfinden. Dann wird die Manometerschwingung durch die Curve 1, 2, 3 . . . 10 dargestellt werden. Diese wird ein getreues Bild einer Einzelschwingung geben, weil während ihres Entstehens die Periode der Pfeife, wie hier gezeichnet, sich absolut nicht geändert hat. Sobald sich aber die Tonhöhe während einer Manometerschwingung ändert, bekommen wir ein Schwingungsbild, wie solches Fig. 2 darbietet. Die Perioden der Pfeife sollen innerhalb der Intervalle CD , DE , EF unter einander gleich, von Intervall zu Intervall aber verschieden sein. Sobald die Tonhöhe sich ändert, sehen wir die Curve 1, 2, 3 . . . steiler, bezw. gestreckter werden. Natürlich ist diese Entstellung der Schwingungsfigur übertrieben gezeichnet, da sich die Tonhöhe lange nicht in dem Maasse und so plötzlich ändert. Die Zeichnung soll nur andeuten, dass eine Druckschwankung des Anblasestromes, welche die Periode der Pfeife mit derjenigen der Gabel zu grösserer Uebereinstimmung bringt, die Manometercurve gestreckter macht, während dieselbe im umgekehrten Falle steiler wird. Bedenkt man die lange Dauer einer Manometerschwingung und den Umstand, dass schon eine Aenderung des Anblasedruckes um 1 mm (unter gewissen Bedingungen) diese Schwingungsdauer von sieben Secunden auf zwölf Secunden brachte, so sieht man leicht ein, dass die kleinen unregelmässigen Schwankungen des Anblasestromes (sie lagen bei schwachen Tönen unter $\frac{1}{3}$ mm Wasser) die Schwingungsfigur schon merklich entstellen können.¹⁾ Am deutlichsten lassen sich derartige durch

1) Wie empfindlich die Methode für jede noch so kleine Schwankung in der Tonhöhe der Pfeife ist, mögen hier einige Beispiele zeigen. Wurde die Thüre des Beobachtungslcales geöffnet und geschlossen, so zeigte

den Anblasestrom hervorgerufenen Schwankungen erkennen, wenn man die Uebereinstimmung zwischen Pfeife und Gabel möglichst weit treibt. Man sieht alsdann das Manometer mit unregelmässigen Schwankungen seine Schwingung durchmachen. Eine derartige sehr langsame Schwingung würde, wie sehr sie auch dem wirklichen Vorgange entspricht, doch nur ein sehr unvollkommenes Bild einer Einzelschwingung der Pfeife geben. (Zum Messen der Maximalwerthe wäre sie allerdings am geeignetsten.) Deshalb ist es vortheilhaft¹⁾, die Schwingungen bloß so langsam zu machen, als es die Eigenthümlichkeit der Schallventile eben erheischt.

Ausser der Uebereinstimmung zwischen Pfeifen- und Gabelperiode ist auch die Oeffnungsdauer des Ventiles von grosser Wichtigkeit. Denn je kleiner dieselbe ist im Vergleich zu einer Schwingung der Pfeife, um so mehr Zeit hat die vom Ventil abgeschlossene Luft, sich mit dem Manometer ins Gleichgewicht zu setzen.

Bei dem eingangs erwähnten electromagnetischen Ventile ist die Oeffnungsdauer sehr schwer zu bestimmen und auf die nöthige Kürze herabzudrücken. Dasselbe wurde daher durch ein anderes ersetzt, welches (ohne Vermittelung des electrischen Stromes) direct von einer Unterbrechungsgabel bewegt wird.

Im wesentlichen besteht dasselbe aus zwei luftdicht aneinander vorbeigleitenden Schiebern, von welchen der eine fest ist, der andere durch die Gabel bewegt wird. (Die genaue Beschreibung soll im nächsten Abschnitte folgen.) Jeder dieser Schieber ist mit einem horizontalen Spalte versehen, bei deren Uebereinanderfallen eine Verbindung zwischen dem Knoten der Pfeife und dem Manometer hergestellt ist. Diese Deckung der Spalten kann man an zwei

das Manometer sofort eine unregelmässige Bewegung. In der Nähe der Pfeife war ein König'scher Phonautograph aufgestellt; wurde das Uhrwerk desselben in Bewegung gesetzt, so genügte der durch die Windflügel erzeugte Luftzug, um eine ziemliche Aenderung der Manometerperiode hervorzubringen. Man brauchte sich bloß in die Nähe der Mundöffnung der Pfeife zu stellen, und es wurde im Manometer eine Veränderung des Pfeifentones bemerkt.

1) Wenigstens um das Bild des Schwingungsvorganges zu erhalten.

verschiedenen Stellen bewirken. Einmal kann man die Spalte sich decken lassen, wenn die Gabel das Maximum der Entfernung von ihrer Gleichgewichtslage erreicht hat; dann muss die Pfeife nahe den Ton der Gabel haben. Ferner können die Spalte beim Durchgang der Gabel durch ihre Gleichgewichtslage zur Deckung gebracht werden. Da dieses aber bei jeder Gabelschwingung zweimal geschieht, so muss die Pfeife eine Octave höher sein, als die Gabel. Die letzte Anordnung wurde am meisten angewandt.

Jetzt ist das Mittel gegeben, die Oeffnungsdauer zu bestimmen und zu reguliren. Nennt man nämlich die Spaltbreite s , die Amplitude der Gabel A , die Dauer einer Gabelhalbschwingung τ , so wird nach der Formel:

$$y = A \sin \frac{2\pi t}{2\tau}$$

die Oeffnungsdauer t des Ventiles gegeben sein durch die Gleichung:

$$t = \frac{2\tau}{\pi} \arcsin \left(\frac{s}{A} \right)$$

oder bei kleinen Winkeln:

$$t = \frac{2\tau}{\pi} \frac{s}{A}.$$

Hierbei ist s und A variabel. Die Spaltbreite darf, der Luftreibung wegen, nicht zu klein genommen werden; als passendste wurde eine Breite von $\frac{3}{4}$ mm gefunden. Da man aber die Gabel Excursionen von 8 bis 10 mm machen lassen kann, so lässt sich die Oeffnungsdauer auf ein Achtel bis ein Zehntel einer Pfeifenperiode bringen.

(Bei der zuerst angeführten Art der Spaltdeckung beträgt die Oeffnungsdauer:

$$t_1 = T \left(\frac{1}{2} - \frac{\arcsin \left(\frac{a-s}{a} \right)}{\pi} \right),$$

wobei T die Dauer einer ganzen Gabelschwingung bedeutet.)

Zeichnet man die Manometerschwingungen graphisch auf, so erhält man sowohl eine Darstellung der Schwingungsform wie auch der Intensität der Druckschwankungen in der Pfeife. Diese kann wohl mit Recht als eine objective bezeichnet werden.

§ 2. Beschreibung der Apparate.

Da es bei der Ausführung des eben beschriebenen Verfahrens wesentlich auf das richtige Functioniren der angewandten Apparate ankommt, so dürfte eine etwas ausführlichere Beschreibung derselben angebracht sein.

I. Das electromagnetische Ventil.

(Fig. 3 und 3a.)

In Fig. 3 ist das electromagnetische Ventil in natürlicher Grösse abgebildet, und zwar durchschnitten. Dasselbe besteht wesentlich aus drei Theilen, dem Electromagnet *A*, dem Gehäuse *B* und dem Ventilkörper *C*¹⁾ mit der Vorrichtung, um den Anker des Ventiles den Polen des Electromagnets zu nähern oder zu entfernen und so die Amplitude des Ventiles zu ändern. Soll dies geschehen, so wird der Apparat mit einem kurzen Rohrstutzen *d*, welcher in das Gehäuse einmündet, an die Pfeife angeschraubt. (Die Zeichnung stellt dieses Rohr *d* punktirt dar, weil dasselbe in Wirklichkeit senkrecht zur Ebene des Papiers steht; ebenso die Schraube *f*.) Ist die richtige Amplitude hergestellt, so kann der Ventilkörper mit der Schraube *f* festgestellt werden, und alle die in der Figur durch $\times$ bezeichneten Theile können entfernt werden. Dann wird das Gehäuse ohne Vermittelung des Rohrstutzens *d* direct mit dem Gewinde *g'* (welches gleich der Schraube *g* des Stutzens ist) in die Pfeife geschraubt. Hierdurch wird der überflüssige Luftraum vermieden und das Ventil fast in die Knotenfläche gebracht. Ueberhaupt geht die ganze Construction darauf hinaus, eingeschaltete Lufträume möglichst zu vermeiden.

Der Electromagnet *A*, dessen Schenkel aus dünnen Eisendrähnen gebildet sind, wird mit seinen beiden Polen²⁾ *a'* und *a''* luftdicht durch die obere Decke des Gehäuses *B* geführt. In die beiden Polenenden sind kleine Messingstückchen eingeschraubt, welche eine directe Berührung des Ventilankers mit dem Electromagnet ver-

1) *C* ist in der Nebenfigur 3a im Aufriss dargestellt, das Ventil um 90° gedreht.

2) Der Durchschnitt eines Polendes ist halbkreisförmig.

hindern. In die obere Wand des Gehäuses ist ausserdem noch ein rechtwinklig gebogenes Rohr *e* eingeschraubt, welches die Luft zum Manometer führt. Die obere und untere Metallwand des Gehäuses sind durch einen Glas-hohlcyylinder *h* verbunden, welcher das Spiel des Ventiles zu beobachten gestattet.

In der unteren cylindrischen Bohrung des Gehäuses kann der Ventilkörper *C* mittelst der Schraube *H* und einer entgegenwirkenden Spiralfeder *F* auf und ab bewegt werden. Der luftdichte Verschluss wird durch einen gefetteten Hanfring *i* (siehe Nebenfigur 3_a) bewirkt. In den Ventilkörper *C* ist von unten noch eine kleine Büchse *T* eingeschraubt, welche die Spindel der Schraube *H* trägt. Damit durch den Zwischenraum keine Luft entweichen kann, ist über den unteren Theil des Gehäuses und den dieser Büchse ein Stück Gummischlauch gezogen, welches zwar einen luftdichten Abschluss bildet, die Bewegung des Ventilkörpers jedoch nicht hindert.

In zwei axialen Durchbohrungen des Ventilkörpers bewegt sich mit grosser Leichtigkeit, jedoch fast ohne Spielraum, das Kegelventil mittelst einer stählernen Axe. Dasselbe ist aus Rothguss gefertigt und sorgfältig eingeschliffen. An demselben ist ein kleiner Anker befestigt, welcher, damit er seinen Magnetismus rasch verliere, nach Art der Anker der Morsetelegraphen aus einem der Länge nach aufgeschlitzten Eisenrohre besteht. Dieser Anker wird bei Stromschluss von dem Electromagnete angezogen, und das Ventil so geöffnet. Nachdem der Strom wieder geöffnet ist, zieht eine stählerne Spiralfeder *S*, deren Spannung durch die Schraube *s* regulirt werden kann, das Ventil zu. Damit das Ventil sich nicht um seine Axe drehen, und so seine Oeffnungszeit variiren kann, muss sich dasselbe zwischen zwei Stiften *II'* bewegen, welche von dem Magnet herabreichen. (Fig. 3_a).

Der intermittirende Strom, welcher das Ventil in Bewegung setzt, wird, wie schon erwähnt, von einer Helmholtz'schen Unterbrechungsgabel geliefert. Jedoch kann man den Electromagnet des Ventiles nicht in den Hauptstrom einschalten, welcher die Gabel treibt. Denn da die Oeffnungsdauer des Ventiles von der Zeit abhängt, während

welcher der Platinstift des Unterbrechers in das Quecksilber eintaucht, so muss die Zeit dieses Contactes so gewählt werden können, wie sie einer richtigen Oeffnungsdauer des Ventiles zukommt. Diese Zeit fällt aber nicht zusammen mit der günstigsten für die Bewegung der Gabel. Es ist deshalb ausser dem Contact der Helmholtz'schen Gabel noch ein zweiter angebracht, welcher, von dem ersten isolirt, den Ventilstrom unterbricht.¹⁾

Diese Ventile entsprechen noch keineswegs den Anforderungen, welche an dieselben gestellt werden müssen. Denn einerseits kann das Ventil nur durch einen solchen Strom in Vibration gesetzt werden, dessen Dauer nicht klein genug ist im Verhältniss zu einer Schwingung der Pfeife; andererseits ist es sehr schwer, die Oeffnungsdauer des Ventils zu bestimmen und festzustellen, ob dasselbe während eines Theiles der Gabelperiode auch wirklich abschliesst.

Die Intensitätsbestimmungen wurden daher mittelst eines anderen ausgeführt, welches ihm gegenüber grosse Vortheile besitzt. Das electromagnetische Ventil ist auch nur deshalb erwähnt, weil es gute Dienste bei der Untersuchung von Phasendifferenzen in tönenden Luftsäulen leistet. Diese Untersuchungen sollen im letzten Abschnitte beschrieben werden.

II. Stimmgabelventile.

(Fig. 4a, 4b, 4c theilweise durchschnitten.)

Bei den Stimmgabelventilen wird die Oeffnung ohne Vermittlung des electrischen Stromes direct durch eine Unterbrechungsgabel bewirkt.

An der oberen Zinke einer Stimmgabel, (Fig. 4c) ist ein ebener Schieber *s* angebracht, in welchem ein horizontaler Spalt von $\frac{3}{4}$ mm Breite und 4 mm Länge eingefraist ist. Dieser Spalt ist mit einem seitlich einmündenden Rohre in Verbindung, welches der Gabelzinke entlang bis zu dem Punkt läuft, wo die Bewegung der Gabel aufhört; dort ist es rechtwinklig umgebogen und führt zum Manometer. Nahe

1) Die verschiedenen Wege, auf welchen die Luft je nach der Verbindung der Pfeife mit dem Ventil zu dem Ventilkegel gelangen kann, sind durch ausgezogene, bezw. punktirte Pfeile, in der Figur bezeichnet.

am Schieber ist das Rohr durchschnitten und durch elastischen Schlauch wieder verbunden. Auf diese Weise ist eine luftdichte Verbindung des Spaltes mit dem Manometer, auch während des Tönens der Gabel, hergestellt. Die Ebene dieses Schiebers, welchen wir den beweglichen nennen wollen, muss genau parallel zu der Schwingungsebene der Gabel sein, da derselbe luftdicht an einem anderen, mit dem Knoten der Pfeife in Verbindung stehenden Schieber vorbeigleiten soll. Deshalb ist derselbe zwischen zwei Spitzenschrauben $\alpha\alpha'$ in der Klaue K drehbar befestigt; praktisch genügt es, diese Ventilfläche der Seitenebene der beiden Gabelzinken genau parallel zu stellen; alsdann wird der Schieber mittelst der Klemmschrauben $\beta\beta'$ festgeklemmt.

Würde man nun die bewegliche Ventilfläche unmittelbar auf der festen schleifen lassen, so würde einerseits eine luftdichte Verbindung schwer herzustellen sein, andererseits eine allzu grosse Reibung die Gabel am Tönen verhindern. Deshalb wird zwischen die beiden Ventilflächen eine capillare Flüssigkeitsschicht gebracht, welche abdichtet und die Reibung bedeutend vermindert. Für diesen Zweck hat sich Petroleum am geeignetsten gezeigt. Fette Oele sind unbrauchbar.

Das Material, aus welchem die Schieber angefertigt sind, ist ebenfalls von grossem Einflusse auf das gute Arbeiten derselben. Bloss glasharte Stahlplatten, welche sorgfältigst eben geschliffen und polirt sind, zeigen eine Reibung, welche klein genug ist. Bei der gewöhnlichen Methode des Härtens bleibt der Stahl meist zu weich für unseren Zweck. Durch Ablöschen der über Rothgluth erhitzten Stahltheile in verdünnter Schwefelsäure wird jedoch bei den meisten Stahlsorten eine genügende Härte erzielt. Damit diese Theile sich glashart herstellen lassen, darf an denselben nichts gelöthet sein; dieselben sind daher entweder aus einem Stück zu fertigen, oder sie müssen durch luftdichte Verschraubungen miteinander verbunden werden, was ihre Herstellung allerdings sehr erschwert.

Man könnte glauben, dass durch die zwischengebrachte Flüssigkeitsschicht die immerhin engen Spalten verstopft

werden könnten. Da jedoch richtig gearbeitete Ventilflächen, nachdem man sie voneinander gezogen hat, schöne Interferenzfarben zeigen, ist die Flüssigkeitsschicht offenbar von derselben Grössenordnung, wie die Wellenlänge des Lichtes. Deshalb kann ein capillares Flüssigkeitshäutchen, welches sich über die Spalten ziehen sollte, doch nur so dünn sein, dass es von dem kleinsten Ueberdruck auf einer Seite durchbrochen wird. Ein Eindringen von Flüssigkeitstropfen in die Spalte wurde niemals bemerkt. Man kann sich übrigens leicht davon überzeugen, ob die Oeffnungen von Flüssigkeit frei sind, indem man, während die Gabel arbeitet, auf einer Seite einen kleinen Ueberdruck erzeugt; ein rasches Sinken des Manometers zeigt das Freisein der Oeffnung an.

Der feste Schieber muss sich begreiflicher Weise sehr genau an den beweglichen anlegen. Zu diesem Zwecke muss derselbe um eine horizontale und eine verticale Axe drehbar sein (Cardanische Suspension). Die horizontale Axe ist durch die beiden harten Spitzenschrauben mm' (Fig. 4a, b) gebildet, welche eine sehr sichere und leicht regulirbare Lagerung bieten. Die verticale Axe ist ein kleiner Stahlcylinder (in der Figur punktirt dargestellt), welcher durch eine Schraube n festgeklammt werden kann. Der Ventilträger T ist nun seinerseits in den Spitzenschrauben hh' drehbar, so dass die Fläche des festen Schiebers gegen die des beweglichen mittelst der Spiralfeder F sanft angedrückt werden kann. Die Spannung dieser Spiralfeder kann mittelst der Schraube I sehr fein regulirt werden. Bei guten Spaltflächen ist die Adhäsion der Flüssigkeitsschicht so stark, dass es eines besonderen Andrückens nicht mehr bedarf. Dann dient diese Feder blos zum Reguliren der Gabelamplitude.

Damit der feste Schieber parallel zu der Fläche des beweglichen verschoben werden kann (die Stelle, wo die Spalten coincidiren, wird auf diese Weise bestimmt), ist das ganze beschriebene System auf einem Mikrometerschlitten f befestigt, welcher in UU' seine Führungen hat und mittelst der Mikrometerschraube V in Verein mit der entgegenwirkenden Feder W messbar verschoben werden kann. Die Ebene, in welcher diese Verschiebung geschieht, muss natürlich auch parallel der Schwingungsebene der Gabel sein.

Deshalb ist auch hierfür eine Justirvorrichtung am Fusse des Trägers *Z* angebracht.

Schwierigkeiten verursachte die Verbindung des festen Schiebers mit der Pfeife. Eine feste Verbindung (selbst durch Gummischlauch) würde bei der geringsten Bewegung der Pfeife gegen die Gabel ein Abreissen der Ventilflächen hervorrufen. Deshalb ist die Verbindung folgendermassen eingerichtet: Das rechtwinklig gebogene Rohr *L*, welches mit dem Spalte des festen Schiebers communicirt, ragt in ein Glasgeräss *P*; durch dessen Boden geht das Rohr *o* hindurch, welches vom Knoten der Pfeife kommt. Wird nun in das Glasgefäss *P* eine Quecksilberschicht gegossen, welche über den unteren Rand von *L* ragt, so ist eine luftdichte Verbindung hergestellt, welche dennoch Bewegung des festen Schiebers zulässt, ohne die Ventilflächen zum Abreissen zu bringen.

Eine derartige, zwischen Ventil und Pfeife eingeschaltete Flüssigkeitsschicht ändert beim Tönen der Pfeife der Trägheit halber ihren Stand nicht.

Der wesentliche Vorzug dieses Ventiles vor dem electromagnetischen besteht darin (abgesehen von der kürzeren, regulirbaren Oeffnungsdauer), dass man dasselbe, auch während des Arbeitens, auf sein Dichthalten hin prüfen kann. Man braucht blos den Hahn *H* abzuschliessen und Luft in dem Manometer zu comprimiren.¹⁾ Dann würde dasselbe, falls die beiden Flächen nicht luftdicht aneinander vorbeigleiten, rasch sinken; ändert es seinen Stand jedoch nicht, so hält das Ventil dicht. Bei der Prüfung stellte es sich heraus, dass die Ventile auch schon bei minder sorgfältig gearbeiteten Flächen für alle in Frage kommende Drucke vollständig luftdicht abschliessen. Hiernach ist man zu dem Schlusse berechtigt, dass das Ventil, da man sich ja ziemlich vollkommen ebene Flächen verschaffen kann, einen vollständigen Abschluss zwischen dem Knoten der Pfeife und dem Manometer bildet, wenn die Spalten sich nicht decken.

1) Damit beim Comprimiren nicht etwa durch das Heben des Rohres *L* ein Abreissen der Ventilflächen entstände, ist ein kleines Stahlstäbchen *d* angebracht, welches sich gegen die Schraube *e* anlegt, wenn *L* in die Höhe gedrückt werden sollte.

Um die Verbindung nach dem Probiren des Ventils wieder herzustellen, braucht man blos den Hahn *H* zu öffnen, ohne sonst irgend etwas zu ändern.

Da, wie schon erwähnt, die Oeffnungsdauer des Ventils von der Amplitude der Gabel abhängt, so wurde natürlicher Weise eine möglichst grosse Amplitude angestrebt. (Die Form der Gabel, welche sich am besten zu dem Versuche eignete, geht aus Fig. 4_c hervor; die Gabel muss eine ziemlich grosse Masse besitzen.) Deshalb musste der Strom, welcher die Gabel treibt, möglichst ausgenutzt werden. Versuche zeigten, dass die Gabel dann die grössten Amplituden macht, wenn der Stift des Unterbrechers ziemlich tief in das mit Alkohol überdeckte Quecksilber tauchte. Weder durch die Erregung der Gabel durch eine gleichgestimmte (sodass beide einen Phasenunterschied von $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer zeigen), noch das von Töpler¹⁾ angewandte Verfahren, an dem Unterbrechungsstifte einen Quecksilberfaden adhäriren zu lassen und die Dauer der Bewegung fördernden Stromschlusses so zu verlängern, gaben gleich gute Resultate. Dies hängt offenbar mit den auftretenden Inductionsströmen zusammen.

Mittelst eines Stromes von fünf Bunsenelementen und eines zu diesem Zwecke eigens gebauten, sehr kräftigen Electromagneten wurde trotz der Reibung der Ventildflächen doch eine Amplitude von 4 bis 5 mm erreicht. Solche Amplituden lassen sich allerdings auch nur bei vollkommen gearbeiteten Ventildflächen und sorgsamer Ausbalancirung der Gabelzinken erreichen.

So gut wie diese Ventile auch functioniren, so stellte sich bei ihrem Gebrauche doch ein Uebelstand heraus, welcher namentlich bei starken Tönen hervortrat. Es zeigte sich nämlich, dass eine Veränderung der Länge des Rohres, welches sich zwischen Ventil und Knoten befindet, von Einfluss auf die Angaben des Manometers ist, und zwar erfolgte ein Maximum der Angaben, wenn die Länge jenes Verbindungsrohres der halben Wellenlänge des dritten Partialtones der (gedackten) Pfeife ungefähr gleichkam. Dieser Umstand

1) Töpler u. Boltzmann, Pogg. Ann. 141. p. 335. 1870.

Ann. d. Phys. u. Chem. N. F. XXXVI.

muss wohl der Resonanz des Zwischenstückes zugeschrieben werden.

Um daher Werthe zu erhalten, welche dem wirklichen Drucke im Knoten der Pfeife entsprechen, musste dieser schädliche Raum vermieden und das Ventil der Knotenfläche ganz nahe gebracht werden. Dies ist durch die Anordnung erreicht, welche Fig. 5 zeigt. (Dieselbe stellt einen Schnitt durch die Pfeife nahe der Knotenfläche dar.) Die beiden aufeinander gleitenden Ventilflächen sind in der Nebenfigur besonders gezeichnet, und zwar ist in Fig. 5_a die Fläche des festen, in Fig. 5_b die des beweglichen Schiebers dargestellt. Der letztere ist zwischen zwei Spitzenschrauben¹⁾ $\alpha\alpha$ in einer Klaue c befestigt, welche ihrerseits mit der Stimmgabel so verbunden ist, dass eine Drehung um eine horizontale d und eine verticale Axe bb erfolgen kann. Jeder dieser Schieber hat einen horizontalen und einen verticalen Spalt. Die verticalen Spalte sind sehr breit und communiciren immer, während die horizontalen schmal sind ($\frac{3}{4}$ mm) und sich nur dann decken, wenn die Gabel durch ihre Gleichgewichtslage geht. Der Knoten steht direct mit dem horizontalen Spalt 1 des festen Schiebers in Verbindung; von diesem gelangt die Luft bei der Gleichgewichtslage der Gabel durch den Spalt 2, welcher mit 3 in Verbindung steht, nach 4 und dann mittelst des Ansatzes e zum Manometer. Die beiden Ventilflächen werden blos durch die Adhäsion der capillaren Flüssigkeitsschicht aneinander gehalten. Dieselbe wirkt so stark bei richtiger Justirung der Flächen, dass dieselben sich ziemlich schwer voneinander reissen lassen.

Um dieses Ventil auch während des Vibrirens auf seine Dichtigkeit zu prüfen, ist folgende Vorrichtung angebracht. In die Wand der Pfeife, gerade der Ventilmündung gegenüber, ist eine Büchse B eingelassen, durch welche sich, gut geführt, der Stahlstift f verschieben lässt. Dieser Stahlstift trägt an seinem vorderen Ende eine runde Messingscheibe h , gegen welche ein weiches Gummiplättchen i geschraubt ist.

1) Alle Spitzenschrauben sind mit Gegenmuttern versehen, um dieselben sicher einstellen zu können. Das geringste Schlottern irgend eines beweglichen Theiles würde das Arbeiten des Ventils vollständig hemmen.

Wird dieser Stahlstift nun mittelst der Schraube *s* in die Pfeife gedrückt, so legt sich das Gummiplättchen gegen den vorstehenden Rand des Rohres *g* an und bildet so einen luftdichten Abschluss. Dann kann das Ventil, gerade so wie oben beschrieben, auf sein Dichthalten geprüft werden. Ist dies geschehen, so wird die Schraube *s* zurückgeschraubt, der Bügel *L* zurückgeklappt, der Stift *f* ganz zurückgezogen und der normale Zustand der Pfeife wieder hergestellt.

Bei dieser Ventilconstruction kann das Manometer fast ohne Zwischenraum mit dem Ventil verbunden werden; kleine Luftvolumina, zwischen Manometer und Ventil eingefügt, haben durchaus keinen Einfluss auf die Manometerangaben.

Da der feste Ventilschieber an der Pfeife selbst befestigt ist, die ihrerseits mit der Stimmgabel keine gemeinsame Basis hat, so muss die Pfeife sehr fest gelagert sein, damit ein Abreissen der Ventilflächen vermieden wird. Deshalb ist dieselbe in ein gusseisernes Gestell *G* geschraubt, welches für jede Grösse und Form der Pfeife gebraucht werden kann (Fig. 6_a und 6_b). Die eine Klammer *K*, welche die Pfeife umfasst, ist festgestellt, während die andere *I* mittelst der Schraube *F* fein in der Verticalen verschoben werden kann. Auf diese Weise wird der feste Spalt in Bezug auf den beweglichen eingestellt.

Es mag hier erwähnt werden, dass ein derartiges Ventil eine Sirene von sehr constanter Tonhöhe abgibt, wenn es von irgend einer Seite angeblasen wird; auch kann man mannigfaltige Klangfarben damit hervorbringen, wenn man die Grösse und Form der Spalte variirt. So geben weite Spalten angeblasen einen weichen Ton, während bei engen Spalten ein Klang erzeugt wird, der an einen in der Ferne erklingenden, schmetternden Trompetenton erinnert.

III. Die Manometervorrichtung; das Aufzeichnen der Curven.

Um genaue Messungen über die Druckvariationen tönen-der Luftsäulen anzustellen, schien ein Wassermanometer nicht geeignet, denn die Trägheit und Reibung einer solchen Wassersäule ist immerhin ziemlich gross. Auch ist es schwer, parallactische Fehler beim Ablesen des schwingenden Mano-

meters zu vermeiden. Deshalb wurden die Messungen mittelst eines anderen ausgeführt, welches man wohl als Membranmanometer bezeichnen könnte.

Dasselbe ist in Taf. V Fig. 7_a im Durchschnitt, in Fig. 7_b im Aufriss (um 90° gedreht) dargestellt.

Auf einen Dreiwegehahn *A* kann eine Messingtrommel *B* (von verschiedener Grösse) geschraubt werden. Diese Trommel wird mit einer feinen Gummimembran überspannt, auf welche in der Mitte ein rundes, glashartes Stahlplättchen *a* aufgekittet ist. Auf diesem polirten Stahlplättchen sitzt eine ebenfalls harte Spitze *β* auf, welche an den Hebelarm *f* geschraubt ist. Dieser Hebel *f* hat seine Drehungsaxe in einer Stahlschneide, welche sich in zwei stumpfwinkligen, sorgfältig ausgeschliffenen Stahllagern *c* bewegt. Die Spitzen des schräg abgeschnittenen Stahlprismas liegen mit Spielraum gegen zwei Stahlplättchen *gg'* an, welche eine seitliche Verschiebung der Axe verhindern sollen. An diesem Stahlprisma ist ein leichter Spiegel *h* drehbar befestigt, kann aber mittelst der Schraube *i* in jeder beliebigen Lage (einem bestimmten Scalentheile entsprechend) festgeklemt werden. Durch ein kleines Gegengewichtchen *e* kann der Hebel ausbalancirt werden. Es ist ferner die Einrichtung getroffen, dass der Hebelarm, an welchem die Bewegung der Membran wirkt, beliebig verändert werden kann. Auf diese Weise ist man im Stande, den Winkel, um welchen sich der Spiegel dreht, passend zu wählen.

Dieser Winkel wird mittelst Fernrohres und Scala abgelesen.

Jenachdem die Art der Membran (verschiedene Gummisorten, Nickelinnellblech u. s. w.) gewählt und der Hebelarm des Lichtzeigers, sowie der des Manometers abgestimmt wird, kann die Empfindlichkeit des Manometers variirt werden; dieselbe lässt eine ausserordentlich hohe Steigerung zu. Da jedoch eine derartige Membran ihre Spannung beständig ändert (Gummimembranen müssen häufig erneuert werden) und auch von einer derartigen Vorrichtung keine Scalenangaben erwartet werden können, welche dem Drucke proportional wachsen, so muss das Membranmanometer vor und nach jeder Beobachtungsreihe ausgewerthet werden.

Zu diesem Zwecke ist der oben erwähnte Dreiweghahn angebracht, welcher folgende Verbindungen gestattet:

- 1) Ventil-Membranmanometer¹⁾,
- 2) Ventil-Wassermanometer¹⁾,
- 3) Ventil-Wassermanometer-Membranmanometer¹⁾,
- 4) Membranmanometer-Wassermanometer.

Bei der Auswerthung wird die Stellung 4 benutzt. In die Rohrleitung zwischen den beiden Manometern ist noch eine Zweigleitung k ²⁾ eingefügt, durch welche man die Luft in den Manometern auf einen bestimmten Druck (mit dem Munde) bringen kann. Ist dies geschehen, so wird die Luft durch Schliessen des Hahnes F abgesperrt. Um das Manometer mit Genauigkeit auf einen bestimmten Druck schnell einstellen zu können, ist in die Zweigleitung k ein kurzes Stück g dickwandigen Gummischlauches eingesetzt, welches durch die Schraube k mehr oder weniger zusammengedrückt werden kann. Indem so das abgeschlossene Luftvolum um kleine Bruchtheile variirt wird, kann der Druck mit Leichtigkeit genau regulirt werden. Das Wassermanometer wurde bei den definitiven Beobachtungsreihen mit dem Kathetometer abgelesen.

Selbstverständlich musste sowohl das Manometer wie auch das Fernrohr isolirt von den tönenden Theilen aufgestellt werden.

Dieselbe Manometervorrichtung wurde auch zur graphischen Aufzeichnung der Schwingungen benutzt. Alsdann wurde an dem Prisma ein langer Hebelarm von dünn gespaltenem Riet angebracht, in welchen vorn eine sehr feine, etwas abgerundete Stahlspitze eingesetzt war. Ein solcher auf der hohen Kante stehender Holzhebel verbindet mit grosser Leichtigkeit eine merkwürdige Stabilität und eignet sich vorzüglich zum Aufschreiben langsam verlaufender Curven. (Eine ähnliche Vorrichtung, welche den Namen einer Marey'schen Kapsel trägt, wird von den Physiologen häufig angewandt.) Die Curven wurden auf eine rotirende berusste Trommel aufgezeichnet, deren Drehung durch einen Villar-

1) Diese Combinationen der Luftwege leisten bei der Beobachtung gute Dienste.

2) Siehe die schematische Zeichnung Fig. 7 c.

ceau'schen Windflügelregulator gleichmässig gemacht wurde. Die Fixirung der Curven geschah auf photographischem Wege.

Ein auf die Trommel aufgespannter Streifen lichtempfindlichen Papiers wurde berusst. Alsdann liess man den Stift der Schreibvorrichtung die Curve aufzeichnen, indem er den Russ abkratzte. An diesen Stellen konnte das Licht an das lichtempfindliche Papier gelangen und dasselbe zersetzen. Nachdem nun kurze Zeit belichtet war (in directer Sonne circa fünf Minuten), wurde der Russ abgewaschen und das Bild fixirt. Vorzüglich eignet sich zu diesem Verfahren das Emulsionspapier nach Dr. Stolze, welches, im nassen Zustande auf eine Glasplatte aufgequetscht, nach dem Trocknen eine äusserst hohe Glätte zeigt und daher dem Schreibstift sehr wenig Reibung bietet. Die auf solche Weise fixirten Curven sind weit sauberer und haltbarer, als die auf die gewöhnliche Art erhaltenen. Die beigegeführten Curven sind möglichst getreue Reproductionen der Originale.

IV. Die Erzeugung und Regulirung des Anblasestromes; das Abstimmen der Pfeife.

Die Genauigkeit des vorliegenden Verfahrens hängt vorzugsweise von der Gleichförmigkeit des Anblasestromes ab, wie dies im ersten Paragraphen auseinandergesetzt wurde. Es wurde deshalb auf die Regulirung desselben die grösste Sorgfalt verwendet. In der That bot diese Regulirung die grössten praktischen Schwierigkeiten der Untersuchung.

Zur Erzeugung des Luftstromes stellte sich ein sogen. Roots blower am geeignetsten heraus; ein gewöhnliches Centrifugalgebläse liefert nicht den nöthigen Druck. Ohne Regulirvorrichtung ist jedoch ein solches Gebläse für diese Versuche absolut unbrauchbar, weil es rasche, ziemlich starke Druckschwankungen gibt. Immerhin sind solche Druckschwankungen aber kleiner als diejenigen, welche ein gewöhnlicher Blasebalg erzeugt.

Diese Stösse lassen sich jedoch fast ganz vernichten durch Einschalten grosser Luftvolumina zwischen Pfeife und Gebläse. Auch ist es sehr vortheilhaft, den Luftstrom mit starker Reibung durch enge Oeffnungen zu pressen.

Von den zwischengeschalteten Lufträumen muss eines

variabel sein, um grössere Druckschwankungen ausgleichen zu können, wie solche von dem unregelmässigen Gang des Motors, welcher das Gebläse treibt, herrühren. Dieses veränderliche Luftvolum wurde durch ein grosses Gasometer gebildet, welches in Fig. 8 abgebildet ist. Die Führung des beweglichen Theiles ist folgendermassen angeordnet. Mit der oberen Wand des inneren Theiles ist ein Eisenrohr R fest verbunden. Dasselbe wird oben in drei Rollen geführt, welche um 120° voneinander verschieden, angeschraubt sind. (In der Figur sind nur zwei gezeichnet.) An der Wand des beweglichen Cylinders sind zwei senkrechte, genau parallel zu einander justirte Messingröhren p angebracht, welche sich in den beiden Rollen cc' bewegen. Alle Rollen laufen zwischen Spitzen und sind genau laufend gedreht. Hierdurch ist die Reibung der sich bewegenden Theile auf ein Minimum beschränkt, weil sie überall in wälzende verwandelt ist. Der Druck im Gasometer wird durch Wasser, welches in den Raum E eingegossen werden kann, resp. durch aufgelegte Gewichte regulirt. Der vom Gebläse kommende Luftstrom, welcher schon ein etwa 1 cbm haltendes Gefäss passirt hat und durch enge Oeffnungen hindurchgepresst ist, gelangt durch den Hahn H in das Gasometer, aus welchem er durch den Hahn H' zur Pfeife geführt wird. Die Stärke des Anblasedruckes wird durch die Stellung des Hahnes H' regulirt. Der andere Hahn wurde jedesmal nur so weit geöffnet, dass eben so viel Luft ein- wie ausströmte, und der bewegliche Theil des Gasometers eine constante Höhe beibehielt.

Der so regulirte Luftstrom ist schon sehr constant; bei geringem Anblasedruck, bis etwa 100 mm Wasser, bleiben die Schwankungen innerhalb eines Drittel Millimeters. Diese Schwankungen steigern sich natürlich mit dem Drucke. Bei 200 mm betragen sie ca. $1\frac{1}{2}$ mm, bei 300 mm etwa 3 mm¹⁾.

Die Abstimmung der Pfeife mit der Gabel wurde durch die in Fig. 6_a und 6_b gezeichnete Vorrichtung ausgeführt.

1) Bei der Bestimmung der Schwingungszahl der Pfeife wurde durch diesen Luftstrom eine Sirene getrieben. Die Tonhöhe derselben konnte während mehrerer Minuten so constant erhalten werden, dass die Zahl der Schwebungen, welche sie mit der Stimmgabel machte, nur in geringen Grenzen schwankte.

Dieselbe besteht aus einer starken Messingplatte P , welche an einer Axe A befestigt ist. Diese Axe bewegt sich in Spitzen zwischen einem Pfeifenhalter K und dem Ständer T . Die Platte kann hochgezogen und damit die Pfeife tiefer gestimmt werden, wenn man die Schraube F löst. Hat man die ungefähre Stellung der Platte P gefunden, so wird F angezogen. Durch die Mikrometerschraube M , gegen welche sich der Hebel H infolge des Uebergewichtes der schweren Platte anlegt, kann die Platte ganz fein verschoben, und so die Pfeife sehr genau mit der Gabel zur Uebereinstimmung gebracht werden. Die Platte ist auf diese Weise sehr sicher gelagert, sodass sie nicht durch das Tönen der Pfeife zum Erzittern gebracht und dadurch verstellt werden kann; dennoch kann dieselbe leicht durch die Mikrometerschraube verstellt werden. Da durch diese Vorrichtung die Tonhöhe nur innerhalb sehr geringer Grenzen geändert werden kann, die Pfeife dieselbe aber bei verschiedenem Anblasedruck stark ändert, so muss zuerst eine gröbere Abstimmung durch passende, auf die Gabel aufgeschraubte Gewichte ausgeführt werden.

Eine sehr bequeme Art, die Pfeife abzustimmen, bietet auch die Veränderung des Anblasedruckes, von welchem ja die Tonhöhe abhängt. Dieses Mittel ist sogar für starke Töne das beste, weil sich dann die Pfeife durch das oben erwähnte Verfahren nicht gut mehr abstimmen lässt. Deshalb ist zwischen Gasometer und Pfeife ein zweiter Hahn I (Fig. 9_a) eingesetzt, dessen Stellung durch den Zeiger Z auf dem getheilten Kreise L ablesbar ist. Vor und hinter dem Hahn I mündet eine kleine Zweigleitung U' . (Der Hahn I darf nicht ganz geöffnet sein.) Der durch die Zweigleitung fließende Luftstrom kann mittelst des Schraubenhahns A (Fig. 9_b) sehr fein regulirt werden. Dieser Schraubenhahn ist demjenigen nachgebildet, welchen Régnault¹⁾ bei seinen Untersuchungen über die specifische Wärme der Gase anwandte. Diese Abstimmvorrichtung hat sich, namentlich bei starken Tönen, sehr gut bewährt.

1) Régnault, *Mém. de l'acad.* 26. p. 58,

§ 3. Beobachtungen an gedackten Pfeifen.

A. Druckvariation im Knoten einer gedackten Pfeife. — Die untersuchte Pfeife hatte folgende Dimensionen:

Länge der Pfeife	360 mm
Querschnitt	45, resp. 65 mm
Höhe der Mundöffnung	22 mm
Die Schwingungen in der Secunde betrugen	184

Die Pfeife, welche absichtlich mit einer besonders hohen Mundöffnung versehen wurde, gab einen kräftigen Grundton. Die Obertöne waren auch bei sehr starkem Anblasen verhältnissmässig schwach. Auch durch den stärksten zur Verfügung stehenden Druck konnte der Grundton nicht zum Ueberspringen in den ersten Oberton gebracht werden.

In folgenden Tabellen ist der grösste (D) und kleinste Druck (V), welcher im Knoten der untersuchten Pfeife herrschte, bei neun verschiedenen Anblasedrucken (A in Millimetern Wasser) verzeichnet. Die Zahlen bedeuten Scalentheile, welche das Manometer zeigte. (Als Nullpunkt ist 500 gewählt.) Unter dem arithmetischen Mittel sind die Zahlen angegeben, welche sich bei der Auswerthung des Membranmanometers mit einem kathetometrisch abgelesenen Wassermanometer ergaben. Ausserdem ist die mittlere Zeit einer Manometerschwingung ($= S$) angegeben. Da die Beobachtungsreihen zu verschiedenen Zeiten ausgeführt wurden, ist an der Spannung der Membran und der Länge des Hebelarmes mannichfach geändert worden. Deshalb können die Scalablesungen nicht direct miteinander verglichen werden. Die angegebenen Beobachtungsreihen bilden bloß einen kleinen Theil von denjenigen, welche unter mannichfaltiger Abänderung der Versuchsanordnungen ausgeführt wurden. Alle hatten untereinander dieselbe Uebereinstimmung, welche aus den Beispielen hervorgeht.

I.		II.		III.	
$A = 44 \text{ mm. } S = 9 \text{ Sec.}$		$A = 60 \text{ mm } S = 10 \text{ Sec.}$		$A = 80 \text{ mm } S = 8 \text{ Sec.}$	
Druck	Verdünnung	D	V	D	V
526,9	473,1	539,2	460,9	551,2	448,7
527,0	473,2	539,3	460,8	551,3	448,9
527,4	473,1	539,2	461,0	551,1	449,1
527,1	473,4	539,5	461,1	551,5	449,3
526,8	473,0	539,4	461,0	551,4	449,2
527,0	473,1	539,2	461,0	551,6	449,2
527,5	473,5	539,1	461,1	551,2	449,1
527,4	473,5	539,5	460,9	551,8	449,1
526,8	473,3	539,1	460,8	551,3	449,2
526,7	473,3	539,4	461,2	551,2	448,8
527,1	473,2	539,3	461,0	551,4	449,1
<u>40,0 mm</u>	<u>-39,75 mm</u>	<u>57,5 mm</u>	<u>-57,3 mm</u>	<u>78,4 mm</u>	<u>-78,0 mm</u>
IV.		V.		VI.	
$A = 102 \text{ mm } S = 7 \text{ Sec}$		$A = 145 \text{ mm } S = 14 \text{ Sec.}$		$A = 174 \text{ mm } S = 9 \text{ Sec.}$	
D	V	D	V	D	V
564,7	436,0	582,9	418,3	594,1	407,8
564,5	436,1	582,7	418,7	593,6	408,2
564,3	436,4	582,5	418,2	594,3	407,7
564,7	436,3	582,8	418,8	593,7	407,5
564,2	436,2	582,9	418,9	594,6	407,7
564,8	436,0	582,7	418,1	593,6	408,3
564,6	436,5	582,9	418,6	593,7	407,6
564,5	436,0	582,8	418,3	593,6	408,4
564,5	436,0	582,5	418,5	593,5	407,7
564,3	436,1	582,3	418,5	593,6	407,8
564,5	436,2	582,7	418,5	593,8	407,9
<u>94,8 mm</u>	<u>-94,0 mm</u>	<u>120,1 mm</u>	<u>-118,4 mm</u>	<u>135,1 mm</u>	<u>-133,4 mm</u>
VII.		VIII.		IX.	
$A = 200 \text{ mm } S = 6 \text{ Sec.}$		$A = 240 \text{ mm } S = 9 \text{ Sec.}$		$A = 308 \text{ mm } S = 6 \text{ Sec.}$	
D	V	D	V	D	V
601,0	401,5	610,5	392,6	626,3	377,1
600,4	401,7	609,4	392,8	624,1	376,9
600,3	401,9	610,7	392,1	624,3	377,2
600,7	401,4	609,8	392,0	625,7	378,2
601,3	401,4	609,6	392,2	624,8	378,4
601,1	401,6	609,9	392,8	626,1	378,1
601,4	401,8	609,4	392,7	626,3	378,4
600,7	401,2	609,7	392,6	624,8	378,5
600,8	401,3	610,4	392,8	625,6	376,8
600,9	401,7	610,7	392,3	625,5	377,3
600,9	401,5	610,0	392,5	625,4	377,7
<u>145,2 mm</u>	<u>-142,3 mm</u>	<u>160,3 mm</u>	<u>-156,2 mm</u>	<u>182,4 mm</u>	<u>-177,3 mm</u>

Vergleicht man die Einzelbeobachtungen jeder Reihe miteinander, so findet man bei geringem Anblasedrucke eine gut zu nennende Uebereinstimmung. Diese Uebereinstim-

mung wird jedoch immer schlechter, je stärker die Pfeife angeblasen wird. Hieran mögen die immer grösser werdenden Stösse des Anblasestromes Schuld sein; auch erschwert ein bei starken Tönen auftretendes Erzittern des Spiegels die Ablesung.

Die Minimalwerthe des Druckes wachsen nicht im Verhältnisse wie die zugehörigen Maximalwerthe, was sich aus der Vergleichung der betreffenden Zahlen ergibt. Die Curve in Fig. 10 veranschaulicht, in welcher Weise der Druck im Knoten von der Stärke des Anblasestromes abhängt.

Die Maximaldrucke im Knoten sind als Ordinaten aufgetragen, während die Abscissen den Anblasedruck angeben.¹⁾

Aus dem Maximaldruckunterschiede im Knoten der Pfeife lässt sich nun die Amplitude eines Lufttheilchens an irgend einem Punkte im Inneren der Pfeife berechnen, wenn wir als Bewegung eine Pendelschwingung annehmen. Dies ist bei schwachen Tönen vollständig erlaubt.

Bezeichnet x den Abstand eines Lufttheilchens von der Knotenfläche zur Zeit t , c die Schallgeschwindigkeit (340 m), T die Periode der Pfeife, so findet man für die Excursionen dieses Lufttheilchens:

$$\zeta = a \sin \frac{2\pi t}{T} \sin \frac{2\pi x}{cT},$$

wobei sich a aus der Gleichung:

$$1 - \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 1 - \frac{2\pi a}{cT} \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi x}{cT}$$

bestimmt.

Es ist nämlich $1 - \partial \zeta / \partial x$ die Dichte der Luft im Knoten zur Zeit t , wenn wir die Dichte der ruhenden Luft gleich Eins setzen. Das Maximum und Minimum im Knoten liegen auseinander um:

$$\frac{4\pi t}{cT}.$$

Die vorhergehenden Tabellen geben die Druckunterschiede an.

Wir wollen von diesen Drucken den kleinsten (1) und den grössten (9) zur Berechnung nehmen. In Atmosphärendruck umgerechnet, ergibt sich:

$$A_1 = 0,00771, \quad A_9 = 0,03481.$$

1) Die Kreuze sind die Beobachtungen.

Da die Temperaturänderungen während der Schall-schwingungen die Dichtigkeitsänderungen vergrössern, müssen wir, um aus den Druckänderungen die Dichtigkeitsänderungen zu finden, dieselben durch 1,41 dividiren; man erhält so:

$$\left. \begin{array}{l} \delta_1 = 0,00547 \\ \delta_9 = 0,02469 \end{array} \right\} \text{ die Dichte der ruhenden Luft } = 1 \text{ gesetzt.}$$

Hiernach berechnet sich:

$$a_1 = 0,805, \quad a_9 = 3,632.$$

Im Schwingungsbauche der Pfeife wird:

$$\zeta = a \sin 2\pi \frac{360}{1848} \sin \frac{2\pi t}{T},$$

also die Amplitude:

$$A_1 = 0,757, \quad A_9 = 3,415.$$

Die Gesamtverschiebung = $2A$:

$$W_1 = 1,514, \quad W_9 = 6,830.$$

Aus diesen Zahlen berechnen sich die Verschiebungen inmitten der Mundöffnung, des kleineren Querschnittes halber, zu:

$$W_I = 4,578 \text{ mm}, \quad W_{IX} = 20,18 \text{ mm}.$$

B. Schwingungsform gedackter Orgelpfeifen. — Eine sorgfältig construirte Pfeife (vom Orgelbauer Appun in Hanau) wurde auf ihre Schwingungsform hin untersucht.

Die Dimensionen derselben waren folgende:

Länge der Pfeife	340 mm
Höhe des quadratischen Querschnittes	66 mm
Höhe der Mundöffnung	16 mm

Die Schwingungscurven derselben sind bei den Zeichnungen wiedergegeben und den Originalen möglichst genau nachgebildet. Es wurden Schwingungscurven bei drei verschiedenen Anblasedrucken aufgezeichnet. Bei der graphischen Darstellung sind die Manometerausschläge (Ordinaten) nicht ohne weiteres miteinander zu vergleichen; erst durch Auswerthung mit einem Wassermanometer wird dies der Fall. Die Empfindlichkeit der Schreibvorrichtung wurde für jeden Druck abgepasst, um keine zu grossen Ausschläge zu erhalten, bei welchen die Excursionen des Schreibstiftes ihrer Bogenform wegen nicht mehr zu Ordinaten genommen wer-

den können. Auch ist die Umlaufszeit der Trommel bei den verschiedenen Curven verschieden.

I. Schwingungsform bei schwachem Anblasen (60 mm Wasser).

Die Curve ist in Fig. B dargestellt. Die mittlere Dauer einer Schwingung betrug 40 Secunden. Der Unterschied zwischen Maximal- und Minimaldruck im Knoten betrug 87,5 mm. Eine grosse Anzahl dieser Curven wurden auf der Theilmaschine ausgemessen. Hierzu eigneten sich durchaus nicht alle, vielmehr wurde die Messung nur bei denen ausgeführt, die aufgezeichnet wurden, während der Anblasestrom sehr constant blieb. (Das Wassermanometer wurde mikroskopisch beobachtet und die betreffenden Curven markirt.) Solche Curven sind verhältnissmässig selten.

Es wurden die Ordinaten gemessen, welche den Werthen $T/16$, $T/8$, $T/4$ entsprechen.

$\frac{T}{16}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{16}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{16}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{4}$
0,99	1,80	2,62	1,04	1,80	2,63	1,07	1,80	2,59
1,01	1,82	2,61	1,04	1,81	2,63	1,02	1,81	2,59
1,02	1,84	2,59	1,03	1,85	2,61	1,04	1,80	2,61
0,98	1,80	2,60	1,02	1,80	2,58	1,05	1,82	2,61
1,03	1,81	2,60	1,06	1,82	2,59	0,99	1,83	2,59
0,96	1,84	2,61	1,03	1,81	2,60	0,96	1,82	2,59
1,03	1,82	2,63	1,04	1,82	2,61			
Mittel						1,020	1,816	2,605

Berechnet man mittelst der gefundenen Amplitude die Werthe der Ordinaten für $T/16$ und $T/8$, so findet man:

berechnet	0,997	1,842
beobachtet	1,020	1,816

Diese Abweichungen können, da sie einmal im positiven, einmal im negativen Sinne erfolgen, nicht wohl durch das Mitklingen des dritten Partialtones erklärt werden; sie müssen vielmehr als Beobachtungsfehler betrachtet werden (namentlich die Schreibvorrichtung dürfte daran Schuld sein). Diese Abweichungen liegen jedoch in solchen Grenzen, dass die Schwingung mit Recht als eine einfache Sinusschwingung bezeichnet werden kann.

II. (Curve C). Schwingungsform bei mittelstarkem Drucke. (190 mm Wasser.) Maximaldruckunterschied 258 mm. Mittlere Schwingungszeit 5 Sekunden.

Auch bei dieser Curve wurden die zu den Abscissenwerthen $T/16$, $T/8$, $T/4$, $3T/8$ zugehörigen Ordinatenwerthe ausgemessen und aus den Werthen für jede Ordinate dann das Mittel gebildet.

Diese Auswerthung ergab:

t	0	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{3T}{8}$	$\frac{T}{16}$
y	0	35	44	36	32

Berechnet man nach der Fourier'schen Reihe:

$$y = \sum_a \left(A_a \cos a \frac{2\pi t}{T} + B_a \sin a \frac{2\pi t}{T} \right),$$

(wobei im Falle der gedackten Pfeifen a die ungeraden Zahlen durchläuft) die Werthe der Partialamplituden $R_a = \sqrt{A_a^2 + B_a^2}$ und die Phasen $\operatorname{tg} \varphi_a = A_a / B_a$, so erhält man, wenn man nur den ersten und dritten Ton berücksichtigt:

$$R_1 = 47,10, \quad \varphi_1 = -0^\circ 26'; \quad R_3 = 3,124, \quad \varphi_3 = 6^\circ 30,4'.$$

Phasendifferenz: $\varphi_3 - \varphi_1 = 6^\circ 56'.$

Wird mittelst dieser Coëfficienten der (noch gemessene) Werth für $T/16$ berechnet, so ergibt sich statt:

$$22 - 20,7.$$

III. (Curve A). Schwingungsform bei starkem Anblasen (400 mm Wasser). Maximalwerth des Druckunterschiedes 305 mm. Dauer einer Schwingung zwischen 2 und 3 Sekunden.

Wurde die Pfeife mit solcher Stärke angeblasen, so war es sehr schwer, sie mit der Gabel in genügende Uebereinstimmung zu bringen. Bei nicht ganz vollkommener Uebereinstimmung wechselte das Manometer sprungweise zwischen seiner Maximal- und Minimallage.¹⁾ Alsdann konnte das Manometer, den früheren Angaben zufolge, kein richtiges Bild des Schwingungsvorganges mehr geben. Es gelang jedoch auch hierbei, mit Mühe allerdings, die Pfeife genau genug abzustimmen. Alsdann wurde die Curve A er-

¹⁾ Ganz ähnliche Verhältnisse fanden Töpler und Boltzmann; siehe oben erwähnte Abhandlung Pogg. Ann. 141. p. 321. 1870.

halten, welche den Einfluss des nunmehr stärker auftretenden dritten Obertones auf den Grundton evident darstellt.

Zum Zwecke der Bestimmung dieses Einflusses wurde die Curve in ihre Partialschwingungen zerlegt. Es wurden die zu dem Maximum, resp. Minimum der Ordinaten zugehörigen Abscissen gemessen (ebenso die zu den Werthen $T/16$, $T/8$, $T/4$ zugehörigen Ordinaten) und aus vielen Messungen das Mittel gebildet; dies ergab:

t	0	$\frac{T}{16}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{42 T}{2.100}$	$\frac{T}{4}$	$73.T$
y	0	28	41	36	40	53

die $T/2$ entsprechende Abscisse = 100 gesetzt. Für den Werth $73 T/100$ kann, weil er einem Maximalwerthe der Ordinate entspricht, $3 T/8$ gesetzt werden.

Aus den Werthen:

t	0	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{3 T}{8}$
y	0	41	40	53

findet man die Partialamplituden und Phasen:

$$R_1 = 53,39, \quad \varphi_1 = -4^\circ 33,5'; \quad R_3 = 13,88, \quad \varphi_3 = 17^\circ 47,6';$$

$$\varphi_3 - \varphi_1 = 22^\circ 21'.$$

Die Intensität der Partialtöne ist gleich dem Quadrate der Amplituden zu setzen.

Bestimmt man mittelst dieser Werthe die Ordinaten für:

$$\frac{T}{16} \quad \text{und} \quad \frac{42 T}{2.100}, \quad \text{so findet man:}$$

$$y \quad \left\{ \begin{array}{l|l} 30,3 & 37,9 \text{ berechnet,} \\ 28 & 36 \text{ beobachtet.} \end{array} \right.$$

Diese Abweichungen liegen innerhalb der Beobachtungsfehler. Ein merklicher Einfluss des fünften Obertones kann daher nicht nachgewiesen werden.

In Fig. *D* und *E* sind noch zwei Schwingungsformen der zuerst erwähnten Pfeife beigegeben, welche bei mittlerem und starkem Anblasedrucke aufgezeichnet wurden. Man sieht, wie die Formen bei verschiedenen Pfeifen wechseln können.

Auch in freier Luft wurden Beobachtungen über die Schallintensität angestellt. Es stellte sich heraus, dass die Luftverdichtungen, resp. Verdünnungen, welche von einer mässig angeblasenen Pfeife in der freien Luft (selbst in der Entfernung von 4 m) erzeugt wurden, noch sehr messbare Manometerausschläge gaben. Diese lagen noch lange nicht an der Grenze der Empfindlichkeit der Vorrichtung. Da sich jedoch in dem kleinen Beobachtungsraume stehende Wellen ausbildeten, die nachweisbare Druckmaxima und -minima hervorriefen, mussten die hierher gehörigen Versuche aufgegeben und auf eine spätere Zeit aufgeschoben werden.

§ 4. Untersuchungen über Phasendifferenzen der Bewegung tönender Luftsäulen.

Auf einen Vorschlag des Hrn. v. Helmholtz wurde eine Combination zweier Schallventile zur Untersuchung von Phasendifferenzen in tönenden Luftsäulen verwandt.

Hr. v. Helmholtz stellt in seinem Aufsatz: „Ueber Schwingungen offener Röhren,“¹⁾ folgende Gleichung auf:

$$(I) \quad \frac{d\psi}{dx} = \frac{A}{\cos k\alpha} \cos k(x - \alpha) \cos 2\pi nt + A \frac{k^2 Q}{2\pi} \sin kx \sin 2\pi nt,$$

wobei ψ das Geschwindigkeitspotential, α die Entfernung des Maximums der Schwingungen von der Mundöffnung, Q den Querschnitt des cylindrischen Rohres, n die Schwingungszahl pro Secunde, $k = 2\pi/\lambda$ (λ Wellenlänge) und A eine Constante bezeichnet.

Setzt man:

$$J = A \cdot \sqrt{\frac{\cos^2 k(x - \alpha)}{\cos^2 k\alpha} + \frac{k^4 Q^2 \sin^2 kx}{4\pi^2}},$$

$$\operatorname{tg} \tau = - \frac{k^2 Q \sin kx \cos k\alpha}{2\pi \cos k(x - \alpha)},$$

so erhält man für die Gl. (I):

$$\frac{d\psi}{dx} = J \cos(2\pi nt + \tau).$$

Die Werthe von x , für welche J^2 ein Maximum, resp. Minimum wird, gibt die Gleichung:

1) v. Helmholtz, Journ. f. reine und angewandte Mathematik. 57. p. 1.

$$(II) \quad \operatorname{tg} 2k(x - \alpha) = \frac{k^4 Q^2 \sin k\alpha \cos^2 k\alpha}{2\pi^2 \left(1 - \frac{k^4 Q^2}{4\pi^2} \cos^2 k\alpha\right)}.$$

Wird nun $k^2 Q$ als unendlich kleine Grösse betrachtet, so wird die Gl. (II) mit Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung:

$$\operatorname{tg} 2k(x - \alpha) = 0.$$

Dann wird J^2 ein Maximum $= J_{(\max)}^2$, wenn:

$$k(x - \alpha) = a\pi; \quad \cos k(x - \alpha) = \pm 1;$$

$$J_{(\max)}^2 = \frac{A^2}{\cos^2 k\alpha},$$

und Minimum $= J_{(\min)}^2$, wenn:

$$k(x - \alpha) = \pi \left(a + \frac{1}{2}\right)\pi; \quad \cos k(x - \alpha) = 0;$$

$$J_{(\min)}^2 = A^2 \frac{k^4 Q^2}{4\pi^2} \cos^2 k\alpha.$$

Im Schwingungsbauche (Maximum der Bewegung) wird $\operatorname{tg} \tau$ eine unendlich kleine Grösse, also $\tau = a\pi$. Im Knoten dagegen wird $\operatorname{tg} \tau = \infty$, $\tau = \left(a + \frac{1}{2}\right)\pi$, also liegen die Phasen der Bewegung im Bauch und Knoten um $\frac{1}{4}$ Undulationszeit auseinander.

Diese Phasendifferenz wird sich mit Hülfe der Schallventile folgendermassen ermitteln lassen.

Zwei Schallventile, durch dieselbe periodische Kraft zu derselben Zeit geöffnet und geschlossen, werden Manometerschwingungen von derselben Periode und Phase haben, wenn wir sie mit einer tönenden Luftsäule in Verbindung setzen, die überall gleiche Phase hat. Ändert sich jedoch die Phase an einer Stelle um einen constanten Werth, so werden auch die Manometer dieselbe Phasendifferenz anzeigen.

Setzt man in den Knoten und den Bauch einer Pfeife je ein solches abgestimmtes Ventil, so werden deren Manometer eine etwa vorhandene Phasendifferenz angeben müssen. [Auch im Schwingungsmaximum der Pfeife treten deutlich nachweisbare Druckänderungen auf (bis zu 15 mm Wasser).]

Vorher muss man sich aber vergewissern, ob die Ventile wirklich den gestellten Anforderungen genügen, d. h. ob sie

genau zur selben Zeit abschliessen (das Abschliessen ist das Wesentliche) und nicht etwa in ihrer eigenen Bewegung schon eine Phasenverschiebung zeigen. Deshalb wurden die Ventile beide mit dem Knoten derselben Pfeife verbunden. Eins davon war ein electromagnetisches, das andere ein Stimmgabelventil. Das electromagnetische Ventil öffnete sich jedesmal, wenn die obere Gabelzinke, welche das andere Ventil bewegte, ihre tiefste Lage erreicht hatte und den Stromschluss durch einen Quecksilbercontact herstellte. Zu derselben Zeit deckten sich auch die Spalte.

Diese Ventile zeigten eine constante Phasenverschiebung, welche nicht beseitigt werden konnte, und zwar schloss sich das electromagnetische Ventil später. Dies ist leicht erklärlich, wenn man bedenkt, dass an dem Platinstift des Quecksilbercontactes beim Austauschen ein Quecksilberfaden adhärirt, welcher den Stromschluss verlängert. Auch kommt die Zeit wohl noch in Betracht, welche der Magnetismus zum Verschwinden braucht. Diese Phasendifferenz der Ventile kann leicht constant erhalten werden.

Wird nun eins der Ventile in den Schwingungsbauch¹⁾ gebracht, so zeigt sich sofort, dass (wenn wir von der constanten Differenz absehen) die Manometermaxima nahe um $\frac{1}{4}$ Undulationszeit differiren.

Dieser Versuch dürfte wohl als eine experimentelle Bestätigung des theoretischen Ergebnisses angesehen werden.

Mehrere von den in dieser Abhandlung erwähnten Apparaten wurden in der mechanischen Werkstatt von Max Wolz (Bonn) mit bekannter Präcision und Eleganz ausgeführt.

Phys. Laborat. der Univ. Berlin, im Herbst 1888.

1) Dasselbe wurde in die Pfeifenwand gerade in Höhe der Mundöffnung eingesetzt.

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 3 a.

Fig. 4 a.

Fig. 4 c.

Fig. 4 b.

Fig. 5 a.

Fig. 5 b.

Fig. 6 b.

Fig. 5.

Fig. 6 a.

Fig. 10.

Rap. s.