

7. Über absolute Messungen der Schallintensität; von W. Zernov.

(Erste Mitteilung.)

Für die absolute Messung der Schallintensität wurden bisher folgende vier Methoden vorgeschlagen:

1. *Die Rayleighsche Scheibe*¹⁾, welche die lebendige Kraft der Schallschwingungen der Luft direkt zu messen gestattet; die Theorie der Methode wurde von W. König²⁾ gegeben.

2. *Druckkräfte der Schallwellen*, deren Theorie von Lord Rayleigh³⁾ entwickelt wurde, und welche für absolute Messungen von Altberg⁴⁾ verwendet wurden, erlauben aus dem Überdruck an einer reflektierenden Wand die lebendige Kraft der auffallenden Schallwelle zu bestimmen.

3. *Die refraktometrische Methode* von Toepler und Boltzmann⁵⁾ gibt die Möglichkeit, die Amplitude der periodischen Dichtigkeitsänderungen der Luft in einem Schwingungsknoten zu messen; die Methode wurde von Raps⁶⁾ verfeinert.

4. *Das Wiensche Vibrationsmanometer*⁷⁾ mißt die Amplitude der periodischen Schwankungen des Luftdruckes, welche die Schallwellen an einer reflektierenden Wand hervorrufen; die Methode wurde, etwas modifiziert, von Webster⁸⁾ angewendet.

Die beiden ersten Methoden ermöglichen die absolute Messung der Schallintensität unabhängig von der Schwingungsform der zu messenden Schallwelle, während die beiden letzten Methoden ohne weiteres sich nur auf einfache Sinusschwingungen anwenden lassen.

1) Lord Rayleigh, Phil. Mag. **14.** p. 186. 1882; Scientific. Papers **2.** p. 132.

2) W. König, Wied. Ann. **43.** p. 43. 1891.

3) Lord Rayleigh, Phil. Mag. (6) **10.** p. 364. 1905.

4) W. Altberg, Ann. d. Phys. **11.** p. 405. 1903.

5) A. Toepler u. L. Boltzmann, Pogg. Ann. **141.** p. 321. 1870.

6) A. Raps, Wied. Ann. **50.** p. 193. 1893.

7) M. Wien, Wied. Ann. **36.** p. 835. 1889.

8) A. G. Webster, Phys. Rev. **16.** p. 248. 1903.

Inwieweit die einzelnen Methoden übereinstimmende Resultate liefern, ist zurzeit eine offene Frage, da ein experimenteller Vergleich der Methoden bisher nicht gemacht worden ist und die ausgeführten absoluten Messungen auf anderen Wegen nicht kontrolliert wurden. Auf Veranlassung von Prof. Dr. P. Lebedew habe ich diese Lücke auszufüllen versucht; meine erste Mitteilung bezieht sich auf den Vergleich der Druckmessungen mit den Angaben des Wienschen Vibrationsmanometers.

I. Die Versuchsanordnung und die Apparate.

Bei der Wahl der Versuchsanordnung wurde angestrebt, die Messungen mit möglichst intensiven Schallschwingungen aus-

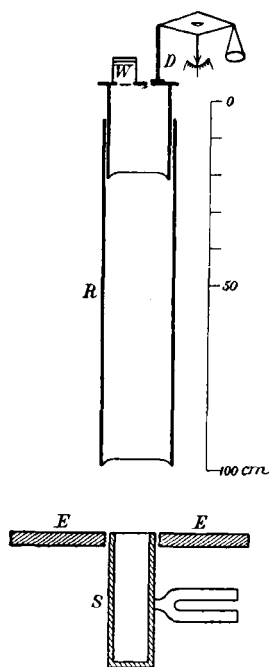


Fig. 1.

zuführen, da bei geringen Schallintensitäten die störenden Nebeneinflüsse, welchen namentlich der Druckapparat ausgesetzt ist, die Genauigkeit der Messungen stark beeinträchtigen können; es wurde deshalb die folgende Versuchsanordnung gewählt (Fig. 1): die Schallschwingungen, welche von dem Resonanzkasten einer elektromagnetisch erregten Stimmgabel *S* ausgehen, erzeugen in einem vertikalen Resonanzrohre *R* kräftige stehende Schwingungen. In der oberen Wand dieses Resonators sind zwei Öffnungen angebracht: die eine ist durch das Wiensche Vibrationsmanometer *W*, die andere durch den am Wagebalken hängenden Stempel des Druckapparates *D* geschlossen. Die Messungen werden mit beiden Apparaten gleichzeitig gemacht und die hieraus berechneten absoluten Schallintensitäten der stehenden Schwingung miteinander verglichen.

1. Als *Schallquelle* diente die Mündung des Resonanzkastens einer Stimmgabel *Ut₃* (512 einf. Schw. pro Sek.), welche

2) Um einen gleichmäßigen Gang des Motors zu erzielen, ist auf der Achse desselben ein genügend großer Windflügel angebracht.

brechungszahl für die als Schallquelle dienende Gabel S . Durch Verstellen der Laufgewichte der Reguliergabel kann dieselbe auf die maximale Erregung der Gabel S eingestimmt werden. Der Erregerstrom wird auf dem Leitungsnetze (110 Volt Gleichstrom) entnommen, durch den Widerstand W_2 reguliert und durch den Schlüssel U unterbrochen.

2. Das Resonatorrohr war aus 3 mm starkem Zinkblech gefertigt und hatte 16,3 cm Durchmesser. Der den Boden tragende Teil hatte eine Länge von ca. 20 cm; über ihn konnte entweder ein kurzer, ca. 25 cm langer Zylinder geschoben werden und soweit vorgeschoben werden, bis Resonanz für $\lambda/4$ eintrat; oder es konnte der kurze Zylinder durch einen langen (ca. 90 cm Länge) ersetzt werden und das Resonanzrohr auf $3\lambda/4$ abgestimmt werden.

3. Der Druckapparat bestand aus einem Metallstempel P (Fig. 3) (Durchmesser 50 mm, Dicke 5 mm), welcher mit einem geringen Spielraum von 0,5 mm in die Öffnung im Boden des Resonanzrohres paßte; der Stempel hing am Wagebalken und war durch ein Gegengewicht äquilibriert. Um den Ausgleich des Druckes durch den Schlitz zu verhindern, wurde in demselben ein Tropfen leichtflüssigen Maschinenöles gebracht, welches durch kapillare Kräfte im Schlitze gehalten wurde¹⁾; um eine seitliche Verschiebung des Stempels, welche durch Kapillarkräfte des Öles hervorgebracht werden können, zu verhüten, waren auf dem Stempel drei Stifte angebracht, an welchen dünne Drähte D_1 , D_2 , D_3 (Länge 10 cm, Dicke 0,1 mm) befestigt waren; durch geeignete Spannvorrichtungen wurde der Stempel in seiner zentralen Lage gehalten ohne daß seine kleinen vertikalen Verschiebungen hierdurch stark beeinflußt waren; diese letzteren wurden mit Spiegel und Skala gemessen: ein vertikaler Spiegel S_1 war auf einem kleinen Dreifuß befestigt, der mit zwei Füßen auf dem Boden des Resonanzrohres und mit einem Fuß auf dem beweglichen Stempel stand — verschob sich der Stempel nach oben, so neigte sich entsprechend

1) Um eine Ausbreitung des Öles auf der unteren Fläche des Stempels P und der anliegenden Resonatorwand zu verhindern, wurden im geringen Abstände von dem Schlitz und zu diesem konzentrisch zwei Furchen F_1 , F_1 und F_2 , F_2 eingedreht.

der Spiegel. Um die Skala zu eichen, wurde ein Übergewicht von 0,01 g auf die Wagschale gelegt.

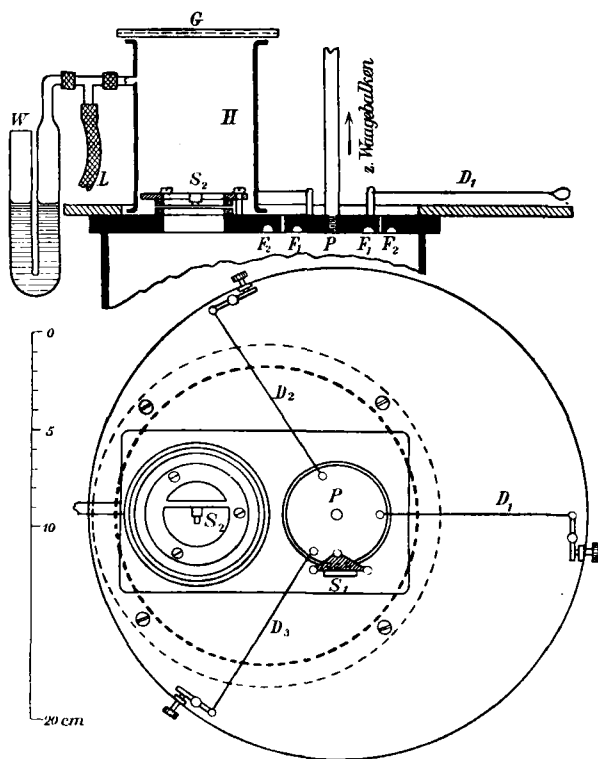


Fig. 3.

4. Das Wiensche Vibrationsmanometer bestand aus einer Grammophonglasmembran (Durchmesser 4 cm, Dicke 0,24 mm), deren Eigenschwingung sehr viel höher lag als die zu messende Schallschwingung; die Membran wurde zwischen zwei Gummiringe auf die Öffnung im Boden des Resonanzrohres (Fig. 3) gepreßt. Der kleine Planspiegel S_2 (2×2 mm), war an einem geknickten Papierstreifen geklebt, dessen eines Ende auf die Mitte der Membran und das andere auf einen Querbalken befestigt waren. Über die Membran war eine Metallhülle H mit Glaswand G angebracht, welche mit einem Wassermanometer W und einem Gummischlauch L in Verbindung stand: um das Vibrationsmanometer auf konstante Druckdifferenzen zu eichen,

wurde durch Komprimieren oder Saugen mit dem Munde die erforderliche Druckdifferenz in der Hülle hergestellt und am Wassermanometer W abgelesen. Zur Beobachtung diente ein Fernrohr mit Okularmikrometer, welches auf den Faden einer Glühlampe eingestellt wurde; um die Ablesung bei horizontaler Rohrstellung machen zu können, wurde ein Hilfsspiegel (in der Fig. 3 nicht eingezeichnet) aufgestellt: die Fernrohre für das Vibrationsmanometer und für den Druckapparat standen nebeneinander, um die Ablesungen rasch nacheinander machen zu können.

II. Die Energie einer stehenden Schallschwingung.

Ist eine stehende Schallschwingung gegeben, und bedeutet V_m die Maximalgeschwindigkeit der Luftteilchen im Schwingungsbauche, wo die gesamte Energie in Form der kinetischen auftritt, so ist die mittlere quadratische Geschwindigkeit V_0

$$V_0 = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

und die Energie pro Volumeinheit, d. h. die Energiedichte E , wenn ρ die Dichte des Gases ist, durch die Beziehung gegeben

$$E = \frac{\rho V_0^2}{2} = \frac{\rho V_m^2}{4}.$$

Lord Rayleigh (l. c. p. 366) hat bei der Untersuchung der Einwirkung einer solchen stehenden Schwingung auf eine reflektierende Wand gefunden, daß auf diese Wand pro Flächeneinheit eine Kraft L ausgeübt wird, welche man als Druckkraft der Schallwellen bezeichnet; sie ist der Energiedichte E direkt proportional und hängt von dem Verhältnis γ der spezifischen Wärmen des Gases ab. Es ist

$$E = \frac{2L}{\gamma + 1}.$$

Bei dem oben beschriebenen Druckapparat wird der Druck in Gravitationseinheiten g g pro qcm gemessen. Setzen wir die Erdbeschleunigung $g = 981 \text{ cm sec}^{-2}$ und $\gamma = 1,41$, so ist

$$(1) \quad E = \frac{2g \cdot g}{\gamma + 1} = 814 g \text{ Ergs pro ccm.}$$

Außer dem konstanten Überdrucke treten an der reflektierenden Wand noch periodische Druckschwankungen auf; das

Verhältnis der maximalen Druckschwankung p zum Atmosphärendruck P ist im Falle einer einfachen Sinusschwingung nach Toepler und Boltzmann (l. c. p. 343 und 344)

$$\frac{p}{P} = \frac{4 \pi A}{c \cdot T} \cdot \gamma,$$

worin A die Amplitude der Luftschwingung im Knoten der stehenden Welle, T die Schwingungsdauer und c die Schallgeschwindigkeit bedeuten.

Berücksichtigen wir, daß hieraus

$$V_m = \frac{2 \pi A}{T} = \frac{c p}{2 \cdot \gamma \cdot P}$$

und daß

$$c^2 = \frac{\gamma P}{\varrho},$$

so wird unabhängig von der Tonhöhe

$$E = \frac{p^2}{16 \cdot \gamma \cdot P}.$$

Bei den Versuchen wird die Maximalschwankung des Druckes h in Zentimetern der Wassersäule im Manometer gemessen und der Barometerstand B in Zentimetern Quecksilber (dessen Dichte hinreichend genau $\delta = 13,6$ gesetzt werden kann). Es ist dann

$$(2) \quad E = \frac{g \cdot h^2}{16 \cdot \gamma \cdot \delta \cdot B} = 3,20 \cdot \frac{h^2}{B} \text{ Ergs pro ccm.}$$

III. Die Vorversuche.

Die Konstanz der Schallintensität war bei den nachfolgenden Versuchen die Hauptbedingung; in dieser Beziehung hat sich der oben beschriebene synchronisierte Turbinenunterbrecher sehr viel besser bewährt als ein gewöhnlicher Platinkontakt, aber dennoch traten kleine unregelmäßige Intensitätsschwankungen ein, welchen das Wiensche Vibrationsmanometer sofort, der Druckapparat hingegen nur langsam folgte: dieses verschiedene Verhalten der Einstellungen beider Meßinstrumente wird von einer entsprechenden Unsicherheit in der Messung begleitet.

Der Erregerstrom der Stimmgabel konnte nicht über eine gewisse Stärke gesteigert werden, da bei sehr großen Amplituden die Tonhöhe der Stimmgabel sich merklich und rasch

mit der Erregerstromstärke verändert, eine Erscheinung, die bei schwingenden Stahllamellen von Kempf-Hartmann¹⁾ eingehend untersucht wurde.

Was die Messungen mit dem Druckapparat betrifft, so sei bemerkt, daß die Empfindlichkeit des Apparates im Laufe der Zeit sich durch Spannungsänderungen der Richtdrähte ($D_1 D_2 D_3$, Fig. 3) etwas ändert und bei jeder Messung deshalb neu bestimmt werden muß. Die Absperrung des Schlitzes durch leichtflüssiges Maschinenöl ist eine wesentliche Bedingung für die richtigen Angaben des Apparates: ist der Schlitz offen, so kann sich der Überdruck teilweise durch den kurzen Schlitz ausgleichen und die Messungen wesentlich beeinträchtigen.

Es hat bereits früher Dvořák²⁾ gezeigt, daß man durch Wassermanometer den Überdruck im Knoten einer stehenden Schallschwingung nachweisen kann; es wurden deshalb auch zahlreiche Versuche gemacht, die auftretenden Druckkräfte mit einer Toeplerschen Libelle³⁾ zu messen. Diese Versuche führten zu dem unerwarteten Ergebnisse, daß die Größe der Flüssigkeitsverschiebung wesentlich von der Beschaffenheit der Ränder und von Änderungen des Querschnittes des Zuleitungsrohres abhängen: durch diese Nebenumstände konnte nicht nur die Größe des gemessenen Überdruckes in weiten Grenzen, sondern selbst sein Vorzeichen verändert werden. Diese Beobachtungen lehren, daß man die Überdrucke in schwingenden Luftsäulen nicht durch einfache Flüssigkeitsmanometer messen kann.

Bei den Messungen mit dem Wienschen Vibrationsmanometer war darauf zu achten, daß die Abbildung des Glühlampenfadens auf dem Okularmikrometer durch Diffraction an dem kleinen Spiegel nicht scharf, sondern auf ein Teilintervall verwaschen erscheint; bei den Messungen wurde deshalb die beobachtete Verbreiterung, welche die Schwingungsamplitude der Membran mißt, um einen Teilintervall vermindert.

Durch besondere Versuche wurde die Rückwirkung der Hülle H (Fig. 3) auf die Angaben des Vibrationsmanometers

1) R. Kempf-Hartmann, Ann. d. Phys. 13. p. 124. 1904.

2) V. Dvořák, Pogg. Ann. 157. p. 42. 1876.

3) A. Toepler, Wied. Ann. 56. p. 609. 1895.

untersucht: die Glasplatte G wurde abwechselnd entfernt und wieder auf die Hülle H gekittet — eine meßbare Änderung der Angaben des Vibrationsmanometers ließ sich jedoch nicht nachweisen.

IV. Absolute Messungen.

Bei den weiter folgenden absoluten Messungen wurde aus den rasch nacheinander folgenden Ablesungen sowohl des Wienschen Vibrationsmanometers als auch des Druckapparates und deren sofortiger Eichung die Energiedichte der im Resonanzrohr schwingenden Luftsäule berechnet und diese Größen miteinander verglichen.

Als Beispiel einer Messung möge hier das Protokoll einer Beobachtung angeführt werden.

A. Druckbeobachtungen.

Durchmesser des Stempels 5,0 cm.

Ablenkung bei Überlastung mit 0,01 g 28,5 Skt.

Ablenkung durch die Druckkraft der Schallwellen 30,2 Skt.

Es berechnet sich hieraus die Druckkraft der Schallwellen q

$$q = 0,00054 \text{ g pro qcm,}$$

und die Energiedichte E der stehenden Schallschwingung nach (1)

$$E_1 = 0,439 \text{ Ergs pro ccm.}$$

B. Vibrationsmanometer.

Die Empfindlichkeit des Manometers beträgt 20 Skt. des Okularmikrometers für 3,42 cm Wasserdruck.

Barometerstand $B = 73,4$ cm.

Verbreiterung des Lichtstreifens durch Schallschwingungen 18,5 Skt. des Okularmikrometers.

Hieraus berechnet sich die maximale Druckschwankung an der Manometermembran

$$h = 3,17 \text{ cm Wasser.}$$

Und daraus folgt nach (2)

$$E_2 = 0,436 \text{ Ergs pro ccm.}$$

Im folgenden ist aus den zahlreichen Serien unabhängiger Beobachtungen eine angeführt, um den Grad der Übereinstimmung beurteilen zu können.

Druckapparat E_1	Vibrations- manometer E_2	Verhältnis E_1 / E_2
0,447	0,486	1,08
0,499	0,510	0,98
0,484	0,510	0,95
0,470	0,484	0,97
0,448	0,460	0,97
0,473	0,484	0,98
0,455	0,460	0,99
0,439	0,436	1,01

Die übrigen Serien ergeben auch für verschiedene Intensitäten analoge Übereinstimmung sowohl bei dem kurzen ($\lambda/4$) als auch bei dem langen ($3\lambda/4$) Resonanzrohre. Durchschnittlich sind die Angaben des Druckapparates um ca. 2 Proz. kleiner als die des Vibrationsmanometers; diese Differenz läßt sich durch kleine systematische Ablesungsfehler bei den Messungen leicht erklären.

Das Ergebnis der Untersuchung kann in folgender Weise zusammengefaßt werden: die Druckkräfte der Schallwellen und die Druckschwankungen an einer reflektierenden Wand ergeben bei absoluten Schallintensitätsmessungen innerhalb 2 Proz. übereinstimmende Resultate.

Zum Schluß erlaube ich mir Hrn. Prof. Dr. P. Lebedew, auf dessen Anregung und unter dessen Leitung die Untersuchung ausgeführt wurde, sowie Hrn. Prof. Dr. A. Sokolow für die Apparate, welche er mir zur Verfügung stellte, meinen Dank auszusprechen.

Moskau, Physik. Inst. d. Univ., im Juli 1906.

(Eingegangen 21. Juli 1906.)