

10. *Über die Schallgeschwindigkeit in sehr engen Röhren*¹⁾; von F. A. Schulze.

Die von Kundt²⁾ zuerst experimentell nachgewiesene, von H. v. Helmholtz³⁾ und G. Kirchhoff⁴⁾ theoretisch behandelte Erscheinung, daß die Schallgeschwindigkeit in Röhren kleiner ist als in freier Luft, ist mehrfach Gegenstand der Untersuchung gewesen.

Kirchhoff hat als Schallgeschwindigkeit v in Röhren den Wert angegeben

$$v = V \left(1 - \frac{\gamma}{d\sqrt{\pi n}} \right),$$

wobei V die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in freier Luft, d den Durchmesser der Röhre, n die Schwingungszahl des Tones bedeutet; γ ist gleich

$$\sqrt{\mu} + \left(\frac{a}{b} - \frac{b}{a} \right) \sqrt{\nu},$$

wobei

$$\mu = \frac{\text{Reibungskonstante}}{\text{Dichte}}, \quad \nu = \frac{\text{Wärmeleitfähigkeit}}{\text{Dichte} \times \text{spez. Wärme bei konst. Vol.}}$$

a der wahre, b der Newtonsche Wert der Schallgeschwindigkeit ist.

Alle bisherigen Untersuchungen über diesen Gegenstand laufen im wesentlichen auf eine Prüfung dieser Formel hinaus. Es seien hier nur die Arbeiten von Kundt⁵⁾, A. Seebeck⁶⁾, Schneebeli⁷⁾, Kayser⁸⁾, Low⁹⁾, Stevens¹⁰⁾ und J. Müller¹¹⁾

1) Der wesentliche Inhalt bereits veröffentlicht in den Sitzungsber. d. Marburger Naturwissensch. Gesellsch. p. 59. 1903.

2) A. Kundt, Pogg. Ann. **135**. p. 337 u. 527. 1868.

3) H. v. Helmholtz, Wissensch. Abhandl. **1**. p. 338. 1882.

4) G. Kirchhoff, Pogg. Ann. **134**. p. 77. 1868.

5) A. Kundt, l. c.

6) A. Seebeck, Pogg. Ann. **139**. p. 104. 1870.

7) H. Schneebeli, Pogg. Ann. **136**. p. 296. 1869.

8) H. Kayser, Wied. Ann. **2**. p. 218. 1877.

9) J. W. Low, Wied. Ann. **52**. p. 641. 1894.

10) H. Stevens, Ann. d. Phys. **7**. p. 285. 1902.

11) J. Müller, Ann. d. Phys. **11**. p. 331. 1903.

erwähnt. Alle diese Arbeiten benutzen nun entweder zwar enge Röhren, aber hohe Töne, oder tiefere Töne, aber verhältnismäßig weite Röhren, so daß die Änderung der Schallgeschwindigkeit immer nur gering sein konnte, und etwaige Beobachtungsfehler großen Einfluß hatten. Die genannte Formel läßt jedoch sehr bedeutende Verringerungen der Schallgeschwindigkeit voraussehen, falls *tiefe Töne* durch *enge Röhren* gehen; so müßte z. B., wenn man für γ bei trockener Luft von Zimmertemperatur den theoretischen Wert, ca. 0,006 (Meter und Sekunde als Einheiten), einführt, die Schallgeschwindigkeit für einen Ton von 200 Schwingungen in einer Röhre von 1 mm Durchmesser schon um 24 Proz. geringer sein als in freier Luft.

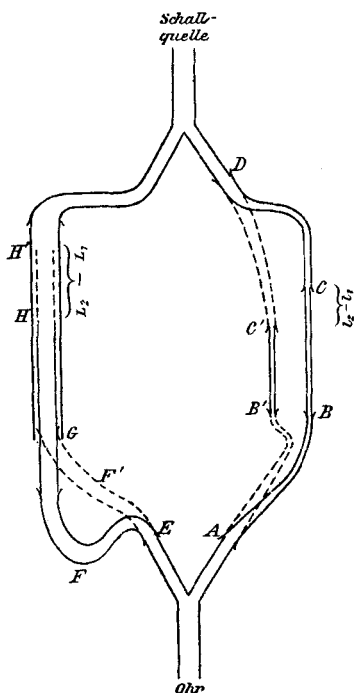
Nun haben alle Beobachter übereinstimmend für γ Werte gefunden, die größer als der theoretische sind; übrigens gibt G. Kirchhoff selbst diesen sogenannten „theoretischen“ Wert nur als untere Grenze an, da er in ihm die Wärmestrahlung nicht berücksichtigt.

Nach J. Müller hat γ in Wirklichkeit überhaupt keinen bestimmten Wert; bei seinen Versuchen schwankte γ zwischen 0,00314 und 0,01663; bei Einsetzung dieses letzteren Wertes von γ würde sich in obigem Beispiel, $n = 200$, $d = 1$ mm, eine Verminderung der Schallgeschwindigkeit um bereits 66 Proz. ergeben. Bei einem Durchmesser von 0,66 mm würde die Schallgeschwindigkeit der Formel nach bereits auf Null gesunken sein. Diese enorme Verringerung der Schallgeschwindigkeit erscheint wenig wahrscheinlich, so daß es von Interesse schien, die Schallgeschwindigkeit wirklich einmal bei tiefen Tönen und sehr engen Röhren zu messen.

Die sehr hohen Werte, die gelegentlich für γ gefunden sind, sind vielleicht zum Teil auf die Anwendung der Kundtschen Staubfiguren zurückzuführen, bei denen also die Röhre Pulver enthält, dessen Anwesenheit allein die Schallgeschwindigkeit schon vermindert.

Daß man die Kirchhoffsche Formel nur bei nicht sehr großen Verringerungen der Schallgeschwindigkeit anwenden darf, ergibt sich übrigens schon daraus, daß der Einfluß der Wärmeleitung und Wärmestrahlung die Schallgeschwindigkeit höchstens bis auf den Newtonschen Wert herunterdrücken könnte.

Bei Anwendung enger Röhren und tiefer Töne war die Messung von V durch Kundtsche Staubfiguren aus nahe-
liegenden Gründen nicht möglich. Es wurde hier das Quincke-
sche¹⁾ Interferenzrohr benutzt, bei dem der in ein Rohr ein-
tretende Schall sich in zwei Röhren verzweigt, getrennte Wege
durchläuft, um dann wieder zusammengeführt zu werden.
Treffen an der Vereinigungsstelle Verdünnung und Verdichtung



zusammen, so tritt durch Inter-
ferenz Aufhebung des Schalles
ein; der Unterschied der Weg-
längen beträgt dann ein un-
gerades Vielfaches einer halben
Wellenlänge.

Nun war jedoch im vor-
liegenden Fall, wo die Röhren
sehr eng sein sollten, die ge-
wöhnliche Form der Quincke-
schen Interferenzröhre, bei der
die Verlängerung des einen Weges
durch ein posaunenartig ver-
schiebbares Stück geschieht,
nicht möglich, da die ineinander
verschiebbaren Röhren dann
schon erheblich prozentisch ver-
schiedene innere Weite gehabt
hätten. Außerdem wäre es auch
hier bei der großen Wellenlänge
tiefer Töne nicht gut möglich
gewesen, den ganzen Apparat

aus den zu untersuchenden engen Röhren anzufertigen, schon
weil, abgesehen von der Schwierigkeit der Herstellung, die
Intensitätsverminderung durch Reibung zu groß gewesen wäre.
Es wurde daher so vorgegangen:

Der eine Zweig der Quinckeschen Röhre (vgl. Figur) be-
stand aus zwei *weiten*, mit sanfter Reibung ineinander ver-
schiebbaren, je ca. 1,5 m langen Glasröhren; in den anderen
Zweig wurde vermitteltst entsprechend sich verjüngenden Glas-

1) G. Quincke, Pogg. Ann. 128. p. 177. 1866.

röhren und kurzen engen Schlauchstücken ein nicht zu langes Stück BC der zu untersuchenden Röhre von der Länge l_1 eingesetzt. Die Länge des ersten Zweiges, EH , wurde dann so reguliert, daß an der Austrittsstelle des Schalles völliges Auslöschen des Tones stattfand; es sei $EH = L_1$.

Man darf nun jedenfalls nicht annehmen, daß die beiden Zweige sich um ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge des hineingeschickten Tones unterscheiden, da in dem Zweige, der die Verjüngungen enthält, an diesen Verzerrungen der Schallwelle, Reflexionen etc., überhaupt im einzelnen schwer kontrollierbare Unregelmäßigkeiten eintreten, die im wesentlichen bewirken werden, daß erst in gewisser Entfernung von den Verjüngungsstellen die Schallbewegung im engen Rohr regulär verläuft. l_1 sei so groß, daß in einem endlichen Teil der engen Röhre die Schallbewegung regelmäßig, als ebene Welle vor sich geht. Es wurde nun an Stelle des Stückes BC von der Länge l_1 in dem Zweige, der die enge Röhre enthält, ein Stück $B'C'$ des gleichen Rohres von der Länge l_2 eingesetzt. Um jetzt wieder Tonminimum zu erhalten, mußte dem anderen Zweig, der die weiten Röhren enthielt, durch Verschieben der einen der beiden ineinander verschiebbaren Röhren eine andere Länge $EF'GH' = L_2$ gegeben werden. An der Vereinigungsstelle kamen die Töne aus den beiden Zweigen mit sehr verschiedener Intensität an, da in der weiten Röhre der Ton sehr wenig, in der engen aber sehr stark durch Reibung geschwächt war. Um also zur Erzielung eines guten Tonminimums die Intensität beider Schallwellen annähernd gleich groß zu machen, mußte auch in dem die weite Röhre enthaltenden Zweig ein Stück von der engen Röhre eingefügt werden, das aber dann natürlich bei der ganzen Versuchsreihe auf konstanter Länge belassen wurde.

Die Schallgeschwindigkeit in der engen Röhre sei v , in der weiten V ; man sieht sofort, daß die Beziehung besteht

$$\frac{v}{V} = \frac{l_2 - l_1}{L_2 - L_1}.$$

Hat die weite Röhre so großen Durchmesser, daß man die Schallgeschwindigkeit V in ihr gleich der Schallgeschwindigkeit V_0 in freier Luft setzen kann, so ist

$$v = V_0 \frac{l_2 - l_1}{L_2 - L_1}.$$

Man hat bei diesem Differenzverfahren den Vorteil, daß man von den engen Röhren nur verhältnismäßig kurze Stücke braucht, also der Ton nicht durch Reibung zu sehr geschwächt wird. Außerdem ist es ja überhaupt schon schwer, lange enge Röhren von einigermaßen überall gleichem Durchmesser zu finden. Die Messungen sind einfach und ziemlich genau, sobald nur die Tonintensität nicht zu gering ist. Benutzt man Stimmgabeltöne, so ist es besonders vorteilhaft, mit dem beobachtenden Ohr in einen Druckknoten der stehenden Welle zu gehen, die sich im Zimmer durch Reflexion an den Wänden ausbildet. Das Ohr erhält dann nur Erregung von dem aus dem Apparat austretenden Ton, und die Messung ist dann sehr genau möglich.

Prinzipiell hätte man mit einer analogen, leicht zu übersehenden Modifikation auch die andere von Quincke angegebene Form der Röhren zur Bestimmung der Wellenlänge benutzen können, bei der man an einem seitlichen Ansatz des einerseits durch einen verschiebbaren Stempel verschlossenen Rohres die Tonintensität abhört; doch hat sich für den vorliegenden Zweck die erstere Form besser bewährt.

Zu den Versuchen wurden Röhren aus Glas, Kautschuk und Messing benutzt, die mit trockener, kohlensäurefreier Luft von Zimmertemperatur gefüllt waren. Als Tonquellen dienten Stimmgabeln und Zinnpfeifen. Über die Genauigkeit der Resultate kann keine bestimmte Angabe gemacht werden, da die Schärfe der Einstellung auf das Tonminimum sehr wesentlich von der jeweiligen zufälligen Disposition abhing. Jedenfalls ist die Einstellung auf Tonminimum bei sehr hohen Tönen, zu deren Schwingungszahlbestimmung ich ¹⁾ früher ebenfalls die Quinckesche Interferenzröhre benutzt habe, unvergleichlich viel schärfer und weniger anstrengend als bei tiefen Tönen, wo sich das Minimum bei einmaligem Versuch nur schwer auf Millimeter, geschweige denn auf Bruchteile von Millimetern genau einstellen läßt. Man tut bei tiefen Tönen am besten, die Stellen des beginnenden Wiederanschwellens des Tones zu beiden Seiten des Minimums aufzusuchen und dann das Mittel daraus als richtige Lage anzunehmen.

1) F. A. Schulze, Wied. Ann. 68. p. 99. 1898.

der flüssigen Luft messen wollte, wo es nicht gut anginge, die ganze Quinckesche Interferenzröhre in flüssige Luft zu bringen.

Von besonderem Interesse würde es sein, die Verminderung der Schallgeschwindigkeit in Röhren für Wasserstoff zu messen, weil hier der bestimmende Faktor γ wegen der großen Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs einen besonders großen theoretischen Wert hat. Es berechnet sich für Wasserstoff bei 0°

$$\gamma = 0,015 \text{ m sec}^{-1/2} \text{ (gegen } \gamma = 0,006 \text{ für Luft),}$$

so daß sich hier die Theorie noch besser prüfen lassen würde, da man auch bei weiteren Röhren hier schon erhebliche Verminderungen der Schallgeschwindigkeit erhält.

Marburg a. L., Physikal. Institut der Universität.

(Eingegangen 22. Januar 1904.)