Fachrichtungen der Physik

UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Physikalisches Grundpraktikum

Akustik

WWW-Adresse Grundpraktikum Physik: http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/

Kontaktadressen der Praktikumsleiter:

Dr. Manfred Deicher
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6
e-mail: manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de
Telefon: 0681/302-58198

Dr. Patrick Huber
Zimmer: 3.23, Gebäude E2.6
e-mail: p.huber@physik.uni-saarland.de
Telefon: 0681/302-3944

1. Stoffgebiet

- Transversale, longitudinale, stehende Wellen
- Interferenz
- Reflexionsgesetze
- Schallausbreitung in Gasen und Festkörpern
- Schallmessgrößen
- Eigenschwingungen von Stäben
- Elastizitätsmodul
- Ideale und reale Gase
- Adiabatische Zustandsänderungen
- Akustische Messungen

2. Literatur

- D. Meschede, *Gerthsen Physik*
  23. Auflage (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006)
  Kap. 4.5

3. Fragen

1. Geben Sie eine Definition einer Schwingung und einer Welle.

2. Zeichnen Sie die Phasendifferenz zwischen äußerer Erregung und Schwingung bei der erzwungenen Schwingung und den Amplitudenverlauf der Schwingung bei Frequenzen in der Umgebung der Resonanzfrequenz.

3. Was versteht man unter dem Polarisationszustand einer Welle?

4. Geben Sie die Gleichung für den Dopplereffekt bei kleiner Geschwindigkeit der Quelle an.

5. Geben Sie die Definition der folgenden Größen: (Maximal-) Amplitude, Frequenz und Wellenlänge einer Welle.

6. Geben Sie die Definition der folgenden Größen: (Momentan-) Phase einer Welle und Phasendifferenz zweier Wellen am Beispiel von ebenen Sinus-Wellen.

7. Was ist ein adiabatischer Vorgang und warum ist die Schallausbreitung in Gasen ein adiabatischer Vorgang?

8. Wann erfolgt die Reflexion einer Welle mit und wann ohne Phasensprung?

9. Was versteht man unter der Schallstärke (Schallintensität) einer Schallwelle und in welchen Einheiten misst man sie? Wie hängt die Lautstärke mit der Schallstärke zusammen und in welchen Einheiten misst man sie?

10. Wie nimmt die Schallstärke mit dem Abstand von der Schallquelle ab, wenn diese Kugelwellen aussendet (isotrope Quelle)? Wie nimmt die Schallstärke einer ebenen Schallwelle mit dem Weg in einem absorbierenden Medium ab?

4. Grundlagen

Es gibt Wellen, die an materielle Medien gebunden sind (z.B. elastische Wellen, Schallwellen), und Wellen, die sich sowohl in materiellen Medien, als auch ohne sie ausbreiten können (z.B. elektromagnetische Wellen). Wir wollen im folgenden eindimensionale Wellen untersuchen, die an ein materielles Medium gebunden sind. Als Welle bezeichnet man die räumliche Ausbreitung eines Schwingungszustandes in einem System vieler untereinander gekoppelter schwingungsfähiger Gebilde.

Eine ebene, ungedämpfte Welle, die sich in einer Richtung ausbreitet (eindimensionale Welle), beschreibt in differentieller Form die Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{1}$$

Dabei bedeuten: ξ: Amplitude der Verschiebung,
t: Zeit,
x: Abstand vom willkürlich gewählten Anfangspunkt,
c: Geschwindigkeit, mit der die Verschiebung wandert.

Eine allgemeine Lösung dieser partiellen Differentialgleichung ist die Funktion

$$\xi = A\,f(x+ct) + B\,f(x-ct) \tag{2}$$

wobei f eine zweimal nach x und t differenzierbare Funktion ist. Die Welle kann longitudinal oder transversal sein. Im longitudinalen Fall erfolgt die Auslenkung in Ausbreitungsrichtung, bei der transversalen Welle senkrecht dazu. Der einfachste Spezialfall der ebenen Welle ist die harmonische Welle:

$$\begin{aligned} &\xi = A\sin[k(x+ct)] \\ &\xi = A\sin[k(x-ct)] \\ &k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (Wellenzahl)} \end{aligned} \tag{3}$$

Das negative bzw. positive Vorzeichen steht bei Ausbreitung in positive bzw. negative x-Richtung. Im folgenden soll o.B.d.A. das negative Vorzeichen gelten. Andere Schreibweisen sind:

$$\xi = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi\nu \tag{4}$$

oder

$$\xi = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{mit Schwingungsdauer} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu} \tag{5}$$

Dabei ist ν die Frequenz und λ die Wellenlänge der Welle. Jede beliebige Welle kann nach dem Theorem von Fourier durch eine Summe von Sinus-Wellen beschrieben werden (Fourieranalyse). An einem festen Ort $x = x_0$ kann die Gleichung (4) als Gleichung einer Schwingung angesehen werden, deren Phasenkonstante $\varphi_0 = -\omega x_0 / c$ ist. An einem benachbarten Ort ist die Phasenkonstante eine andere, und man kann nun den Nachbarort x_1 suchen, an dem die

Phasenkonstante sich um 2π von φ_0 unterscheidet, d.h. sich der Sinus reproduziert. Dort erfolgt dann die Schwingung wieder in gleicher Phase wie am Ort x_0. Setzen wir also

$$\frac{2\pi\nu}{c}x_1 - \frac{2\pi\nu}{c}x_0 = 2\pi$$

dann erhalten wir $x_1 - x_0 = c/\nu$ und diese charakteristische Länge $x_1 - x_0$ bezeichnet man als Wellenlänge λ. Es gilt die als Dispersionsrelation bezeichnete Beziehung:

$$\lambda\nu = c \text{ oder } \frac{\omega}{k} = c \text{ mit } k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{6}$$

Zwei um λ voneinander entfernte Orte der ungedämpften Welle haben zu allen Zeiten gleiche Schwingungszustände. λ beschreibt also die Periodizität der räumlichen Ausbreitung, wie die Schwingungsdauer T die zeitliche Periodizität beschreibt.

4.1 Die stehende Welle

Für alle Wellen gilt das Reflexionsgesetz und das Superpositionsgesetz. Beide Gesetze sollen nun an einem Beispiel angewendet werden, um den Begriff der stehenden Welle einzuführen. Vor einer Wand werde eine ebene Welle erzeugt. Diese läuft gegen die Wand, wird dort reflektiert, läuft zurück und überlagert dabei die hinlaufende Welle. Die aus der Überlagerung dieser Wellenzüge resultierende Welle kann man mit Hilfe des Superpositionsgesetzes zeichnerisch oder rechnerisch konstruieren. Die resultierende Welle zweier entgegengesetzt laufender Wellen

$$\begin{aligned} \xi_1 &= A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \\ \xi_2 &= A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) \end{aligned} \tag{7}$$

kann mit Hilfe des Additionstheorems

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)$$

berechnet werden:

$$\xi_{res.} = 2A\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \tag{8}$$

Gl. (8) kann man auch schreiben als

$$\xi_{res.} = A^* \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \text{mit} \quad A^* = 2A\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

Dies stellt die Gleichung einer Schwingung mit räumlich variierender Amplitude A^* dar.

Es treten also ortsfeste Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche auf. Diejenigen Stellen, an denen sich die Verschiebungen durch Superpositionen wegheben (Knoten), liegen räumlich fest, und dort ist die resultierende Amplitude stets Null. An den Orten der Bäuche addieren sich dagegen die Verschiebungen so, dass die resultierende Amplitude A^* dort stets maximal ist. Wegen der festen Lage der Knoten und Bäuche nennt man die Gl. (8) eine stehende Welle. Amplitudenmaxima und -minima folgen im Abstand $\lambda/4$ aufeinander. Eigentlich ist die stehende Welle keine Welle, wie wir sie zuvor kennengelernt haben, da sich die Momentanamplituden nicht mehr räumlich ausbreiten. Sie stellt vielmehr eine Vielzahl von Schwingungen dar, deren Maximalamplituden sich räumlich periodisch ändern.

4.2 Schallwellen

Wegen der elastischen Eigenschaften von Materie können sich in ihr periodische Auslenkungen von Atomen oder Molekülen als elastische Wellen räumlich ausbreiten. Sind die Wellenlängen groß gegen die mittleren Atomabstände, so nennt man die elastischen Wellen „Schallwellen". Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen sind sie also an Materie gebunden, und ihre Eigenschaften werden durch die elastischen Materialkonstanten (E-Modul, Kompressibilität), sowie Druck und Dichte bestimmt. In Gasen und Flüssigkeiten existieren nur longitudinale Schallwellen, in Festkörpern auch transversale. Longitudinale und transversale Schallwellen haben im allgemeinen verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Schallwellen im Hörbereich ist praktisch unabhängig von der Wellenlänge, wenn die Schallintensität nicht zu groß wird.

Für die longitudinale Welle im Festkörper gilt:

$$c_{long} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad E\text{: Elastizitätsmodul}, \rho\text{: Dichte} \tag{9}$$

Für die transversale Welle im Festkörper gilt:

$$c_{trans} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad G\text{: Torsionsmodul} \tag{9b}$$

Für die longitudinale Welle in Gasen und Flüssigkeiten gilt:

$$c_{long} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_p}{c_V}\frac{p}{\rho}} \qquad K\text{: Kompressionsmodul} \tag{9c}$$

In Gasen ist K gegeben durch

$$K = p\frac{c_p}{c_V} \tag{10}$$

p: Druck, c_p, c_V: Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck bzw. Volumen

K ist der adiabatische Wert, da die bei den lokalen Kompressionen und Verdünnungen auftretende Temperaturänderung während der Schallausbreitung in Gasen berücksichtigt werden muss, und diese Änderungen so rasch erfolgen, dass sie adiabatisch sind. Aus der Temperaturabhängigkeit von p und ρ folgt in der Näherung des idealen Gases die Temperaturabhängigkeit von c:

$$c = c_0\sqrt{1+\alpha T} \tag{11}$$

α: kubischer Ausdehnungskoeffizient des Gases,

T: Temperatur in °C,
c_0: Geschwindigkeit bei 0 °C.

Die Schallgeschwindigkeit c kann auf verschiedene Arten gemessen werden:

1) Dopplereffekt,
2) Laufzeitmessungen,
3) Resonanzversuche, wobei die Parameter λ und ν zu bestimmen sind. Am einfachsten lassen sich in der Akustik Resonanzversuche durchführen. Auch mit Schallwellen kann man stehende Wellen an einer reflektierenden Wand erzeugen. Läuft die Welle statt dessen in ein an einem Ende geschlossenes Rohr, so bilden sich in dem Gasvolumen ebenfalls stehende Wellen, allerdings nur, wenn die Länge des Rohres ein ungerades Vielfaches der Viertel-Wellenlänge beträgt. Dann liegt ein Schwingungsknoten am geschlossenen und ein Bauch am offenen Rohrende. In diesem Fall koppelt die stehende Welle optimal an die Schallwelle außerhalb des Rohres an, d.h. sie wird stets im richtigen Takt überlagert, und die Amplitude würde ins Unendliche wachsen, wenn sie nicht durch Dämpfungsprozesse begrenzt wäre. Wenn sich eine stehende Welle bildet, tritt also Resonanz auf.

Die Bedingung für die stehende Welle im *einseitig* geschlossenen Rohr lautet:

$$l = (2n+1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{mit} \quad l:\text{Rohrlänge},\ n = 0,1,2,... \tag{12}$$

Der Abstand zwischen benachbarten Bäuchen ist gleich der halben Wellenlänge. Die stehende Welle (Abb. 1) kann man als Eigenschwingung der ganzen Luftsäule im Rohr ansehen. Die Eigenschwingung für n = 0 nennt man auch die Grundschwingung; n = 1,2,3... bezeichnen die 1., 2., 3., ... Oberschwingung.

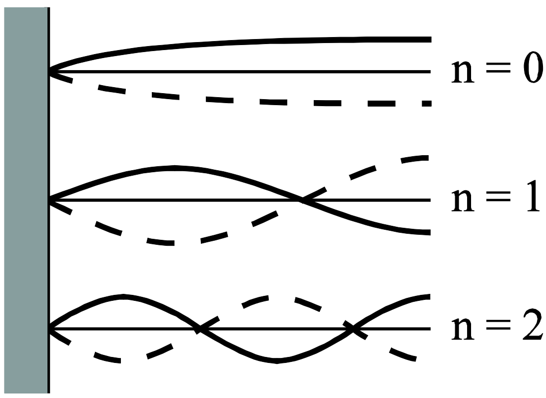

Abb. 1: Stehende Welle im einseitig geschlossenen Rohr.

Im beiderseitig abgeschlossenen Rohr können stehende Wellen und damit Resonanzen entstehen, wenn an beiden Enden Schwingungsknoten liegen. Die entsprechende Bedingung lautet dann:

$$l = (n+1)\frac{\lambda}{2} \tag{13}$$

Dieselbe Bedingung, Gl. (13), gilt für stehende Wellen in einem festen Stab; dort allerdings stellen die Enden keine feste Begrenzung dar, die Amplitudenknoten bedingen. Vielmehr liegen dort im Resonanzfall Amplitudenbäuche.

5. Versuch Kundtsches Rohr

Im Kundtschen Rohr (Abb. 2), einem an einem Ende abgeschlossenen, gasgefüllten Glasrohr, in dem sich feiner Korkstaub befindet, kann man stehende Schallwellen erzeugen und sichtbar machen. Als Schallquelle dient dabei ein mit einem Lappen geriebener Stab. Dabei entstehen longitudinale Schallwellen, die längs des Stabes laufen und an seinen Enden reflektiert werden. Durch Resonanz werden diejenigen Wellen verstärkt, die der Gl. (13) genügen. Je nach Zahl und Lage der Halterungen des Stabes (an den Halterungen liegen stets Schwingungsknoten) kann man die Grundschwingung oder Oberschwingungen des Stabes anregen. Ihre Wellenlänge λ_{Stab} ist aus der Länge des Stabes und der Zahl der Halterungen mit Gl. (13) direkt bestimmbar. Die Schwingungen des Stabes werden nun auf die Gassäule des Kundtschen Rohres übertragen. An der Grenze Stab-Gas ändert sich die Frequenz der Schallquelle nicht, jedoch ändert sich wegen der verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Stab und im Gas die Wellenlänge:

$$\text{Stab:} \quad c_{Stab} = \lambda_{Stab}\nu \qquad \text{Gas:} \quad c_{Stab} = \lambda_{Gas}\nu \tag{14}$$

Das Kundtsche Rohr gestattet eine einfache Messung von λ_{Gas} durch Sichtbarmachung der stehenden Schallwelle im Rohr.

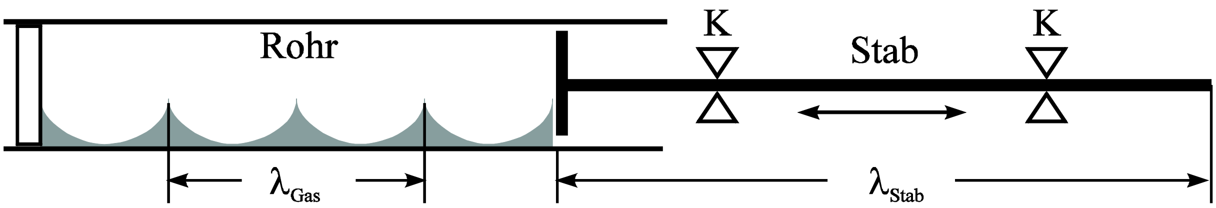

Abb. 2: Kundtsches Rohr.

Das waagerecht liegende Rohr wird so um seine Längsachse gedreht, dass ein Teil der Partikel des Korkmehls an der schrägen Glaswand liegt und durch die Haftreibung gerade noch gehindert wird, von selbst abzurutschen. Wird nun eine stehende Welle erzeugt, so wird nach Maßgabe der Schwingungsamplituden der Gasmoleküle Impuls auf die Korkpartikel übertragen. Diese gleiten von der schrägen Wand ab, wo die Schwingungsamplituden groß sind, bleiben jedoch an den Stellen haften, wo Schwingungsknoten liegen, so dass trotz der geringen Schwingunsamplitude der Gasmoleküle (von der Größenordnung der Gasmoleküle selbst!) die stehende Welle sichtbar wird und ihre Wellenlänge λ_{Gas} direkt ausgemessen werden kann. Man kann also die Schallgeschwindigkeit in einem Gas und daraus nach Gl. (9c) den Adiabatenexponenten dieses Gases bestimmen, wenn man c_{Stab} kennt. Umgekehrt kann man mit Kenntnis von c_{Gas} die Schallgeschwindigkeit im Stab und nach Gl. (9) dessen Elastizitätsmodul bestimmen.

Aufgabe 1:
Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt bei 10^5 Pa und 0°C c_0 = 331,30 m/s. Man berechne die zu der herrschenden Temperatur gehörende Schallgeschwindigkeit c mittels Gl. (11).

Aufgabe 2:
Man leite den Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul E des Stabes und λ_{Luft}, λ_{Stab} und c_{Luft} mit Hilfe der Gl (9) und (14) her. Man bestimme λ_{Luft} und λ_{Stab} und berechne mit diesen Werten den Elastizitätsmodul des Messingstabes bzw. Aluminiumstabes.
(ρ_{Messing} = 8,2 g/cm^3, $\rho_{\mathrm{Aluminium}}$ = 2,7 g/cm^3)

Messung:
Man rege die erste Oberschwingung des Stabes an, bestimme λ_{Stab} und messe λ_{Luft} mit Hilfe der Kundtschen Staubfigur. Dazu füllt man etwas Korkmehl in das Rohr, hält dieses schräg und lässt durch vorsichtiges Klopfen das Mehl so in das Rohr hinuntergleiten, dass ein etwa gleich breiter Korkmehlstreifen sich durch das ganze Rohr zieht. Man legt dann das Rohr vorsichtig in seine Halterung, schiebt es soweit, dass der Stab etwa 10 cm ins Rohr hineinragt und drehe dann das Rohr 30 -45° um seine Längsachse. (Es hängt von der Luftfeuchtigkeit ab, wieweit man das Rohr drehen kann, ohne dass das Mehl von der schrägen Wand abrutscht). Dann justiert man den Stab so, dass die Metallscheibe am Ende des Stabes nicht die Innenwand des Glasrohres berührt. Die Ankopplung der Gassäule an den Stab ist optimal und die Staubfiguren werden am deutlichsten ausgeprägt, wenn die Scheibe nahe an einem Schwingungsknoten des Gases liegt (wieso?) Mit dem mit Kolophonium bestreuten Lederlappen regt man den Stab zu Schwingungen an. Man legt dazu den Lappen auf das Stabende und zieht ihn, kräftig zupackend, rasch in Stabrichtung über das hintere Stabende ab. Meist erkennt man bereits nach der ersten Anregung aus der Staubfigur, wieweit das Rohr in seiner Längsrichtung zu verschieben ist, damit die Scheibe in einem Geschwindigkeitsknoten liegt. Wichtig ist, dass Korkmehl und Rohr trocken sind.

Aufgabe 3:
Man bestimme die Schallgeschwindigkeit c_0 für CO_2-Gas.

Messung:
Man lässt über den Stopfen am Ende des Rohres CO_2 aus der Gasflasche in das Rohr einströmen. Zur Einstellung des richtigen Druckes ist unbedingt ein Assistent zu Hilfe zu rufen, da das Gas in der Flasche unter hohem Druck steht, der Korkstaub aber nicht aus dem Rohr geblasen werden soll. Man rege den Metallstab in seiner ersten Oberschwingung an und messe λ_{CO2} aus der entstehenden Staubfigur, wie bei Aufgabe 2 beschrieben. Man kann dann mit Hilfe von Gl. (6) und den aus den Aufgaben 1 und 2 bekannten Werten von c_{Luft} und λ_{Luft} die Schallgeschwindigkeit in CO_2 von Raumtemperatur c_{CO2} berechnen. Die Berechnung von $c_{0,\mathrm{CO2}}$ erfolgt dann mit Hilfe der Gl. (11).

Aufgabe 4:
Man berechne den Adiabatenexponenten für CO_2 mit Hilfe von Gl. (9c) und dem in Aufgabe 3 bestimmten Wert von c_0. Die Dichte von CO_2 unter Normalbedingungen (T = 0 °C und p = 10^5 Pa) beträgt $1{,}98\times10^{-3}$ g/cm^3.

6. Versuch Quinckesches Rohr

Zur Messung von λ und c_{Luft} dient in diesem Versuch das Quinckesche Resonanzrohr (Abb. 3). Es besteht aus einem offenen, unten durch einen Wasserspiegel abgeschlossenes Glasrohr. Die Höhe der Luftsäule in diesem Rohr kann durch Heben oder Senken eines mit ihm kommunizierenden Wasserbehälters stetig verändert werden. Mittels eines über der Öffnung des Rohres angebrachten Lautsprechers kann die Luftsäule zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. Resonanz tritt ein, wenn die Gl. (12) für stehende Wellen erfüllt ist. Dann wird der Ton durch die mitschwingende Luftsäule maximal verstärkt. Hebt oder senkt man den Wasserspiegel, so sind Resonanzen mit der Hörmuschel deutlich zu erkennen, wenn die Bedingung von Gl. (12) für die Grundschwingung oder eine der Oberschwingungen erfüllt ist. Die zugehörige Länge l der Luftsäule wird an der Längenskala des Rohres abgelesen.

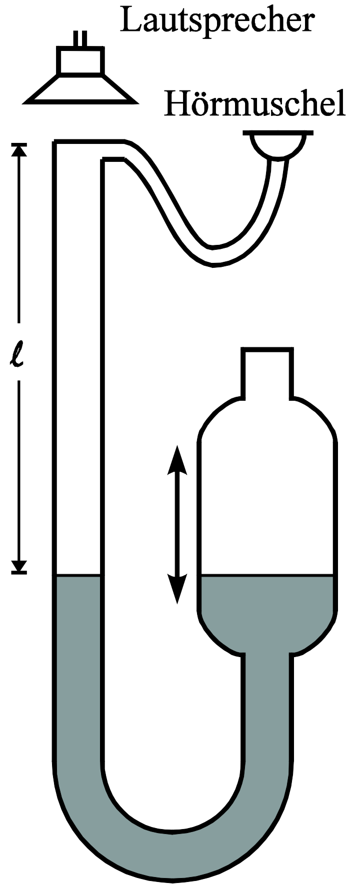

Abb. 3: Quinckesches Rohr.

Aufgabe 1:
Man bestimme den Wert der Schallgeschwindigkeit c in Luft bei Zimmertemperatur durch Messung von λ der stehenden Wellen im Quincke-Rohr und bestimme den Größtfehler, der durch den Messfehler von λ und die Ungenauigkeit der Ablesung von ν bedingt ist.

Messung:
Das Rohr wird zunächst fast ganz mit Wasser gefüllt. Dann erzeugt man mit dem Tongenerator einen Sinuston von 700 Hz (mit 15 Hz Genauigkeit). Der Wasserspiegel wird nun langsam gesenkt, wobei man ständig auf die Veränderung der Lautstärke des Tones achte. Es sind alle Resonanzstellen durch je fünfmaliges Heben und Senken des Wasserspiegels zu bestimmen ($n = 0,1,2$). Aus den je 10 Messwerten für die Höhe der Luftsäule bilde man den Mittelwert für λ sowie den Fehler des Mittelwerts.

Aufgabe 2:
Man berechne aus dem gemessenen Wert von c mittels Gl. (11) den Wert von c_0. Mit diesem Wert berechne man die Frequenz des Grundtons und des ersten Obertons einer 3 m langen einseitig offenen und einer beidseitig offenen Orgelpfeife.

Aufgabe 3:
Man führe mit dem Quincke-Rohr eine Klanganalyse durch.

Messung:
Der Klanggenerator liefert einen aus drei Sinustönen bestehenden Klang. Verbinden Sie den Lautsprecher mit dem Generator. Diese Schaltung bleibt während der ganzen Messung unverändert. Durch Aufsuchen der Resonanzen im Quincke-Rohr werden dann die in dem Klang enthaltenen Wellenlängen λ_1, λ_2 und λ_3 der Töne bestimmt. Dazu hebt und senkt man den Wasserspiegel je fünf mal, notiert die Höhen aller hörbaren Töne und bildet die Mittelwerte. Man ordnet die Resonatorlängen in einer Tabelle nach ihrer Größe. Nach Gl. (12) unterscheiden sich bei gleicher Frequenz die Resonatorlängen für die Oberschwingungen von denen der Grundschwingung um die Faktoren $(2n + 1)$. Man kann entscheiden, welcher Wellenlänge eine Resonanz zuzuordnen ist, wenn man folgendermaßen verfährt: Ordnen Sie dem kleinsten Messwert die Grundschwingung des höchsten Tones zu. Suchen Sie in Ihrer Tabelle nach Messwerten, die sich von der Grundschwingung um den Faktor $(2n + 1)$ unterscheiden (wegen der Messfehler werden diese Faktoren nicht genau auftreten). Von den noch verbleibenden Messwerten ordnen Sie wieder den kleinsten der Grundschwingung des mittleren Tones zu und suchen wieder in der Tabelle nach den Vielfachen $(2n + 1)$. Auf gleiche Weise verfährt man mit dem tiefsten Ton. Achtung: Es können doppelte Resonanzstellen vorhanden sein.

Man bestimme

a) die Wellenlängen λ_1, λ_2 und λ_3 (gemittelt aus den Werten von Grund- und Oberschwingungen),
b) die Verhältnisse der Wellenlängen λ_1/λ_2 , λ_2/λ_3 und λ_1/λ_3,
c) die Namen der drei Tonintervalle an (dazu runde man gegebenenfalls die Verhältnisse zu einfachen Brüchen).

7. Versuch Resonanz-Rohr

Zur Messung von c in Luft und CO_2 dient in diesem Versuch ein Resonanzrohr (Abb. 4), das im Prinzip auf das Quincke-Rohr zurückgeht. Mit einem Tongenerator wird ein Sinuston erzeugt, und die Schallwelle wird von dem Mikrophon in ein geschlossenes Posaunenrohr eingegeben. Sie breitet sich nach beiden Seiten in dem Rohr aus, die Teilwellen treffen aufeinander und interferieren. An einer anderen Stelle des Rohres ist ein Empfängermikrophon angebracht, das die Schalleistung an dieser Stelle auf ein Messgerät überträgt. Auf einem Oszillographen kann das Signal des Empfangsmikrophons beobachtet werden.

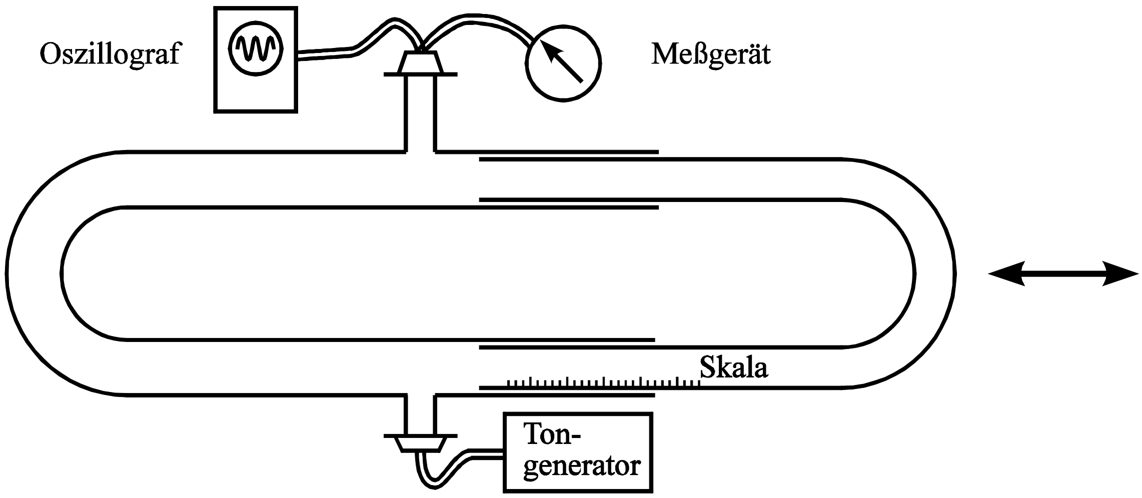

Abb. 4: Resonanz-Rohr

Der eine der beiden Wege, den die Schallwellen vom Sende- zum Empfangsmikrophon zurücklegen, kann durch Verschieben des Rohres verändert werden. Beträgt die Differenz zwischen den Längen beider Wege ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Schall-Wellenlänge , so löschen sich die beiden Teilwellen an der Empfangsstelle durch Interferenz; beträgt die Differenz hingegen ein geradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge, so tritt Verstärkung ein.

Aufgabe 1:
Man bestimme den Wert der Schallgeschwindigkeit c in Luft bei Zimmertemperatur.

Messung:
Man verschiebt die eine Rohrhälfte und registriert die Verschiebungen, die erforderlich sind, um von einem Maximum der Anzeige zum nächsten, übernächsten und drittnächsten Maximum zu gelangen. Mit der am Tongenerator ablesbaren Frequenz erhält man aus den drei Differenzen drei Werte für c. Entsprechend verfahre man mit den Minima. Die Messung ist für zwei verschiedene Frequenzen durchzuführen. Da bei Schallwellen die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht von der Frequenz abhängt, kann aus den 12 Einzelmesswerten der resultierende Mittelwert gebildet werden.

Aufgabe 2:
Man berechne aus dem Mittelwert die Schallgeschwindigkeit c_0 bei 0°C. Setzen Sie in Gl. (11) für α den Zahlenwert des idealen Gases ein.

Aufgabe 3:
Füllen Sie das Rohr mit CO_2 und bestimmen Sie wie in Aufgabe 1 die Schallgeschwindigkeit c. Lassen Sie sich beim Einfüllen des Gases aus der Gasflasche vom zuständigen Assistenten helfen.

Hinweis:
Sie können an dem Tongenerator unterschiedliche Frequenzen einstellen. Wählen Sie die Frequenz so, dass bei gleich langen Wegen (Rohr ganz eingeschoben) am Ort des Empfangsmikrophons sich maximale Intensität ergibt. (Hätte man in dieser Position des Rohres ein Minimum, so würde der Versuch nicht funktionieren. Wieso?)