

# Stehende Schallwellen im Kundtschen Rohr

## 1. Motivation

In diesem Versuch soll der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge, Frequenz und Geschwindigkeit einer Schallwelle anhand eines anschaulichen Experiments verdeutlicht werden.

## 2. Theorie

Zunächst sollen einige grundlegende akustische Sachverhalte dargestellt werden.

Das Kundtsche Rohr ist ein Rohr, bei dem der Durchmesser kleiner als  $1/4$  der benutzten Wellenlänge ist. In diesem Fall kann man davon ausgehen, dass sich im Rohr eine ebene Welle ausbreitet und keine Kugelwelle.

Folgende Größen beschreiben eine ebene Schallwelle recht gut:

1. **Schallgeschwindigkeit  $c$ :** Gibt an, wie schnell sich die Schallwelle ausbreitet.  $c$  hängt nicht vom Ort ab.
2. **Schall(wechsel)druck  $p$ :** Gibt den Druck im Trägermedium an, der *zusätzlich* zum normalen Luftdruck an einem bestimmten Ort herrscht.  $p$  kann negative Werte annehmen.
3. **Schallschnelle  $v$ :** Gibt an, wie schnell sich die einzelnen schwingenden Teilchen des Trägermediums bewegen. Dies hängt vom Ort ab.
4. **Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$ .** Sie hängen über  $c = \lambda \cdot \nu$  zusammen.

Dort, wo der Druck maximal oder minimal ist bewegen sich die Gasteilchen nicht. In der Mitte zwischen maximalem und minimalem Druck sind diese jedoch der größten beschleunigenden Kraft ausgesetzt und bewegen sich dort mit der größten Geschwindigkeit  $v$ . Druck und Schnelle sind somit um  $90^\circ$  phasenverschoben.

An einem harten Widerstand (hier: Plastikstopfen) können sich die Teilchen nicht bewegen, die Schnelle ist immer gleich null. Daraus folgt, dass der Druck hier maximal sein muss.

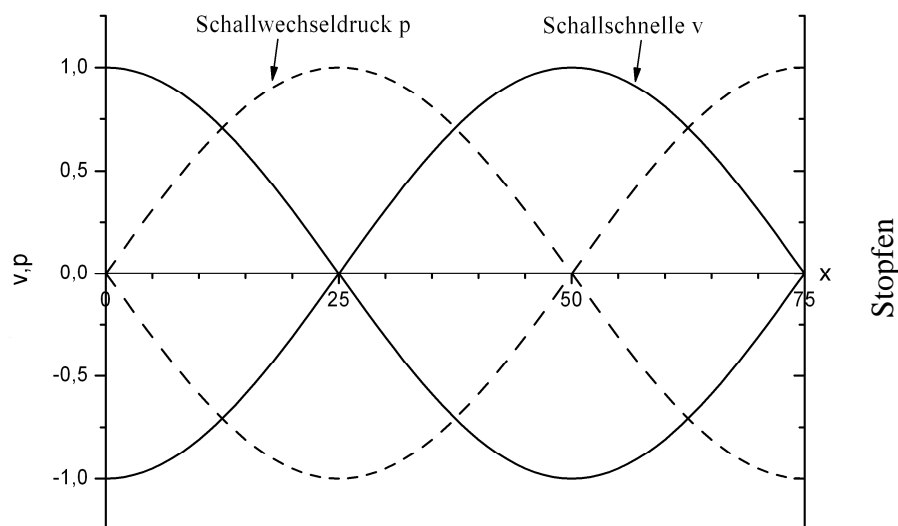


Abbildung 1: Verlauf von Schallschnelle  $v$  und Schallwechseldruck  $p$

Um eine möglichst gute Resonanz zu erreichen muss der Plastikstopfen an einem Ort maximalen Drucks stehen. Ist dies der Fall, bildet sich im Kundtschen Rohr eine laute stehende Welle aus. Wenn eine Schallwelle senkrecht auf eine Wand trifft, setzt sich das resultierende Schallfeld vor der Wand aus den Schallfeldgrößen der einfallenden und der reflektierten Welle zusammen. Man definiert den Reflexionsfaktor als Verhältnis des einfallenden und reflektierten Wechseldrucks:

$$r = \frac{p_r}{p_e} \quad (1)$$

Da sich die einzelnen Drücke  $p_r$  und  $p_e$  nicht separat messen lassen, kann  $r$  experimentell nicht mit Gl. (1) bestimmt werden. Für die meisten Anwendungen reicht es, wenn man den Betrag des Reflexionsfaktors kennt. Dieser lässt sich mit den Amplituden ausdrücken:

$$|r| = \frac{\hat{p}_r}{\hat{p}_e} \quad (2)$$

Ein Druckmaximum tritt dort auf, wo sich einfallende und reflektierte Welle gleichphasig überlagern:

$$\hat{p}_{max} = \hat{p}_e + \hat{p}_r \quad (3)$$

Entsprechend ergibt sich das Druckminimum dort, wo sich die Wellen gegenphasig überlagern:

$$\hat{p}_{min} = \hat{p}_e - \hat{p}_r \quad (4)$$

Daraus folgt

$$|r| = \frac{\hat{p}_{max} - \hat{p}_{min}}{\hat{p}_{max} + \hat{p}_{min}} \quad (5)$$

In Abb.1 wurde der Stopfen als ideal schallhart, d.h.  $r=1$  angenommen. Allgemein unterscheidet man

$r = +1$	: ideal schallhart (geschlossenes Rohrende)
$r > 0$	: schallhart
$r = 0$	: keine Reflexion (vollständige Absorption oder Schalltrichter)
$r < 0$	: schallweich
$r = -1$	: ideal schallweich (offenes Rohrende).

Bei einem ideal schallweichen Abschluss (offenes Ende) ist das Ende des Rohrs an einem Ort minimalen Drucks. Außerhalb des Rohres setzt sich dann eine Kugelwelle fort.

Ist der Reflexionsfaktor ungleich eins, so verschwinden die scharfen Druckknoten und das Rohrende steht nicht an einem Ort minimalen oder maximalen Drucks.

### 3. Aufgaben

**Hinweis:** Während des gesamten Versuchs wird nur eine einzige, feste Frequenz verwendet!

#### 1. Erzeugen einer stehenden Schallwelle

Stellen Sie die Rohrlänge durch Verschieben des Lautsprechers so ein, dass der Stopfen an einem Ort maximalen Drucks steht: Man verwende den Plastikstopfen und stecke das Mikrophon soweit hinein, dass es mit der Oberfläche des Stopfens abschließt. Durch Verschieben des Lautsprechers wird jetzt am Digitalvoltmeter (DVM) ein möglichst großer Anzeigewert eingestellt. Das DVM (Spannung) zeigt den Effektivwert des Schallwechseldrucks an.

**Achtung!** Die Empfindlichkeit des Mikrofons und die Amplitude am Frequenzgenerator so wählen, daß im 2 V-Meßbereich gemessen werden kann. Bei höheren Spannungen kommt es zur Übersteuerung des eingebauten Verstärkers, und die Meßwerte werden verzerrt.

## 2. Ausmessen des Schallfeldes

Hierzu wird das Stabmikrofon in 5 mm-Schritten in das Rohr geschoben und dabei der vom DVM angezeigte Wert notiert. Die Messung wird sowohl mit dem Plastik- als auch mit dem Schaumstoffstopfen und dem offenen Rohrende durchgeführt, wobei bei jedem Wechsel die Länge des Rohres durch Nachjustage optimiert werden muss.

Anschließend bestimme man unter Zuhilfenahme von

$$c = c_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (6)$$

die Frequenz der Schallwelle, wobei  $c_0 = 331,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $T_0 = 273,15 \text{ K}$  und  $T$  die Temperatur in Kelvin ist. ( $T$  in  $^{\circ}\text{C}$  ist am Digitalthermometer abzulesen.). Hierfür wird nur die Messung mit dem Plastikstopfen ausgewertet.

## 3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in $\text{CO}_2$ :

Der Stopfen wird entfernt und das Gas gewechselt. Man lässt ca. 30 s lang langsam  $\text{CO}_2$  in das Rohr strömen. Man kann nun davon ausgehen, dass sich im Rohr fast nur noch  $\text{CO}_2$  befindet. Der Plastikstopfen wird eingesetzt, und nach erneuter Justage des Lautsprechers wiederholt man die Messung aus Teil 2) (nur Plastikstopfen). Dabei darf während des Versuchs die Frequenz nicht geändert werden.

Berechnen Sie die Schallgeschwindigkeit in  $\text{CO}_2$  unter Verwendung der aus Teil 2) ermittelten Frequenz und vergleichen Sie mit Literaturwerten.

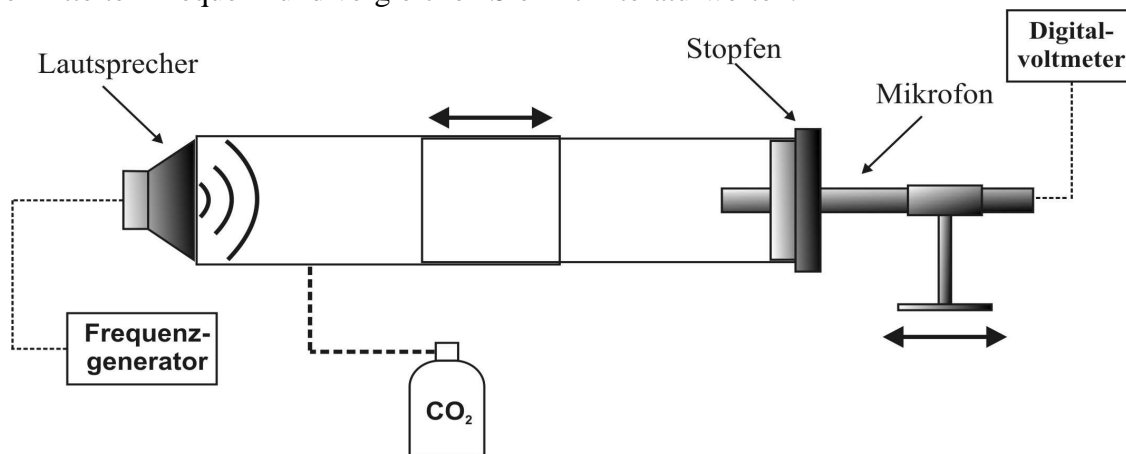


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau

## 4. Anfertigen des Versuchsprotokolls

- Einleitung (Motivation, Versuchsziel)
- Theoretische Grundlagen (Einführung aller relevanten Messgrößen sowie Herleitung aller verwendeten Formeln, die Antworten zu den 5 Fragen aus dem Fragekatalog müssen im Fließtext zu finden sein)
- Durchführung (Beschreibung des Aufbaus, Skizze, Beschreibung der Aufgaben)
- Ergebnisse (Messwerttabellen, Graphen)
- Zusammenfassung/Fazit (Bewertet eure Ergebnisse, Vergleich mit Literaturwerten oder Einstellungen, mögliche Fehlerquellen)

## 5. Hinweise zur Auswertung

1. Messung mit Plastik- oder Metallstopfen
  - Wellenlänge bestimmen (dazu Abstand zw. Minima und Maxima verwenden), Fehler angeben
  - $c$  berechnen mit Hilfe von Gleichung 6
  - Frequenz berechnen mit Fehler (Fehlerfortpflanzung)
  - Reflexionsfaktor berechnen mit Hilfe von Gleichung 5
2. Messung Schaumstoffstopfen und offenes Ende
  - Reflexionsfaktor berechnen mit Hilfe von Gleichung 5
3. Messung mit CO<sub>2</sub>
  - Wellenlänge bestimmen (dazu Abstand zw. Minima und Maxima verwenden), Fehler angeben
  - $c$  berechnen mit Hilfe von der 1. berechneten Frequenz mit Fehler (Fehlerfortpflanzung)

Zu allen Messungen gehören Graphen!