



## Protokoll zum Versuch *Schallgeschwindigkeit*

(Versuch 26)

Autor: Finn Zeumer (hz334)  
Versuchspartnerin: Annika Künstle  
Versuchsbegleiter: Adrian Karl Emanuel Hondyk  
Datum der Ausführung: 23.09.2025  
Abgabedatum: 30.09.2025

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. Einleitung</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1. Aufgabe/Motivation . . . . .  | 3         |
| 1.2. Physikalische Grundlage . . . . .   | 3         |
| 1.2.1. Schallausbreitung in Gasen . . . . .                                    | 3         |
| 1.2.2. Stehende Wellen im Quincke'schen Rohr . . . . .                         | 3         |
| 1.2.3. Laufzeitmessung einer fortschreitenden Schallwelle . . . . .            | 4         |
| 1.2.4. Signalverarbeitung mittels Lock-In-Verstärker . . . . .                 | 4         |
| <b>Messdaten</b>   | <b>5</b>  |
| <b>II. Durchführung</b>  | <b>8</b>  |
| <b>III. Auswertung</b>   | <b>10</b> |
| 3.1. Bestimmung der theoretischen Schallgeschwindigkeit . . . . .              | 11        |
| 3.2. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Quincke'schen Rohr . . . . . | 11        |
| 3.2.1. Luft . . . . .  | 12        |
| 3.2.2. Kohlenstoffdioxid . . . . .   | 12        |
| 3.2.3. Signifikanz . . . . .   | 12        |
| 3.2.4. Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten . . . . .                        | 13        |
| 3.3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit via Laufzeitmessung . . . . .        | 13        |
| 3.3.1. Y-t Modus . . . . .   | 13        |
| 3.3.2. X-Y Modus . . . . .   | 14        |
| 3.3.3. Vergleich der Modi . . . . .  | 14        |
| 3.3.4. Gesamtvergleich . . . . .   | 15        |
| 3.4. Aufgenommene Stimme . . . . .   | 15        |
| 3.5. Invarianz der Frequenz . . . . .  | 15        |
| <b>IV. Diskussion</b>  | <b>17</b> |
| 4.1. Zusammenfassung . . . . .   | 17        |
| 4.2. Diskussion . . . . .  | 17        |
| 4.3. Kritik . . . . .  | 18        |

# I. Einleitung

## 1.1. Aufgabe/Motivation

Ziel des vorliegenden Versuchs ist die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen, insbesondere in Luft und Kohlenstoffdioxid, unter Verwendung zweier unabhängiger Messmethoden. Im ersten Teil des Experiments wird die Schallgeschwindigkeit mithilfe eines Quincke'schen Rohres über die Analyse stehender Wellen ermittelt. Im zweiten Teil erfolgt eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeit über die direkte Messung der Laufzeit einer fortschreitenden Welle mittels eines Oszilloskops. Durch den Vergleich beider Verfahren sollen Unterschiede in der Genauigkeit und Empfindlichkeit der Methoden herausgearbeitet werden.

## 1.2. Physikalische Grundlage

[Dem17, Wag25a]

### 1.2.1. Schallausbreitung in Gasen

Schall breitet sich in Gasen als longitudinale mechanische Welle aus. Es handelt sich um eine Druckwelle, bei der die Schwingungsrichtung der Teilchen entgeg der Ausbreitungsrichtung verläuft. Da Gase im Vergleich zu Festkörpern nur geringe Kopplungskräfte zwischen den Teilchen aufweisen, treten in ihnen keine Transversalwellen auf. Die Geschwindigkeit  $c$  einer Schallwelle in einem idealen Gas ist abhängig von den Eigenschaften des Mediums und lässt sich theoretisch durch die folgende Beziehung berechnen:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} \quad (1)$$

Hierbei ist  $\kappa$  der Adiabatenkoeffizient,  $R$  die allgemeine Gaskonstante,  $T$  die absolute Temperatur und  $M$  die molare Masse des betrachteten Gases.

Für den Vergleich der gemessenen Werte mit Literaturwerten unter Normalbedingungen kann eine Temperaturkorrektur mittels

$$\frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (2)$$

durchgeführt werden, wobei  $c_0$  die Schallgeschwindigkeit bei Temperatur  $T_0$  und  $c$  die bei Versuchstemperatur  $T$  gemessene Geschwindigkeit bezeichnet.

### 1.2.2. Stehende Wellen im Quincke'schen Rohr

Im ersten Versuchsteil wird ein Quincke'sches Rohr verwendet, um stehende Wellen zu erzeugen und deren Eigenschaften zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit zu nutzen. Der Aufbau besteht aus einem vertikal ausgerichteten Rohr mit einem Lautsprecher am oberen Ende und einer verstellbaren Wassersäule am unteren Ende, die als reflektierendes Medium dient. Die vom Lautsprecher emittierte Schallwelle wird an der Wasseroberfläche reflektiert und interferiert mit der einfallenden Welle, wodurch es bei geeigneter Resonanzbedingung zur Ausbildung einer stehenden Welle kommt.

Da sich am Lautsprecher ein Schwingungsbauch und an der Wasseroberfläche ein Schwingungsknoten ausbildet, ergibt sich für den Abstand  $h$  zwischen Lautsprecher und Wasseroberfläche im Resonanzfall:

$$h = \frac{2n+1}{4}\lambda \quad \text{mit } n \in \mathbb{N} \quad (3)$$

Zur Bestimmung der Wellenlänge  $\lambda$  misst man die Abstände  $h_i$  bei mehreren aufeinanderfolgenden Lautstärkemaxima und berechnet die Differenz zwischen zwei benachbarten Maxima:

$$\lambda = 2(h_{i+1} - h_i) \quad (4)$$

Schließlich lässt sich die Schallgeschwindigkeit  $c$  über den bekannten Zusammenhang zwischen Frequenz  $\nu$  und Wellenlänge  $\lambda$  berechnen:

$$c = \nu \lambda \quad (5)$$

Die Gleichung 3 und Gleichung 4 werden dabei genutzt, um  $\lambda$  zu bestimmen und anschließend in Gleichung 5 einzusetzen.

### 1.2.3. Laufzeitmessung einer fortschreitenden Schallwelle

Im zweiten Teil des Experiments wird die Schallgeschwindigkeit über die direkte Laufzeitmessung einer fortschreitenden Welle bestimmt. Hierzu wird ein Sinusgenerator verwendet, der ein elektrisches Signal sowohl an einen Lautsprecher als auch an Kanal 1 eines Oszilloskops überträgt. Der Lautsprecher wandelt das Signal in eine Schallwelle um, die sich über die Strecke  $h$  zum Mikrofon ausbreitet. Dort wird sie wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt und an Kanal 2 des Oszilloskops weitergegeben.

Die Signale auf beiden Kanälen weisen eine Phasenverschiebung auf, die durch die endliche Laufzeit  $\tau$  der Schallwelle verursacht wird. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis von Abstand  $h$  und Schallgeschwindigkeit  $c$ :

$$\tau = \frac{h}{c} \quad (6)$$

Aus dieser Beziehung kann durch Messung von  $\tau$  und  $h$  die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Alternativ lässt sich  $\lambda$  über die Bestimmung der Abstände zwischen Punkten gleicher Phasenverschiebung ermitteln, um

wiederum über Gleichung 5 den Wert von  $c$  zu berechnen.

### 1.2.4. Signalverarbeitung mittels Lock-In-Verstärker

Zur Verbesserung der Signalqualität im ersten Versuchsteil wird ein digital implementierter Lock-In-Verstärker verwendet. Dieser ermöglicht die selektive Messung von Signalen mit gleicher Frequenz wie das Referenzsignal durch Multiplikation des Eingangssignals mit dem Referenzsignal und anschließende Tiefpassfilterung. Dabei bleibt nur der Gleichanteil des gewünschten Signals erhalten, während Fremdsignale und Rauschen mit anderen Frequenzanteilen unterdrückt werden. Das Ausgangssignal ist im Idealfall proportional zur Amplitude und Phasendifferenz des gemessenen Signals relativ zum Referenzsignal.

Dies erlaubt eine zuverlässige Detektion der Lautstärkemaxima, die zur Bestimmung der Resonanzbedingungen nach Gleichung 3 notwendig sind. Die gemessene Spannung am Ausgang des Lock-In-Verstärkers wird über ein analoges Multimeter abgelesen.

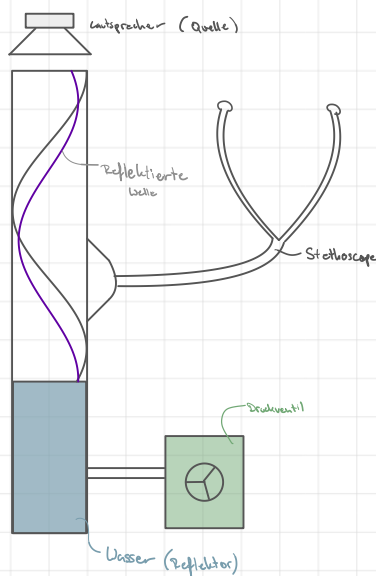
## 26 - Schallgeschwindigkeit

Ziel des heutigen Versuches ist die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $c_s$ . Hierzu gibt es zwei verschiedene Aufgaben, die jeweils zur Bestimmung von  $c_s$  gedacht sind, jedoch auf verschiedene Messverfahren beruhen.

### Aufgabe 1)

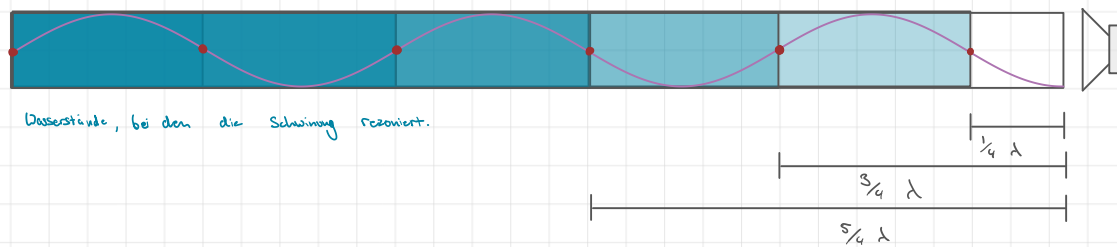
In diese Aufgabe wollen wir  $c_s$  in zwei verschiedenen Medien (Luft-Gas-Gemisch und  $\text{CO}_2$  (g)) bestimmen. Wir nutzen dafür ein Quinck'sches Rohr. Dies ist eine Röhre der Höhe  $h'$ , an dessen oberem Ende ein Lautsprecher ist (Schall-Quelle). Am unteren Ende ist Wasser als Reflektor, dessen Höhenstand veränderlich ist. Die effektive Höhe  $h$  des Rohres (der Laufweg der Schallwelle) ist dann die Gesamthöhe  $h'$  - den Wasserpegel (als Absolutbetrag).

Abbildung I) Schematische Skizze des Quinck'schen Rohres.



Schematischer Aufbau des Quinck'schen Rohres und ihrer Komponenten.

Abbildung II) Resonanz



Wasserstände, bei denen die Schwingung resoniert.

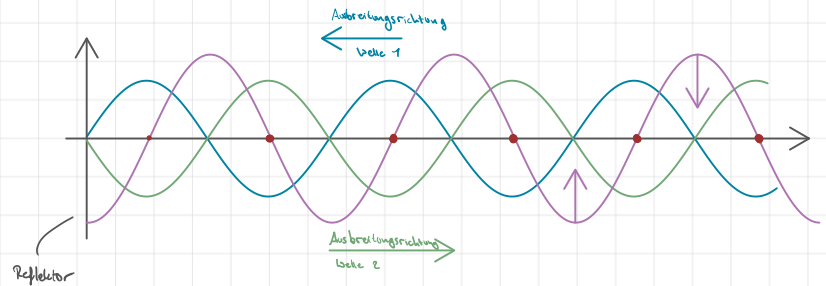
Resonanzpunkte sind immer erreicht, wenn der Wasserpegel auf der Höhe eines Knotens ist, die wird als maximaler Torpegel erkennbar.

Tabelle I) Messung der Wasserpegel für Resonanz (Luft)

| Messung                          | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|----|----|----|----|
| 1. Durchgang<br>Wasserpegel [cm] | 35,0 | 36,7 | 38,6 | 42,0 | 62,0 | 53,3 | 45,6 | 37,4 | 28,1 | 20,3 | 12,6 |    |    |    |    |    |
| 2. Durchgang<br>Wasserpegel [cm] | 35,1 | 36,4 | 38,3 | 42,3 | 62,0 | 53,8 | 45,5 | 37,4 | 28,1 | 20,8 | 12,8 |    |    |    |    |    |

Tabelle der bestimmten Wasserpegel, bei denen der Ton als maximal laut wahrgenommen wird und somit resoniert.  
Im Medium Luft (g).

Abbildung II) Wellenformlage: Stehende Welle



Resultierende Welle aus Überlagerung von Welle 1 und 2.  
Knoten der stehenden Welle (Baupfist).

Visualisierung einer stehenden Welle. Eine solche entsteht in dem Quinck'schen Rohr.  
Ziel ist es die Amplitude der resultierenden Welle zu maximieren (Resonanz).

• Raumtemperatur:  $23,2^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$

• Eingestellte Frequenz am Generator:  $21.000 \text{ kHz}$  + Ungenauigkeit !!! (Fals bekommt)

Skalengröße:  $0,10 \text{ Hz}$

$\Rightarrow 50\%$  der Skalengröße:  $0,05 \text{ Hz}$  = Ablesegenauigkeit des Funktion Generators / Systematischer Fehler: letzten 2 Digits

## Voltmeter

Ungenauigkeit:  $1,5\%$

Eingestellt:  $10 \text{ V DC}$

**Tabelle II** Messung der Wasserpegel für Resonanz ( $\text{CO}_2$ )

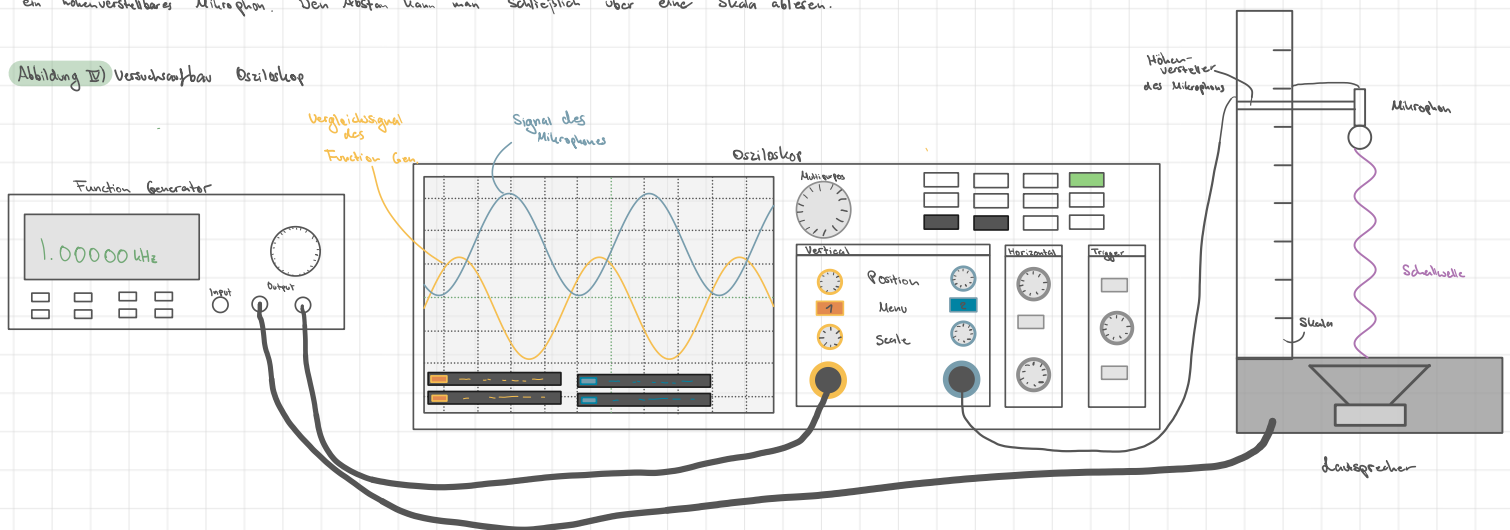
| Messung                          | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14 | 15 | 16 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|----|----|
| 1. Durchgang<br>Wasserpegel [cm] | 83,4 | 87,0 | 80,4 | 74,0 | 67,5 | 61,0 | 54,5 | 48,2 | 41,8 | 35,3 | 28,0 | 22,4 | 16,0 |    |    |    |
| 2. Durchgang<br>Wasserpegel [cm] | 83,3 | 86,9 | 80,5 | 74,0 | 67,4 | 61,1 | 54,7 | 48,2 | 41,8 | 35,5 | 28,0 | 22,4 | 16,1 |    |    |    |

Tabelle der bestimmten Wasserpegel, bei denen der Ton als maximal laut wahrgenommen wird und somit resoniert.  
Im Medium  $\text{CO}_2$  (g).

## Aufgabe II

In diesem Aufgabenteil nutzen wir das neu kennengelernte Oszilloskop, um über die Phasenverschiebung. Dies funktioniert über einen fahrerbauteil Lautsprecher und ein höhenverstellbares Mikrophon. Den Abstand kann man schließlich über einer Skala ablesen.

**Abbildung IV** Versuchsaufbau Oszilloskop



Die Abbildung zeigt den schematischen Versuchsaufbau mit dem Oszilloskop. Die Schallgeschwindigkeit wird in Luft (g) gemessen.

Der Versuchsaufbau ist so gedacht, dass das Sinussignal einmal direkt in das Oszilloskop gespeist wird und einmal den (zeitlichen) Umweg über den Lautsprecher und das Mikrophon. Es sind somit zwei identische Sinuskurven (Ton-signal wird via Lock-in Tiefpass "bereinigt") mit Phasenverschiebung.

Das Mikrophon wird nun immer so verschoben, dass es immer um eine Periode verschoben wird.

**Tabelle III** Mikrophon-Lautsprecher-Abstand ( $\lambda$ )

| Messreihe                      | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|---|----|----|----|----|
| 1. Messreihe<br>Abstand [m cm] | 3,1 | 6,2 | 10,2 | 13,2 | 17,2 | 20,2 | 24,2 | 27,5 |   |    |    |    |    |
| 2. Messreihe<br>Abstand [m cm] | 3,1 | 6,1 | 10,1 | 13,2 | 17,2 | 20,2 | 24,1 | 27,6 |   |    |    |    |    |

Tabelle mit den Abgelesenen Werten der Mikrophon-Höhe. Gemessen wurde im  $\lambda$ -Modus

## Zusatzaufgabe

Tabelle III: Mikrofon-Lautsprecher-Abstand (yx)

| Messreihe           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13 | 14   | 15   | 16 | 17 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|------|----|----|
| 1. Messreihe - 180° | 4,0 | 5,8 | 7,5 | 9,3 | 11,0 | 12,8 | 14,5 | 16,3 | 18,0 | 19,8 | 21,5 | 23,2 | 25 | 26,6 | 28,4 |    |    |
| 2. Messreihe - 360° | 4,0 |     | 7,5 |     | 11,0 |      | 14,5 |      | 18,0 |      | 21,5 |      | 25 |      | 28,4 |    |    |

Tabelle mit den Abgelesenen Werten der Mikrofone-Höhe. Gemessen wurde im YX-Modus

• Raumtemperatur:  $(23,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$

## Aufgabe 3)

In diesem Aufgabenteil sollen wir unsere Stimme im Oszilloskop visualisieren:

Bilder werden später schön eingefügt

- Es lässt sich im FFT-Modus schön die unterschiedlichen Frequenzen anschauen.
- Bei Pfeiftonen sind die Oberschwingungen besonders gut sichtbar.

## Aufgabe 4)

Die Schallgeschwindigkeit ist unabhängig von der Frequenz. Diese Behauptung soll qualitativ bestätigt werden.

Bilder werden gemacht.

- Behauptung stimmt - ist besonders klar im YX-Modus zu sehen gewesen.

23.09.25  
A-Handy

## II. Durchführung

Im ersten Teil des Experiments wurde die Schallgeschwindigkeit mit einem Quincke'schen Rohr bestimmt. Der Versuchsaufbau bestand aus einem vertikal montierten Rohr, das am oberen Ende mit einem Lautsprecher verbunden war und am unteren Ende eine verstellbare Wassersäule enthielt. Über einen Sinusgenerator wurde der Lautsprecher mit einer sinusförmigen Wechselspannung gespeist. Das Ausgangssignal des Generators wurde zusätzlich über einen digitalen Lock-In-Verstärker geführt, dessen Ausgangsspannung auf einem analogen Multimeter im 10-V-Bereich abgelesen wurde. Die Wassersäule diente als reflektierende Grenzfläche, deren Höhe über ein Ausgleichsgefäß präzise eingestellt werden konnte. Für Messungen in Kohlendioxid wurde das Rohr zusätzlich über eine Gasflasche mit Reduzierventil, Druckastventil und Zuleitungsschlauch mit CO<sub>2</sub> gefüllt. Ein brennendes Streichholz diente zur Überprüfung, ob das Gas die Luft vollständig verdrängt hatte.

Im zweiten Versuchsteil wurde die Schallgeschwindigkeit über die direkte Laufzeitmessung einer fortschreitenden Schallwelle bestimmt. Hierzu befanden sich ein Lautsprecher und ein verschiebbares Mikrofon in einem schalldämmten Kasten. Das vom Sinusgenerator erzeugte Signal wurde gleichzeitig an den Lautsprecher und an Kanal 1 des Oszilloskops angelegt. Das Mikrofon wandelte die ankommende Schallwelle wieder in ein elektrisches Signal um, das an Kanal 2 des Oszilloskops weitergegeben wurde. Durch Vergleich der beiden Signale konnte die Phasenverschiebung und damit die Laufzeit bestimmt werden. Eine schematische Darstellung beider Aufbauten befindet sich im [Protokoll](#).

### Aufgabe 1: Messung mit dem Quincke'schen Rohr

Zu Beginn der Messung wurde das Rohr mit Luft gefüllt. Die Frequenz des Sinus Generators wurde auf einen Wert zwischen 2 und 3 kHz eingestellt und die Ausgangsspannung so gewählt, dass das multimeter etwa 8 V anzeigte. Werte oberhalb von 12 V wurden vermieden, um Übersteuerungen des Digital-Analog-Wandlers zu verhindern. Da der Lock-In-Verstärker sehr empfindlich reagierte, war der Ton nur schwach hörbar. Entscheidend war das Spannungsmaximum am Multimeter, das auf Resonanzbedingungen hinwies.

Zur Ermittlung der Wellenlänge wurde der Wasserstand im Rohr langsam verändert, bis ein Lautstärkemaximum erreicht wurde. Die Höhe der Wassersäule wurde notiert und der Vorgang mehrfach wiederholt, um die Abstände  $h_i$  zwischen aufeinanderfolgenden Resonanzhöhen zu bestimmen. Aus den Differenzen der Höhen ließ sich die Wellenlänge  $\lambda$  nach [Gleichung 4](#) berechnen. Die Frequenz wurde vor und nach jeder Messreihe überprüft, um eventuelle Schwankungen zu erfassen. Anschließend wurde die Messung mit CO<sub>2</sub> wiederholt. Dazu wurde das Rohr durch vorsichtiges Einleiten von CO<sub>2</sub> von unten nach oben befüllt, bis das Gas die Luft vollständig verdrängt hatte. Ein erlöschendes Streichholz an der Öffnung diente als Kontrolle. Der Lautsprecher wurde wieder eingesetzt, und die Resonanzmessung erfolgte analog zur Luftmessung. Nach jeder Absenkung des Wasserstandes wurde gegebenenfalls weiteres CO<sub>2</sub> zugeführt. Am Ende der Messung wurden Temperatur und Gasdruck notiert, um die Werte später auf Normalbedingungen umzurechnen. Danach wurde das Hauptventil der



Gasflasche geschlossen und das Wasser vollständig abgelassen.

### Aufgabe 2: Messung der Laufzeit einer fortschreitenden Welle

Im zweiten Versuchsteil wurde die Schallgeschwindigkeit durch direkte Laufzeitmessung bestimmt. Der Sinusgenerator wurde auf eine Frequenz von 10 kHz eingestellt. Das Ausgangssignal wurde gleichzeitig an den Lautsprecher und an Kanal 1 des Oszilloskops gelegt, während das Mikrofonsignal an Kanal 2 angeschlossen wurde. Beim Einschalten des Signals erschienen auf dem Oszilloskopschirm zwei sinusförmige Spannungen, die eine Phasenverschiebung aufwiesen. Durch Verschieben des Mikrofons entlang der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle änderte sich der Abstand  $h$  zwischen Lautsprecher und Mikrofon, was eine Veränderung der Phasenlage bewirkte. Die Laufzeit  $\tau$  konnte über die Phasenverschiebung gemäß [Gleichung 6](#) bestimmt werden.

Für die Auswertung wurden alle Positionen ermittelt, bei denen sich das Signal auf dem Oszilloskop um genau eine Periode, also um eine Phasenverschiebung von  $360^\circ$ , verschoben hatte. Die Messung wurde zweimal wiederholt. Aus den Differenzen der gemessenen Abstände ergab sich die Wellenlänge  $\lambda$ , und mithilfe von [Gleichung 5](#) konnte die Schallgeschwindigkeit berechnet werden. Zur Kontrolle wurde die Periodendauer  $T$  der Generatorfrequenz am Oszilloskop gemessen, woraus eine Frequenz von 10 kHz bestimmt wurde.

### Aufgabe 3: Zusatzmessungen

Zum Abschluss wurde das Frequenzspektrum der menschlichen Stimme betrachtet. Hierzu wurde der Deckel des schallgedämmten Kastens geöffnet, und die Stimme wurde in Richtung des Mikrofons gesprochen. Auf dem Oszilloskop konnten die Frequenzanteile qualitativ beobachtet werden. Zusätzlich wurde über-

prüft, ob die Schallgeschwindigkeit frequenzunabhängig ist, indem Messungen bei 2 kHz und 5 kHz durchgeführt wurden. Dazu wurden für jede Frequenz zwei Mikrofonpositionen mit bekanntem Phasenunterschied bestimmt. Die Ergebnisse bestätigten, dass die Schallgeschwindigkeit unabhängig von der Anregungsfrequenz ist.

Die gemessenen Daten dienten als Grundlage für die anschließende Auswertung. Zur Umrechnung auf Normalbedingungen wurde [Gleichung 2](#) verwendet, während theoretische Vergleichswerte über [Gleichung 1](#) bestimmt wurden.

## III. Auswertung

### Fehlerrechnung

Für die statistische Auswertung von  $n$  Messwerten  $x_i$  werden folgende Größen definiert [Wag25b]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Arithmetisches Mittel} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Variation} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Standardabweichung} \quad (3)$$

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad \text{Fehler des Mittelwerts} \quad (4)$$

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2} \quad \text{Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz für } f(x, y) \quad (5)$$

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad \text{Fehler für } f = x + y \quad (6)$$

$$\Delta f = |a| \Delta x \quad \text{Fehler für } f = ax \quad (7)$$

$$\frac{\Delta f}{|f|} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad \text{relativer Fehler für } f = xy \text{ oder } f = x/y \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{|a_{lit} - a_{gem}|}{\sqrt{\Delta a_{lit}^2 + \Delta a_{gem}^2}} \quad \text{Berechnung der signifikanten Abweichung} \quad (9)$$

### 3.1. Bestimmung der theoretischen Schallgeschwindigkeit

Es soll die Schallgeschwindigkeit in Luft und Kohlenstoffdioxid bei den im Versuch herrschenden Bedingungen bestimmt werden. Dazu wird [Gleichung 1](#) verwendet. Die Adiabatenkoeffizienten von Luft und Kohlenstoffdioxid sind dem Skript [\[Wag25a\]](#) entnommen und betragen:

$$\kappa_{Luft} = 1,4 \quad (10)$$

$$\kappa_{CO_2} = 1,3 \quad (11)$$

Die molaren Massen ergeben sich aus den Atomgewichten der beteiligten Elemente:

$$M_{Luft} = 29 \frac{g}{mol} \quad (12)$$

$$M_{CO_2} = 44 \frac{g}{mol} \quad (13)$$

$R$  ist die ideale Gaskonstante mit  $R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$ . Die Temperatur wird auf den Idealwert von  $T = 273,15 K$  ( $0^\circ C$ ) bestimmt. Damit ergeben sich die theoretischen Schallgeschwindigkeiten zu:

$$c_{Luft} = 331,11 \frac{m}{s} \quad (14)$$

$$c_{CO_2} = 259,03 \frac{m}{s} \quad (15)$$

Das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten beträgt:

$$\frac{c_{Luft}}{c_{CO_2}} = 1,278 \quad (16)$$

### 3.2. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Quincke'schen Rohr

Die Messdaten für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Quincke'schen Rohr

sind den Tabellen 1 (Luft) und 2 (Kohlenstoffdioxid) des [Protokolls](#) zu entnehmen. Die Frequenz des Generators beträgt  $(\nu = 21\,000 \pm 0,5) Hz$ . Über diese soll die Schallgeschwindigkeit in den beiden Medien bestimmt werden. Dazu werden außerdem die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Resonanzstellen benötigt. Mit dieser wird die Wellenlänge über [Gleichung 4](#) bestimmt, welche nachfolgend als  $d$  bezeichnet wird. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich dann über [Gleichung 5](#). Die Ungenauigkeit der Differenz wird über die [Gauß'sche Fehlerfortpflanzung \(5\)](#) bestimmt:

$$\Delta d_{sys} = 2 \cdot \sqrt{(\Delta h_{i+1})^2 + (\Delta h_i)^2}. \quad (17)$$

Die Ablesegenauigkeit wird auf  $\Delta h = 0,25 cm$  geschätzt.

Dazu wird die statistische Ungenauigkeit  $d_{stat}$  über die [Standardabweichung des Mittelwerts \(4\)](#) bestimmt.

Der gesamte Fehler der Differenz ergibt sich dann über:

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta d_{sys})^2 + (\Delta d_{stat})^2}. \quad (18)$$

Daraus lässt sich die Ungenauigkeit der Wellenlänge bestimmen:

$$\Delta \lambda = 2 \cdot \Delta d. \quad (19)$$

Die Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit ergibt sich ebenfalls über die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta c = \sqrt{(\nu \cdot \Delta \lambda)^2 + (\lambda \cdot \Delta \nu)^2}. \quad (20)$$

Die gemessene Raumtemperatur beträgt  $T_{gem} = (23,0 \pm 1,0)^\circ C = (296,2 \pm 1,0) K$ . Mit dieser wird die Schallgeschwindigkeit auf Normalbedingungen umgerechnet. Dazu wird [Gleichung 2](#) verwendet, wobei  $T_0 = 273,15 K$  die Normaltemperatur ist. Die Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit bei Normalbedingungen wird über die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung bestimmt:

$$\Delta c_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{2T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2} \cdot c_0. \quad (21)$$

Aus den zwei Messreihen wird das [arithmetische Mittel \(1\)](#) bestimmt. Zwischen diesen Einträgen werden die Differenzen gebildet, um die Wellenlänge zu bestimmen. Aus diesen Werten wird wiederum das arithmetische Mittel gebildet und sein Fehler bestimmt.

### 3.2.1. Luft

Für die durchschnittliche Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Resonanzstellen ergibt sich:

$$\overline{d_{Luft}} = (8,2 \pm 0,8) \text{ cm.} \quad (22)$$

Und damit die Wellenlänge:

$$\lambda_{Luft} = (16,5 \pm 1,5) \text{ cm.} \quad (23)$$

Damit lässt sich die Schallgeschwindigkeit der gegebenen Umstände bestimmen. Diese kommt auf einen Wert von:

$$c_{Luft} = (350 \pm 30) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (24)$$

Die Hohe Ungenauigkeit hängt mit dem großen Ablesefehler zusammen. Ohne Ablesefehler käme man auf ein Ergebnis von:

$$c_{Luft,2} = (345,9 \pm 11,7). \quad (25)$$

Die Schallgeschwindigkeit unter Normalbedingungen beläuft sich somit auf:

$$c_{0,Luft} = (360 \pm 30) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (26)$$

Wieder ohne Ablesefehler:

$$c_{0,Luft,2} = (360,1677 \pm 12,1228) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (27)$$

### 3.2.2. Kohlenstoffdioxid

Analog wird die Schallgeschwindigkeit im Kohlenstoffdioxid bestimmt. Die Durchschnittsdifferenz beträgt dabei

$$\overline{d_{CO_2}} = (6,4 \pm 0,7) \text{ cm,} \quad (28)$$

aus der sich die Wellenlänge

$$\lambda_{CO_2} = (12,9 \pm 1,4). \quad (29)$$

berechnet.

Somit beträgt die Schallgeschwindigkeit in Kohlenstoffdioxid

$$c_{CO_2} = (271,0 \pm 30,0) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (30)$$

und unter Normalbedingungen:

$$c_{0,CO_2} = (280 \pm 30) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (31)$$

Unter Vernachlässigung der Ableseungenauigkeit kommen die Ergebnisse:

$$c_{CO_2,2} = (270,6 \pm 0,9) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (32)$$

und

$$c_{0,CO_2,2} = (281,7341 \pm 1,0205) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (33)$$

### 3.2.3. Signifikanz

Die Werte sollen [tabellarisch 3.2.3](#) aufgelistet werden und deren [Berechnung der signifikanten Abweichung \(9\)](#) soll bestimmt werden.

| Größe                  | Luft               | CO <sub>2</sub>   |
|------------------------|--------------------|-------------------|
| d [cm]                 | 8,2 ± 0,8          | 6,4 ± 0,7         |
| λ [cm]                 | 16,5 ± 1,5         | 12,9 ± 1,4        |
| c [m/s]                | 350 ± 30           | 271,0 ± 30,0      |
| c <sub>0</sub> [m/s]   | 360 ± 30           | 280 ± 30          |
| c <sub>2</sub> [m/s]   | 345,9 ± 11,7       | 270,6 ± 0,9       |
| c <sub>0,2</sub> [m/s] | 360,1677 ± 12,1228 | 281,7341 ± 1,0205 |
| σ                      | 0,31σ              | 0,24σ             |
| σ <sub>2</sub>         | 0,28σ              | 8,40σ             |

Tabelle III.1.: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Quinche'schen Röhre.

Die »2« indiziert dabei die ausschließliche Nutzung des statistischen Fehlers, der systematische Ablesefehler wird somit nicht berücksichtigt.

### 3.2.4. Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten

Zuletzt soll das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten in Luft und Kohlenstoffdioxid bestimmt werden. Das Verhältnis beträgt:

$$\frac{c_{0,Luft}}{c_{0,CO_2}}. \quad (34)$$

Über die [Gauß'sche Fehlerfortpflanzung \(5\)](#) wird der Fehler zu

$$\Delta \left( \frac{c_{0,L}}{c_{0,CO_2}} \right) = \sqrt{\left( \frac{\Delta c_{0,L}}{c_{0,CO_2}} \right)^2 + \left( \frac{c_{0,L} \cdot \Delta c_{0,CO_2}}{c_{0,CO_2}^2} \right)^2} \quad (35)$$

bestimmt.

Somit ergibt sich für das Verhältnis:

$$\boxed{\frac{c_{0,Luft}}{c_{0,CO_2}} = 1,29 \pm 0,17}. \quad (36)$$

Die entspricht einer [signifikanten Abweichung \(9\)](#) von:

$$\sigma = 0,07\sigma \quad (37)$$

Zum bestimmten [Theoriewert 16](#).

Nutzt man die Werte ohne Ablesefehler, so ergibt sich

$$\frac{c_{0,Luft,2}}{c_{0,CO_2,2}} = 1,28 \pm 0,04, \quad (38)$$

und eine signifikante Abweichung von

$$\sigma_2 = 0,05\sigma \quad (39)$$

Zum bestimmten [Theoriewert 16](#).

## 3.3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit via Laufzeitmessung

Es soll nun der Versuchsaufbau mit dem Oszilloskop betrachtet werden. Hier sind zwei Messreihen durchgeführt worden. Beide im Luft-Medium, jedoch mit unterschiedlichen Oszilloskopeinstellungen. Die Messdaten sind den Tabellen 3 und 4 des [Protokolls](#) zu entnehmen.

Tabelle 3 beinhaltet die Messwerte des Oszilloskopes unter benutzung des Y-t Moduses, also der Verschiebung des Signals über die Zeitachse. Tabelle 4 beinhaltet die Messwerte des Oszilloskopes unter benutzung des X-Y Moduses. Beide Modi sollen mit einander verglichen werden.

### 3.3.1. Y-t Modus

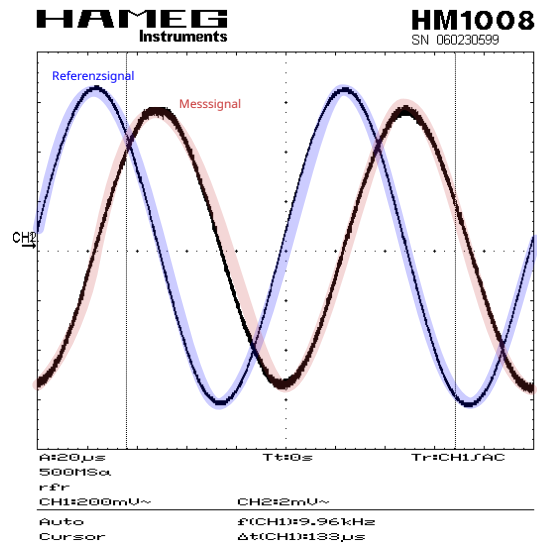


Abbildung III.1.: Beispiel eines Messwertes im Y-t-Modus bei 10kHz.

Die Abbildung III.1 zeigt ein Beispiel eines Messwertes im Y-t Modus. Hier ist die Verschiebung des Signals über die Zeitachse abgebildet. Die Frequenz des Generators beträgt  $\nu = 10\text{ kHz}$ . Die Zeitdifferenz zwischen den beiden Signalen wird abgelesen und in eine Wegstrecke umgerechnet. Es wurden wieder jeweils zwei Messreihen vorgenommen, um die statistische Genauigkeit zu erhöhen. Es werden wieder die Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden Messwerten gebildet, um die Wellenlänge zu bestimmen. Aus diesen Werten wird wiederum das arithmetische Mittel gebildet und sein Fehler bestimmt. Der Fehler berechnet sich aus dem systematischen Ablesefehler von  $\Delta d = 0,5\text{ cm}$  und dem [Fehler des Mittelwerts](#)

(4). Folglich ergibt sich für die erste Messreihe eine Wellenlänge von:

$$\lambda_1 = (3,5 \pm 0,5) \text{ cm} \quad (40)$$

Mit der Frequenz von  $\nu = 10 \text{ kHz}$  ergibt sich eine Schallgeschwindigkeit von:

$$c_1 = (350 \pm 50) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (41)$$

Unter Normalbedingungen:

$$c_{0,1} = (360 \pm 60) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (42)$$

### 3.3.2. X-Y Modus

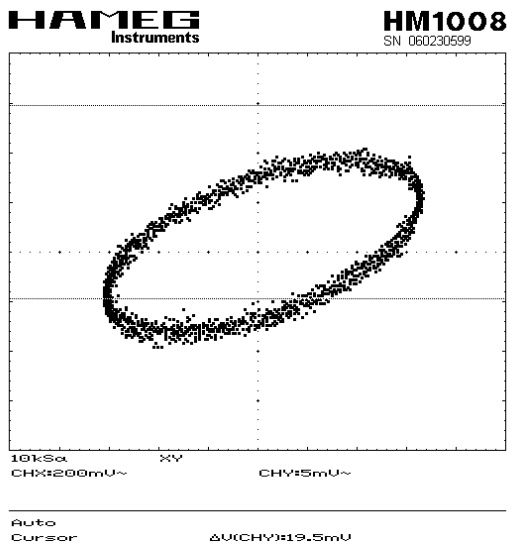


Abbildung III.2.: Beispiel eines Messwertes im X-Y-Modus bei 10kHz.

Die [Abbildung III.2](#) zeigt ein Beispiel eines Messwertes im X-Y Modus. Hier ist die Verschiebung des Signals über die X-Achse abgebildet. Die Frequenz des Generators beträgt  $\nu = 10 \text{ kHz}$ .

Die Wellenlänge bestimmt sich zu

$$\lambda_2 = (3,4857 \pm 1,0006) \text{ cm} \quad (43)$$

Aus dieser ergibt sich die Schallgeschwindigkeit zu:

$$c_2 = (348,57 \pm 100,06) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (44)$$

Unter Normalbedingungen:

$$c_{0,2} = (362 \pm 104) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (45)$$

### 3.3.3. Vergleich der Modi

Die Ergebnisse sollen im Folgendem verglichen werden. Die Bestimmung der Signifikanz unter Benutzung dieser Werte ist jedoch nicht sinnvoll, da die Unsicherheiten durch den Ablesefehler sehr groß sind. Es fällt jedoch auf, dass die Ungenauigkeiten mit Ablesefehler im Y-t-Modus geringer sind als im X-Y-Modus. Dennoch sind die Werte mit Ableseungenauigkeit kaum aussagekräftig. Ohne Ablesefehler sind die Werte jedoch sehr genau und liegen nah beieinander. Die Ergebnisse sind in [Tabelle III.2](#) zusammengefasst.

| Größe           | Y-t Modus     | X-Y Modus           |
|-----------------|---------------|---------------------|
| $\lambda$ [cm]  | $3,5 \pm 0,5$ | $3,4857 \pm 1,0006$ |
| $c$ [m/s]       | $350 \pm 50$  | $348,57 \pm 100,06$ |
| $c_0$ [m/s]     | $360 \pm 60$  | $362 \pm 104$       |
| $c_2$ [m/s]     | $349 \pm 18$  | $349 \pm 3$         |
| $c_{0,2}$ [m/s] | $364 \pm 19$  | $363 \pm 4$         |

Tabelle III.2.: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Oszilloskop.

Es wird schnell ersichtlich, dass die Ergebnisse ohne Ablesefehler (Indizie »2«) genauer sind und näher beieinander liegen. Besonders die Ungenauigkeit im X-Y Modus ist hier sehr viel geringer im Vergleich. Die statistische Signifikanz der Ergebnisse ohne Ablesefehler beträgt:

$$\sigma_2 = \frac{|c_{Y-t} - c_{Y-X}|}{\sqrt{(\Delta c_{Y-t})^2 + (\Delta c_{Y-X})^2}} = 0,04\sigma \quad (46)$$

Eigentlich wäre die Abweichung null, da die Rundung jedoch unterschiedlich ist, ergibt sich eine kleine Abweichung. Diese ist jedoch nicht signifikant. Vergleichbar ist dies mit den Ergebnissen der Normalbedingungen

$$\sigma_2 = \frac{|c_{0,Y-t} - c_{0,Y-X}|}{\sqrt{(\Delta c_{0,Y-t})^2 + (\Delta c_{0,Y-X})^2}} = 0,05\sigma \quad (47)$$

### 3.3.4. Gesamtvergleich

Abschließend sollen die Ergebnisse der beiden Methoden verglichen werden. Auch hier ist die Signifikanz der Werte mit Ablesefehler nicht sinnvoll, da die Ungenauigkeiten zu groß sind. Ohne Ablesefehler ergeben sich jedoch folgende Werte. Es werde die Werte aus dem Y-X-Modus des Oszilloskops verwendet, da diese die geringste Ungenauigkeit aufweisen. Somit ist die [signifikante Abweichung](#) (9) zwischen den beiden Methoden:

$$\sigma_2 = \frac{|c_{Quinke} - c_{Oszilloskop}|}{\sqrt{(\Delta c_{Quinke})^2 + (\Delta c_{Oszilloskop})^2}} = 0,26\sigma \quad (48)$$

Für die Normalbedingungen beträgt die signifikante Abweichung:

$$\sigma_2 = \frac{|c_{0,Quinke} - c_{0,Oszilloskop}|}{\sqrt{(\Delta c_{0,Quinke})^2 + (\Delta c_{0,Oszilloskop})^2}} = 0,22\sigma \quad (49)$$

## 3.4. Aufgenommene Stimme

Die Stimme wurde mit dem Versuchsaufbau des Oszilloskops aufgenommen. Dabei wurde die Visualisierung über den FFT-Modus vorgenommen. Die schönsten Ergebnisse sind unter Pfeifen entstanden, da diese eine spezifische Eigenfrequenz aufweisen und sich die Obertöne gut erkennen lassen. Dies sind die Frequenzen bei denen die Amplitude besonders hoch ist.

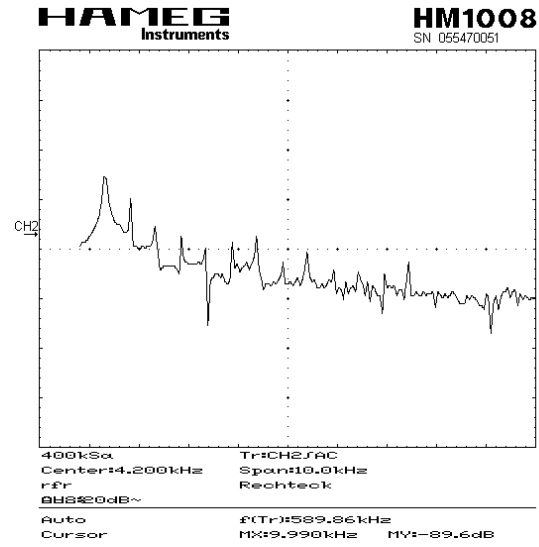


Abbildung III.3.: FFT der aufgenommenen Stimme (Pfeifen).

## 3.5. Invarianz der Frequenz

Die genutzte Frequenz des Generators hat keine Auswirkung auf die Schallgeschwindigkeit. Dies wurde qualitativ überprüft, indem die Frequenz des Generators auf 2kHz, 5kHz und 10kHz eingestellt wurde. Die Position der Resonanzstellen hat sich dabei nicht verändert. Dies bestätigt die Invarianz der Frequenz.

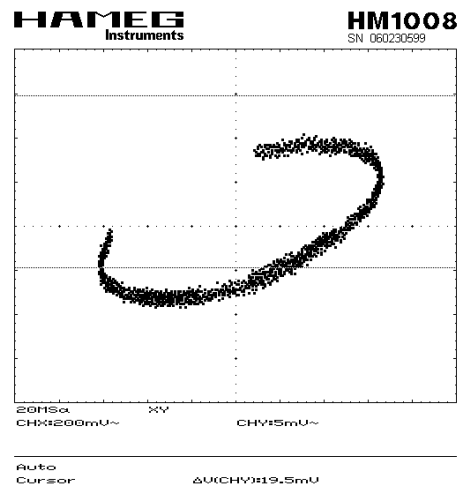


Abbildung III.4.: Resonanzstellen bei 2kHz.

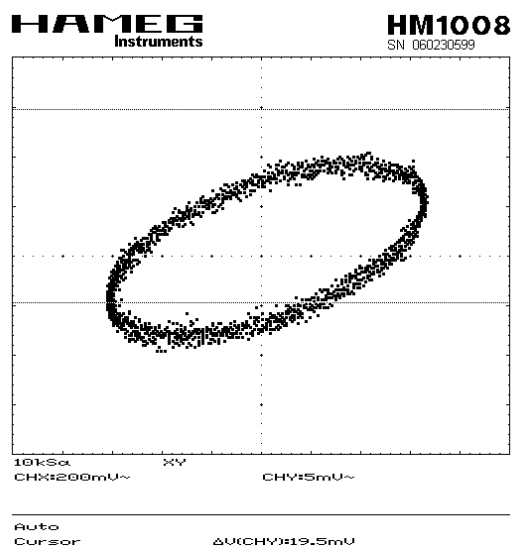


Abbildung III.5.: Resonanzstellen bei 5kHz.

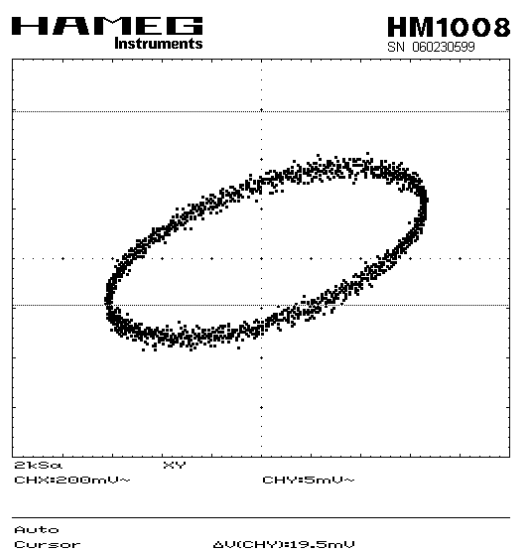


Abbildung III.6.: Resonanzstellen bei 10kHz.



## IV. Diskussion

### 4.1. Zusammenfassung

Im Experiment wurde die Schallgeschwindigkeit in Luft und Kohlenstoffdioxid bestimmt. Dazu kamen zwei Methoden zum Einsatz: das Quincke'sche Rohr und die Laufzeitmessung mit einem Oszilloskop.

Die theoretischen Schallgeschwindigkeiten ergeben sich nach

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{RT}{M}}$$

mit den Adiabatenkoeffizienten  $\kappa_{Luft} = 1,4$  und  $\kappa_{CO_2} = 1,3$ , der idealen Gaskonstante  $R = 8,314 \frac{J}{mol K}$ , der molaren Masse und  $T = 273,15 K$ . Daraus folgen:

$$c_{Luft, theo} = 331,11 \frac{m}{s}, \quad (1)$$

$$c_{CO_2, theo} = 259,03 \frac{m}{s}, \quad (2)$$

$$\frac{c_{Luft, theo}}{c_{CO_2, theo}} = 1,278. \quad (3)$$

Beim Quincke'schen Rohr wurde durch Variation der Wassersäule die Resonanzbedingung ermittelt, um aus den Abständen der Maxima die Wellenlänge und anschließend die Schallgeschwindigkeit zu berechnen. Für Luft und  $CO_2$  ergaben sich unter Normalbedingungen:

$$c_{0, Luft} = (360 \pm 30) \frac{m}{s}, \quad (4)$$

$$c_{0, CO_2} = (280 \pm 30) \frac{m}{s} \quad (5)$$

Das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten beträgt:

$$\frac{c_{0, Luft}}{c_{0, CO_2}} = 1,29 \pm 0,17 \quad (6)$$

In der Laufzeitmessung wurde die Zeitverschiebung zwischen Lautsprecher- und Mikrofonsignal im Oszilloskop analysiert. Die Schallgeschwindigkeit wurde für zwei Anzeigemodi bestimmt:

$$c_{0, Y-t} = (360 \pm 60) \frac{m}{s}, \quad (7)$$

$$c_{0, X-Y} = (362 \pm 104) \frac{m}{s} \quad (8)$$

Beide Methoden liefern konsistente Ergebnisse im Bereich von etwa  $c \approx 350 \frac{m}{s}$ , was gut mit dem Theoretischen Wert  $c_{theo} = 331 \frac{m}{s}$  bei  $0^\circ C$  übereinstimmt. Die Abweichungen liegen im Bereich statistischer Unsicherheiten. Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Schallgeschwindigkeit unabhängig von der Anregungsfrequenz ist.

### 4.2. Diskussion

Die gemessenen Werte stimmen innerhalb der Fehlergrenzen mit den theoretischen Referenzwerten überein. Für Luft ergibt sich eine signifikante Abweichung von  $\sigma = 0,31\sigma$ , für  $CO_2$  von  $\sigma = 0,24\sigma$ . Beide Werte liegen unterhalb der Signifikanzgrenze und zeigen somit keine systematische Abweichung. Das Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten beträgt  $\frac{c_{0, Luft}}{c_{0, CO_2}} = 1,29 \pm 0,17$ , was mit dem theoretischen Verhältnis 1,278 gut übereinstimmt. Die Abweichung liegt mit  $\sigma = 0,07\sigma$  im nicht signifikanten Bereich.

Die Messung mit dem Oszilloskop bestätigt die Ergebnisse des Quincke'schen Rors. Vergleicht man den Referenzwert  $c_{\text{Luft,theo}} = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  mit dem im X-Y-Modus bestimmten Wert  $c_{0,X-Y} = (362 \pm 104) \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , so ergibt sich ebenfalls keine signifikante Abweichung. Der Y-X-Modus zeigt mit Ablesefehler größere Unsicherheiten, da die beobachtete Phasenverschiebung  $180^\circ$  betrug. Damit verdoppelte sich der effektive Ablesefehler für eine volle Periode. Ohne diesen systematischen Fehler zeigt der Y-X-Modus jedoch eine deutlich höhere statistische Genauigkeit, da die Phasenlage präziser bestimmbar ist.

Im Abschnitt zur aufgenommenen Stimme wurde das Frequenzspektrum analysiert. Die auftretenden Obertöne sind Vielfache der Grundfrequenz und entstehen durch Resonanzen des Vokaltrakts. Sie bestimmen die Klangfarbe der Stimme, während die Grundfrequenz die Tonhöhe vorgibt.

Die Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit wurde durch Messungen bei 2 kHz, 5 kHz und 10 kHz untersucht. In allen Fällen ergab sich die gleiche Schallgeschwindigkeit. Dies liegt daran, dass sich Frequenz und Wellenlänge reziprok verhalten ( $c = \lambda \nu$ ). Erhöht sich die Frequenz, so verkleinert sich die Wellenlänge proportional, wodurch das Produkt konstant bleibt. Damit wurde die Invarianz der Schallgeschwindigkeit bestätigt.

samt sind die Ergebnisse physikalisch konsistent und bestätigen die theoretischen Modelle hinreichend genau.

### 4.3. Kritik

Die größten Fehlerquellen entstehen durch Ableseungenauigkeiten beim Bestimmen der Resonanzstellen und Phasenverschiebungen. Besonders im X-Y-Modus beeinflusst der doppelte Ablesefehler die Genauigkeit stark. Systematische Temperatur- oder Druckabweichungen wurden vernachlässigt, können aber ebenfalls Einfluss haben. Eine verbesserte Auswertung wäre durch digitale Signalverarbeitung oder automatische Phasenmessung möglich. Insge-

## Abbildungsverzeichnis

|        |   |    |
|--------|---|----|
| I.1.   | Aufbau des Quincke'schen Rohrs . . . . .                  | 8  |
| I.2.   | Stehende Welle . . . . .                                  | 8  |
| I.3.   | Resonanz im Quincke'schen Rohr . . . . .                  | 8  |
| I.3.   | Versuchsaufbau Oszilloskop . . . . .                      | 8  |
| III.1. | Beispiel eines Messwertes im Y-t-Modus bei 10kHz. . . . . | 13 |
| III.2. | Beispiel eines Messwertes im X-Y-Modus bei 10kHz. . . . . | 14 |
| III.3. | FFT der aufgenommenen Stimme (Pfeifen). . . . .           | 15 |
| III.4. | Resonanzstellen bei 2kHz. . . . .                         | 15 |
| III.5. | Resonanzstellen bei 5kHz. . . . .                         | 16 |
| III.6. | Resonanzstellen bei 10kHz. . . . .                        | 16 |

## Tabellenverzeichnis

|        |   |    |
|--------|---|----|
| I.1.   | Messung der Wasserpegelhöhe für die Resonanz in der Luft . . . . .          | 8  |
| I.2.   | Messung der Wasserpegelhöhe für die Resonanz in der $\text{CO}_2$ . . . . . | 8  |
| I.2.   | Mikrophon-Lautsprecher-Abstand (Yt) . . . . .                               | 8  |
| I.2.   | Mikrophon-Lautsprecher-Abstand (YX) . . . . .                               | 8  |
| III.1. | Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Quinche'schen Röhre. . . . .         | 12 |
| III.2. | Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Oszilloskop. . . . .                 | 14 |

## Literaturverzeichnis

- [Dem17] Jochen Demtröder. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 7 edition, 2017.
- [Wag25a] Dr. J. Wagner. *Physikalisches Praktikum PAP 1 für Studierende der Physik*, chapter 26. Universität Heidelberg, 2025.
- [Wag25b] Dr. J. Wagner. *Physikalisches Praktikum PAP 1 für Studierende der Physik*, pages 4–28. Universität Heidelberg, 2025.