

---

---

Versuch 26

21. September 2021

**Schallgeschwindigkeit**

Physikalisches Anfängerpraktikum I

Juan Provencio

Betreuer/in: Maroussia Leidner

---

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel des Versuches</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Schall . . . . .	2
2.2	Stehende Wellen . . . . .	3
2.3	Fortschreitende Wellen . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>4</b>
3.1	Materialen und Geräte . . . . .	4
3.2	Aufbau . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Messung und Auswertung</b>	<b>6</b>
4.1	Messprotokoll . . . . .	6
4.2	Auswertung . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion</b>	<b>10</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	10
5.2	Diskussion . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Quellen</b>	<b>11</b>

# 1 Ziel des Versuches

In diesem Versuch wollen wir die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien bestimmen. Dabei werden wir zusätzlich die im Versuch 25: Oszilloskop behandelten Funktionen eines Oszilloskops praktisch anwenden und mithilfe der Phasenverschiebung zweier Signalen die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Außerdem werden wir diese mithilfe eines Quinck'schen Rohrs messen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Schall

Als Schall erkennen wir die wellenförmige Verbreitung eines Tons im Raum. Hier ist spezifisch eine mechanische Welle gemeint, die sich mithilfe von Dichte- und Druckunterschiede fortbewegt. Diese Welle wird durch eine Vibration erzeugt. In Medien solche wie Luft, Wasser und festen Stoffen kann sich Schall longitudinal ausbreiten, das heißt, die Vibration der Welle parallel zur Richtung der Welle ist. In festen Stoffen kann sich Schall ebenfalls in transversalen Wellen ausbreiten, dann ist die Vibration senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

#### 2.1.1 Schallgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist durch viele Faktoren bestimmt. Wir haben vorhin schon angedeutet, dass das Medium dabei eine Rolle spielt. Dadurch, dass eine Schallwelle der Ausbreitung von Vibrationen in einem Medium entspricht, sind Medien mit besonderen Eigenschaften besser geeignet als andere. Beispielsweise gibt es im Vakuum nichts, was eine Schallwelle zum Vibrieren bringen kann. Insbesondere spielen Druck, Temperatur und Dichte eine wichtige Rolle, aber Feuchtigkeit, Elastizität und bei festen Stoffen die Wellenart können auch einen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben. In trockener Luft bei 20 °C ist beispielsweise die Schallgeschwindigkeit  $c = 340 \text{ m s}^{-1}$ . Bekanntlich die Frequenz  $\nu$  und die Wellenlänge  $\lambda$  einer Welle kann man ihre Geschwindigkeit  $c$  bestimmen als

$$c = \lambda \nu. \quad (1)$$

Außerdem lässt sich die Schallgeschwindigkeit in Gasen mit folgender Formel vorhersagen:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}}. \quad (2)$$

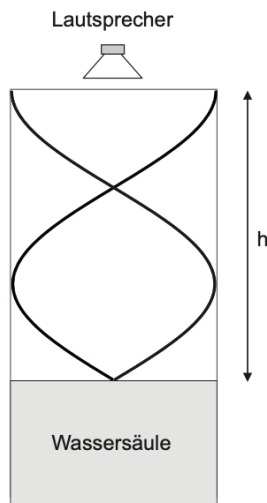
Dabei bezieht sich  $\kappa$  auf den Adiabatenkoeffizienten ( $\kappa_{\text{Luft}} = 1,40$ ,  $\kappa_{\text{CO}_2} = 1,30$ ),  $R$  auf die universelle Gaskonstante,  $T$  auf die Temperatur des Gases in Kelvin und  $M$  auf die Molekülmasse ( $M_{\text{Luft}} = 29 \text{ g mol}^{-1}$ ,  $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ g mol}^{-1}$ ).

Wir können die gemessene Schallgeschwindigkeit auf "Normalbedingungen", d.h.  $T = 0^\circ\text{C}$  umformen mit

$$\frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (3)$$

## 2.2 Stehende Wellen

Außer fortschreitenden Wellen, die sich räumlich in eine Richtung ausbreiten, gibt es zusätzlich stehende Wellen. Diese geben den Eindruck, räumlich fest zu bleiben, und sich nur in ihrer Amplitude zu ändern. Schwingungsknoten und Schwingungsbauchen ändern bei stehenden Wellen ihre Position nicht. Diese können durch Interferenz entstehen, indem zwei Wellen gleicher Frequenz und Amplitude sich gegenläufig ausbreiten. Wir benutzen dieses Phänomen, indem wir eine Wille gegen ein Wasserspiegel reflektieren. Dann können wir den Abstand vom Wasserspiegel bis zu einem beliebigen Maximum  $n$  bestimmen und daraus auf die Wellenlänge kommen.



Durch einfache Überlegungen schlussfolgern wir, dass die Höhe  $h$  zwischen dem Spiegel und dem Lautsprecher

$$h = \frac{2n+1}{4} \lambda \quad (4)$$

beträgt. Aus Messungen bei verschiedenen Maxima können wir die Wellenlänge  $\lambda$  bestimmen und mit ihr und der eingestellten Frequenz die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls bestimmen. Diese Messung beruht auf das Quinckesche Rohr, mit welchem wir in verschiedenen Medien die Interferenzerscheinun-

Abbildung 1: Stehende Welle gen beobachten können.  
im Quinckeschen Rohr

## 2.3 Fortschreitende Wellen

Die andere hier relevante Wellenart ist die fortschreitende Welle. Bei dieser breitet sich die Welle von einer Quelle aus in den Raum hinaus.

Um die Schallgeschwindigkeit mit fortschreitenden Wellen zu bestimmen legen wir einen Lautsprecher in einem Abstand  $h$  von einem Mikrophon. Mit einem Signalgenerator füttern wir den Lautsprecher und den Oszilloskop mit einer gleichen Signal. Vom Mikrophon her, wird das Signal phasenverschoben an den Funktionsgenerator weitergeleitet. Die Zeit, die das Signal braucht um vom Lautsprecher zum Mikrophon zu gelangen beträgt

$$\tau = \frac{h}{c}$$

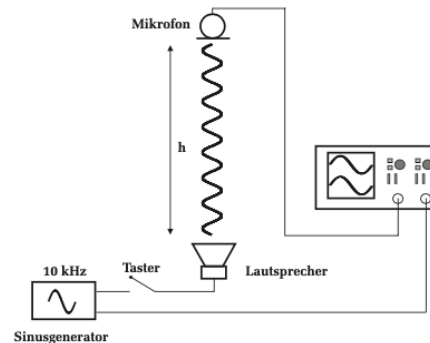


Abbildung 2: Aufbau zur Laufzeitmessung (5)

## 3 Versuchsaufbau

### 3.1 Materialien und Geräte

Quinckesches Rohr

- Steigrohr mit Stethoskop
- Ausgleichsgefäß für Wasser
- Lautsprecher mit Sinusgenerator
- Gasflasche mit Kohlendioxid, Reduzierventil, Drucktastenventil und Zuführungsschläuchen für das Gas; Streichhölzer zur Kontrolle

Laufzeitmessung

- Oszillograph HM 203
- Sinusgenerator mit den Frequenzen 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz
- Kasten mit Schalldämmung, darin eingebaut: Lautsprecher und ein verschiebbares Mikrophon

### 3.2 Aufbau

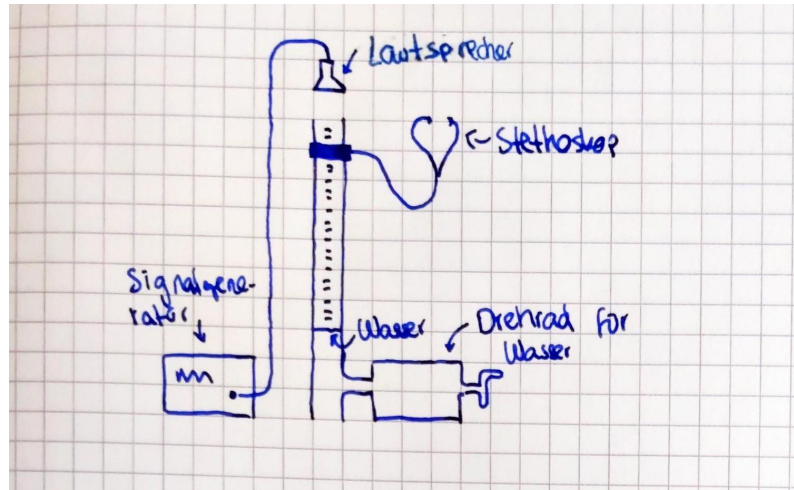


Abbildung 3: Quinckesches Rohr

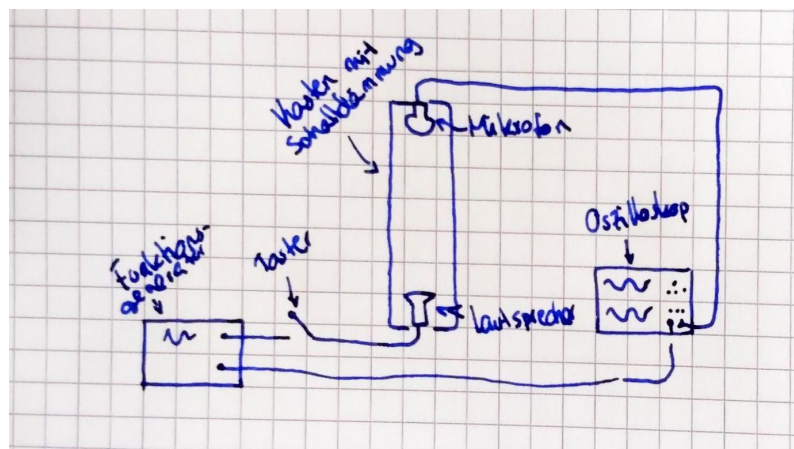


Abbildung 4: Laufzeitmessung

## 4 Messung und Auswertung

### 4.1 Messprotokoll

Messprotokoll V26 Schallgeschwindigkeit  
21.09.2021  
Mike Brandt  
Juan Provencio

Teilaufgabe 1: Quinck'sches Rohr

Der Funktionsgenerator wurde auf eine Frequenz von  $\nu = 2,181 \text{ kHz}$  eingestellt. Die Raumtemperatur beträgt  $T = (23,5 \pm 0,5)^\circ\text{C}$   
Wir finden die Lautstärke-Maxima

Tabelle 1: Wasserpegel bei Lautstärke-Maxima mit Luft

Messung	Länge $h_1$ [cm]	Länge $h_2$ [cm]	$\sigma_n$ [cm]
1	73,0	71,5	0,2
2	65,0	64,2	
3	57,0	56,4	
4	49,0	47,8	
5	41,0	40,8	
6	32,4	33,4	
7	25,0	24,8	
8	17,0	16,0	
9	9,5	8,6	
10	1,0	1,0	

Tabelle 2: Wasserpegel bei Lautstärke-Maxima mit  $\text{CO}_2$

Messung	Länge $h_1$ [cm]	Länge $h_2$ [cm]	$\sigma_n$ [cm]
1	57,5	57,5	0,2
2	51,3	51,4	
3	44,8	45,0	
4	38,7	39,0	
5	32,7	33,0	
6	26,8	26,5	
7	20,1	20,3	
8	14,3	14,3	

Abbildung 5: Messprotokoll



Fortsetzung Tabelle 2

9	7,6	8,2	0,2
10	1,5	2,0	

Teilaufgabe 3: Laufzeitmessung

Wir messen den Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon bei einer Phasenverschiebung von einer Periode.

Tabelle 3: Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon

Messung	Länge $l_1$ [cm]	Länge $l_2$ [cm]	$\Delta l$ [cm]
1	28,5	28,5	
2	25,1	25,1	
3	21,6	21,5	
4	18,1	18,1	3,1
5	14,6	14,6	
6	11,1	11,2	
7	7,6	7,6	
8	4,1	4,1	

Die eingestellte Frequenz war  $\nu = 10 \text{ kHz}$

Abbildung 6: Fortsetzung Messprotokoll

## 4.2 Auswertung

### 4.2.1 Quinckesches Rohr

Aus den gemessenen Höhendifferenzen bilden wir zunächst den Mittelwert nach

$$\bar{h}_{\text{Luft}} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} \Delta h_i = 7,91667 \text{ cm} \quad (6)$$

Den Fehler berechnen wir als den Fehler des Mittelwertes:

$$\sigma_{\bar{h}_{\text{Luft}}} = \sqrt{\frac{1}{18 \cdot 17} \sum_{i=1}^{18} (\Delta h_i - \bar{h}_{\text{Luft}})^2} = 0,13 \text{ cm} \quad (7)$$

Dabei bezeichnen wir mit  $\Delta h_i$  die Höhenunterschiede zwischen den Werten der zugehörigen Messung. Aus insgesamt 20 Messungen erhalten wir also 18 Höhenunterschiede. Die Werte dafür kann man aus Tabelle 1 des Messprotokolls 5 entnehmen. Insgesamt erhalten wir

$$\bar{h}_{\text{Luft}} = (7,92 \pm 0,13) \text{ cm}. \quad (8)$$

Analog erhalten wir für  $\text{CO}_2$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = (6,19 \pm 0,07) \text{ cm}. \quad (9)$$

Die mittlere Höhendifferenz entspricht einer halben Wellenlänge, also können wir nach Gleichung (1) und der eingestellten Frequenz die Schallgeschwindigkeit bei den gegebenen Umweltsbedingungen bestimmen:

$$c_{\text{Luft}} = \nu \cdot \lambda = \nu \cdot 2\bar{h}_{\text{Luft}} \quad (10)$$

$$= 2,181 \text{ kHz} \cdot 2 \cdot 7,92 \text{ cm} \quad (11)$$

$$= (345 \pm 6) \text{ m s}^{-1} \parallel \quad (12)$$

Der Fehler wurde mittels einfacher Gaußscher Fehlerfortpflanzung wie folgt berechnet:

$$\sigma_{c_{\text{Luft}}} = \nu \cdot 2\sigma_{\bar{h}_{\text{Luft}}} = 0,6 \text{ m s}^{-1} \quad (13)$$

Ebenfalls erhalten wir mit  $\text{CO}_2$

$$c_{\text{CO}_2} = (270 \pm 3) \text{ m s}^{-1} \parallel \quad (14)$$

Unter "Normalbedingungen" lässt sich die Schallgeschwindigkeit in den Medien nach Gleichung (3) bestimmen. Dabei beträgt

$$c_{0\text{Luft}} = c_{\text{Luft}} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (15)$$



$$= 345 \text{ m s}^{-1} \sqrt{\frac{273,15 \text{ K}}{296,7 \text{ K}}} \quad (16)$$

$$= (331 \pm 5) \text{ m s}^{-1} \parallel \quad (17)$$

Der Fehler wurde zuerst als relativer Fehler nach

$$\frac{\sigma_{c_{0\text{Luft}}}}{c_{0\text{Luft}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{c_{\text{Luft}}}}{c_{0\text{Luft}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \quad (18)$$

berechnet. Analog lässt sich die Schallgeschwindigkeit unter Normalbedingungen bei  $\text{CO}_2$  bestimmen:

$$c_{0\text{CO}_2} = (259,3 \pm 2,9) \text{ m s}^{-1} \parallel \quad (19)$$

Theoretisch hätten wir nach Gleichung (2) folgende Werte erhalten müssen:

$$c_{0\text{Luft,theo}} = \sqrt{\frac{\kappa_{\text{Luft}} RT}{M_{\text{Luft}}}} = 331,119 \text{ m s}^{-1} \quad (20)$$

$$c_{0\text{CO}_2,theo} = \sqrt{\frac{\kappa_{\text{CO}_2} RT}{M_{\text{CO}_2}}} = 259,038 \text{ m s}^{-1} \quad (21)$$

Man kann am Verhältnis der beiden erkennen, dass sich Schall in der Luft

$$\frac{c_{0\text{Luft}}}{c_{0\text{CO}_2}} = 1,278 \quad (22)$$

1,278 Mal schnell bewegt als in  $\text{CO}_2$ .

#### 4.2.2 Laufzeitmessung

Bei der Laufzeitmessung entspricht der Unterschied zwischen zwei Längen der Wellenlänge. Wir berechnen den Mittelwert davon wie in der letzten Teilaufgabe. Die Daten können der Tabelle 3 im Messprotokoll 6 entnommen werden.

$$\bar{\lambda} = (3,486 \pm 0,018) \text{ cm} \quad (23)$$

Mit dieser Wellenlänge und der im Messprotokoll angegebenen Frequenz von  $\nu = 10 \text{ kHz}$  lässt sich mittels Gleichung (1) die Schallgeschwindigkeit, hier in Luft, bestimmen.

$$c_{\text{Luft},2} = (348,6 \pm 1,8) \text{ m s}^{-1} \parallel \quad (24)$$

Unter Normalbedingungen wäre die Schallgeschwindigkeit hier

$$c_{0\text{Luft},2} = (334,5 \pm 1,7) \text{ m s}^{-1} \parallel \quad (25)$$

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

### 5.1 Zusammenfassung

Aus zwei unterschiedlichen Prinzipien und Wellenarten ließ sich die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Der erste Weg beruht auf die Entstehung von stehenden Wellen bei der Reflektierung einer Welle auf einer Oberfläche. Bei dieser Art von Welle entstehen auf feste Positionen Wellenknoten und Wellenbauchen. Hier wird in einem mit einem Medium gefüllten Rohr eine Welle ausgebreitet, die gegen ein Wasserspiegel reflektiert. Durch Interferenz entstehen die Bauchen und Knoten. Mit einem Stethoskop hört man beim Erhöhen des Wasserpegels und notiert, wann man glaubt ein Lautstärkemaximum gefunden zu haben. Der Abstand zweier Maxima entspricht einer halben Wellenlänge. Mit bekannter Wellenlänge und Frequenz lässt sich die Schallgeschwindigkeit bestimmen.

Das zweite Prinzip beruht auf einen "direkteren" Weg die Schallgeschwindigkeit zu bestimmen. Dabei wird ein gleiches Signal zeitverzögert an ein Oszilloskop geschickt, einerseits mit einer vernachlässigbaren Zeitverzögerung direkt an das Gerät, und andererseits wird sie zuerst über einen Lautsprecher an einen Mikrofon gesendet, der wiederum das Signal an das Oszilloskop weiterleitet. Durch Einstellung des Abstands zwischen Mikrofon und Lautsprecher lässt sich die Zeitverschiebung, bzw. die Phasenverschiebung adjustieren, so dass man merhmals den Abstand einer Wellenlänge messen kann.

### 5.2 Diskussion

Zur Diskussion wollen wir erstens die erhaltenen Werte für die Schallgeschwindigkeit unter Normalbedingungen mit den theoretischen Werte vergleichen. Dies machen wir tabellarisch und zur Berechnung benutzen wir die Formel für die  $\sigma$ -Abweichung

$$\frac{|c - c_{\text{Lit}}|}{\sigma_c} \quad (26)$$

Obwohl die Messungen nicht selbstständig durchgeführt worden sind, widersprechen diese Ergebnisse meinen Erwartungen. Am Oszilloskop könnte man nämlich sehr genau erkennen, wann der Mikrofon um genau eine Wellenlänge verschoben war, dies erkennen wir auch an den deutlich kleineren Fehler des Mittelwertes bei  $\bar{\lambda}$  als bei den Fehlern bei  $\bar{h}$ . Die Messungen im Quinckeschen Rohr beruhen darauf, dass man alleine durch den auditiviten sinn die

	Experimentell [ $\text{m s}^{-1}$ ]	Theoretisch [ $\text{m s}^{-1}$ ]	$\sigma$
$c_{0\text{Luft}}$	$331 \pm 5$	331,119	0,03
$c_{0\text{CO}_2}$	$259,3 \pm 2,9$	259,038	0,1
$c_{0\text{Luft},2}$	$334.5 \pm 1,7$	331,119	2

Tabelle 1: Vergleich experimentelle und theoretische Werte

Lautstärkemaxima findet, was meiner Meinung nach weniger zuverlässig im Vergleich zur Laufzeitmessung wäre. Im Prinzip können wir diese Erwartungen in den angegebenen Fehlern erkennen: Die Größen bei der Messung im Quinckeschen Rohr sind mit größeren Fehlern behaftet als bei der Laufzeitmessung, jedoch zeigen diese einen viel kleineren absoluten Unterschied zu den theoretischen Werten und weichen um viel kleinere  $\sigma$ -Bereiche von diesen ab.

Mögliche Gründe für diese Diskrepanz könnte die Anzahl an Messungen sein. Für die Messungen im Quinckeschen Rohr hatten wir jeweils 18 Datenpunkte zur Verfügung zur Berechnung der mittleren Höhe, bei der Laufzeitmessung nur 14. Trotzdem zeigte sich die Laufzeitmessung als die "genauere" Methode angesichts des Fehlers.

Ohne den Versuch selber durchgeführt zu haben ist ein Urteil über menschliche Fehlerquellen schwer zu treffen. Vermutlich hat aber Herr Wagner ein sehr gutes Ohr. Respekt dafür.

## 6 Quellen

Wagner, J., Universität Heidelberg (2021). Physikalisches Praktikum PAP1 für Studierende der Physik B.Sc., 81-86.