

# Versuch 14 - Kundtsches Rohr

## **Zusammenfassung**

Dieser Versuch gestattet zum einen die Messung der Schallgeschwindigkeit und erlaubt es ausserdem, das interessante Phänomen stehender Schallwellen sichtbar zu machen. Der Versuch stellt zwei Methoden vor, welche eine Messung der Schallgeschwindigkeit in festen und in gasförmigen Stoffen gestatten.

# 1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Stimmgabel	1
einseitig geschlossenes Rohr	1
Korkmehl	
Frequenzgenerator	1
Lautsprecher	1

Tabelle 1: Versuchszubehör

## 2 Theorie

### 2.1 Das Grundprinzip der Messung

Unsere Methoden zur Messung der Schallgeschwindigkeit  $c$  beruhen auf einer Messung der Wellenlänge  $\lambda$  der Schallwelle. Damit lässt sich zusammen mit der Frequenz  $\nu$  der Schallwelle die Schallgeschwindigkeit  $c$  berechnen. Es gilt:

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

### 2.2 Repetition von Grundbegriffen

An dieser Stelle wollen wir einige Grundbegriffe repetieren, die für das Verständnis des Versuchs notwendig sind.

#### Welle

Zunächst wollen wir uns die Frage stellen, was eine Welle ist. Dazu betrachten wir ein einfaches Pendel, welches um seine Gleichgewichtslage schwingt, sofern es ausgelenkt wird. Was passiert nun, wenn wir mehrere Pendel in einer Reihe plazieren und miteinander verbinden, und dann das erste Pendel aus der Gleichgewichtslage auslenken? Das zweite Pendel wird anfangen zu schwingen, dann das dritte usw., bis sich die Schwingung über die gesamte Reihe ausgebreitet hat. Eine solche Bewegung des Schwingungszustandes, von einem Ort zum anderen, ist eine Welle. Masse wird bei diesem Vorgang nicht transportiert. Die einzelnen schwingenden Teilchen schwingen ausschliesslich um ihre Gleichgewichtslage, die Gesamtheit aller Teilchen führt aber durch ihre Wechselwirkung untereinander eine räumlich periodische Schwingung aus. Es kommt daher zu einem Energie- und Impulsübertrag, ohne dass sich die Teilchen im Mittel aus ihrer Gleichgewichtslage entfernen. Wir verstehen unter einer Welle also eine räumliche und zeitliche periodische Störung. Sie ist durch bestimmte Grössen charakterisiert.

- **Frequenz**  $\nu$ : sie gibt uns an, wie oft pro Zeiteinheit ein Massenelement eine Schwingung um seine Gleichgewichtslage durchführt.
- **Wellenlänge**  $\lambda$ : sie ist bestimmt durch den Abstand von Wellenberg zu Wellenberg (bzw. von Wellental zu Wellental).

- **Amplitude:** sie gibt an, wie stark das Teilchen aus seiner Gleichgewichtslage ausgelenkt wird.

Es gibt zwei verschiedene Arten von Wellen; die Transversalwelle und die Longitudinalwelle. Bei der Transversalwelle erfolgt die Auslenkung der Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, bei der Longitudinalwelle parallel zur Ausbreitungsrichtung. Die beiden Wellenarten sind in Abbildung 1 dargestellt.

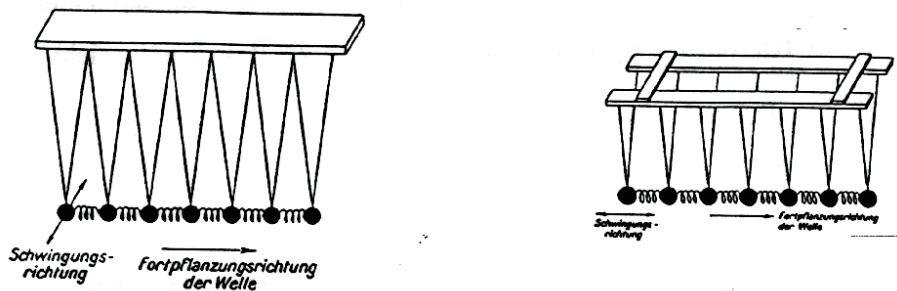


Abbildung 1: Beispiel für eine Transversal- und eine Longitudinalwelle

Für die Geschwindigkeit der Welle gilt:

$$c = \lambda \nu \quad (2)$$

### Schallwelle

In unserem Experiment ist die Schallwelle von Interesse. Es handelt sich hierbei um eine Longitudinalwelle. Eine Transversalwelle wäre in Gasen und Flüssigkeiten aufgrund fehlender Kopplung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gar nicht möglich. Es handelt sich deshalb um eine Kompressionswelle, da bei einer longitudinalen Auslenkung der Gasmoleküle die Kräfte durch Druckänderungen zustande kommen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle hängt stark von den elastischen Eigenschaften des betrachteten Mediums ab. Da diese wiederum mehr oder weniger stark temperaturabhängig sind, hängt auch die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur ab.

### Stehende Welle

Eine stehende Welle zeichnet sich dadurch aus, dass alle Teilchen des Mediums an allen Orten in Phase schwingen. Es existieren Orte, wo die Teilchen maximal ausgelenkt werden (Schwingungsbäuche) und Orte, wo die Teilchen in Ruhe sind (Schwingungsknoten). Es findet kein Energietransport statt.

Stehende Wellen entstehen durch die Überlagerung von laufenden Wellen, was man durch Reflexion einer Welle an einer Wand erreichen kann. Wesentlich ist, dass stehende Wellen nur für bestimmte Frequenzen existieren, welche durch die Randbedingungen bestimmt sind. Der Abstand von Knoten zu Knoten bzw. von Bauch zu Bauch entspricht gerade der halben Wellenlänge.

## Resonanz

Ein schwingungsfähiges System lässt sich durch eine sich periodisch verändernde äussere Kraft zum Schwingen anregen. Wieviel Energie das Schwingungssystem dabei aufnimmt, hängt von der Frequenz der anregenden Kraft ab. Regt man mit einer bestimmten Frequenz, der sog. Eigenfrequenz des Systems, an, wird der Energieübertrag maximal - es kommt zu Resonanz.

## 3 Experiment

### 3.1 Das QUINCK'sche Resonanzrohr

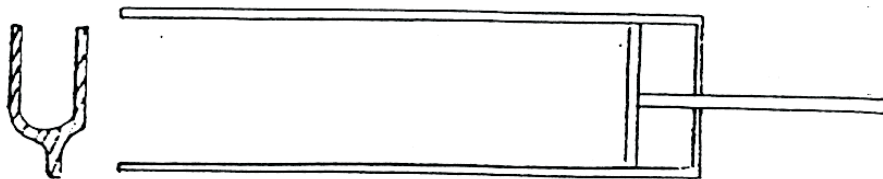


Abbildung 2: Versuchsaufbau des QUINCK'schen Resonanzrohrs

Gegeben sei ein einseitig geschlossenes Rohr, dessen Länge durch einen verschiebbaren Boden variierbar ist, siehe Abbildung 2. Wird vor das offene Ende eine angeregte Stimmgabel von bekannter Frequenz gehalten und die Rohrlänge verändert, so kann bei bestimmten Luftsäulenlängen ein Mittönen der Luftsäule wahrgenommen werden. Dies liegt daran, dass die Stimmgabel bei gewissen Rohrlängen die Luftsäule zu Eigenschwingungen anzuregen vermag (Resonanz).

Bei welchen Längen dies geschehen kann, wird durch die **Randbedingungen** bestimmt. Diese besagen, dass am geschlossenen Ende ein Schwingungsknoten und beim offenen Ende ein Schwingungsbauch liegt. Anschaulich kann man sich dies wie folgt vorstellen: ein Anströmen der Luftmoleküle gegen das geschlossene Ende der Röhre muss einen Druckanstieg, das Wegströmen einen Druckabfall zur Folge haben. Es liegt an diesem Ende also ein Schwingungsknoten vor. Beim offenen Ende steht dem An- und Wegströmen der Teilchen nichts entgegen, hier liegt also ein Schwingungsbauch vor.

Der Zusammenhang zwischen der Länge  $L$  der Luftsäule und der Wellenlänge der stehenden Welle  $\lambda_L$  ist gegeben durch:

$$L = n \frac{\lambda_L}{2} + \frac{\lambda_L}{4} = \frac{2n+1}{4} \lambda_L, \quad (3)$$

für  $n = 0, 1, 2, \dots$  Daraus ergibt sich, dass man bei den Luftsäulenlängen

$$L = \frac{\lambda_L}{4}, \quad \frac{3\lambda_L}{4}, \quad \frac{5\lambda_L}{4}, \quad \dots \quad (4)$$

ein Mitschwingen der Luftsäule wahrnehmen sollte.

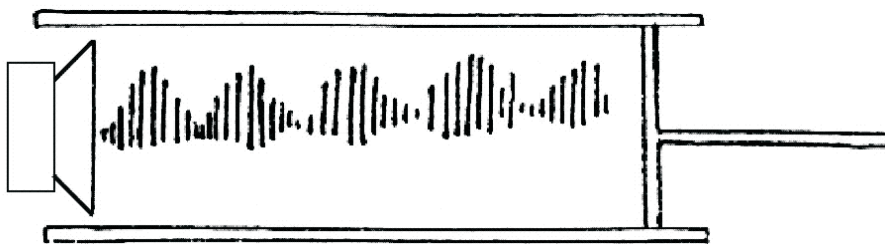


Abbildung 3: Versuchsaufbau des KUNDT'schen Rohres

### 3.2 Das KUNDT'sche Rohr

Ein einseitig geschlossenes, gasgefülltes, zylindrisches Glasrohr wird als Resonator verwendet, siehe Abbildung 3. Am einen Ende ist der Lautsprecher angebracht. Der Boden des Glasrohres wird nun gleichmässig mit einer dünnen Schicht Korkmehl belegt. Eine Wechsellspannung am Lautsprecher ersetzt die Membrane in Schwingungen. Diese Schwingungen werden abgestrahlt auf die Gas- oder Luftsäule übertragen.

Bei geeigneter Frequenz (eine Frequenzverschiebung wird einerseits durch Vergrösserung oder Verkleinerung des Glaszylinders andererseits durch direkte Verstellung am Frequenzgenerator erreicht) wird im Glasrohr eine stehende Welle erzeugt, welche sich im Korkmehl als regelmässige Aufhäufung abbildet. Man spricht von Kundt'schen Staubfiguren.

Dieser Abbildungsvorgang geht folgendermassen vor sich: eine stehende Welle bildet sich nur dann scharf aus, wenn die Länge der Luftsäule in der Röhre gerade gegeben ist durch:

$$L_L = n \frac{\lambda_L}{2}, \quad (5)$$

für  $n = 1, 2, \dots$ . Ist dies erfüllt, so bleibt die Luft an den Knotenstellen in Ruhe, d.h. das Korkmehl wird sich nicht bewegen. Dort wo aber die Schwingungsbäuche liegen, wird das Korkmehl infolge der starken Luftbewegung aufgewirbelt und kann erst dort absinken, wo die Knoten liegen. Die Strecke zwischen zwei Korkmehlhäufchen entspricht daher der halben Wellenlänge der erzeugten stehenden Welle. Für die Schallgeschwindigkeit in Luft (oder im Gas) in der Röhre gilt dann:

$$c_L = \nu \lambda_L \quad (6)$$

### 3.3 Aufgaben

#### Achtung

- Den Frequenzgenerator immer auf 1 W Sinusschwingung betreiben, da sonst die Gefahr besteht den Lautsprecher oder den Generator zu beschädigen.
- Vor Umschalten des Frequenzbereichs den Ausgangspegel auf Null (im Gegenuhreigersinn) drehen.

#### 1. Das Quinck'sche Resonanzrohr

- Errege die Stimmgabel durch Anschlagen auf das dafür vorgesehene Brett und halte sie vor das Rohr. Variiere dabei die Rohrlänge, um die Resonanz einmal wahrzunehmen.
- Ziehe den Stempel bis zum Anschlag heraus und zähle beim Variieren der Länge die Lautstärkemaxima (Resonanzen), welche im Abstand  $\frac{\lambda_L}{2}$  liegen. Miss die Länge aus, welche zwischen der ersten und der letzten Resonanz liegt.
- Berechne daraus die Schallgeschwindigkeit in Luft.

*Bemerkung:* Anstelle der Schallgeschwindigkeit in Luft  $c_L$  kann mit diesem Versuch bei bekanntem  $c_L$  auch die Frequenz des Erregers bestimmt werden.

#### 2. Das KUNDTsche Rohr

- Nimm das Glasrohr aus der Halterung heraus und bringe etwas Korkmehl hinein.
- Verteile das Korkmehl durch schnelle kreisende Bewegungen längs der Rohrachse entlang des ganzen Rohres.
- Setze das Rohr in die Halterung ein und drehe das Rohr etwas aus, damit das Pulver nicht ganz in der Talsohle liegt.
- Bringe den Lautsprecher vor dem Rohr in Position. Schalte den Frequenzgenerator an und wähle eine bestimmte Frequenz.
- Verändere durch Verschieben des Stabes die Rohrlänge, bis Du auf Resonanzen stösst.
- Miss die Knotenabstände und wiederhole die Messung  $L_n(\nu)$  mit immer wieder neuerzeugten Staubfiguren.
- Wiederhole die Messung mit 20 anderen Frequenzen.
- Stelle nun bestimmte Längen ein und suche jeweils die niedrigsten 5 passenden Resonanz-Frequenzen  $\nu_n(L)$ . Trage dann in einem Diagramm die Wellenlänge gegen die reziproke Frequenz auf (Steigung ist c).
- Stelle einen Zusammenhang zwischen der Frequenz, Knotenabständen und der Rohrlänge her.
- Berechne die Schallgeschwindigkeit.
- Erstelle eine Fehlerrechnung.

## A Das Kundt'sche Rohr als Gegenstand zeitgenössischer Forschung

Auf den ersten Blick scheint mit den obigen Erklärungen alles Wesentliche über das Kundt'sche Rohr gesagt worden zu sein. Betrachtet man aber die erzeugten Staubfiguren etwas näher, so findet man, dass zwischen den Korkmehlansammlungen dünne Korkmehlrippen liegen.

Die Form und der Abstand der Rippen untereinander hängen von der Amplitude und der Frequenz der stehenden Welle im Rohr ab. Es zeigt sich, dass die Rippen aus dünnen Wänden von Staubkörnern gebildet werden. Der Ort der Rippen ist im Allgemeinen nicht fest, so dass man beobachten kann, wie einige um ihre Gleichgewichtslage schwingen oder zu wandern beginnen.

Durch welche Kräfte diese Rippen hervorgerufen werden und welche Parameter für ihr Verhalten massgebend sind, ist bis heute Gegenstand der Diskussion. Im wesentlichen wird heute versucht, mit Hilfe der Strömungslehre diese Erscheinung zu erklären. Für Interessierte findet sich in der Bibliothek des Physikalischen Instituts (1. Stock) ein Artikel über das Kundt'sche Rohr in der Zeitschrift *Physical Review*, **37** (1931) 1155.