

## Velocidad del sonido en el aire

### GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE ONDAS ESTACIONARIAS DE SONIDO EN UN TUBO DE KUNDT.

- Generación de ondas estacionarias en un tubo de Kundt con ambos extremos cerrados.
- Medición de la frecuencia fundamental en dependencia con la longitud del tubo de Kundt.
- Medición de las frecuencia fundamental y de los armónicos superiores con longitud constante.
- Determinación de la velocidad de la onda partiendo de las frecuencias de resonancia.

UE1070320

06/16 UD

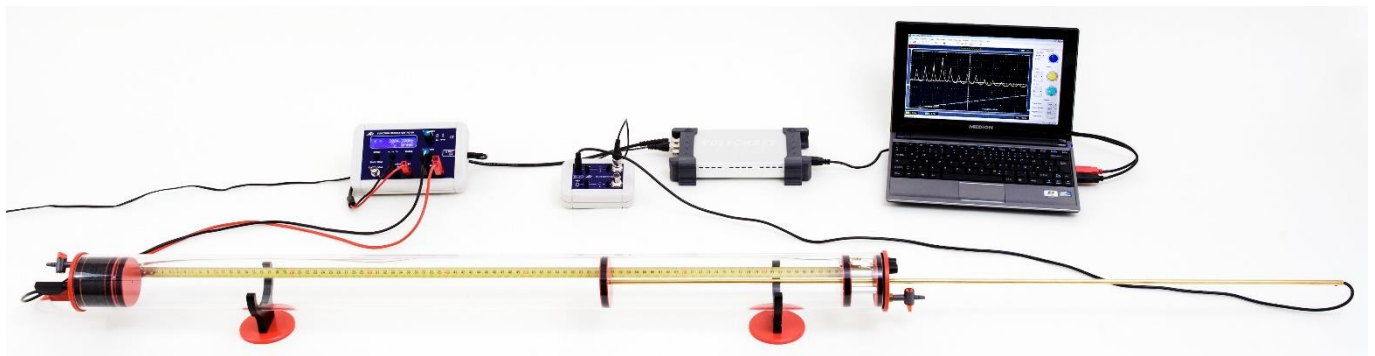


Fig. 1: Disposición de medición.

### FUNDAMENTOS GENERALES

En un tubo de Kundt se pueden generar ondas de sonido estacionarias utilizando un altavoz en un extremo del tubo para producir ondas de sonido de frecuencia de resonancia apropiada, las cuales se reflejan en una pared al otro extremo del tubo. Conociendo la longitud del tubo se puede determinar la velocidad de la onda a partir de la frecuencia de resonancia y del número de armónicos.

Las ondas de sonido se propagan en el aire y en otros gases como variaciones rápidas de presión y densidad. En la forma más sencilla, se describen por medio de una presión del sonido la cual está superpuesta a la presión atmosférica. Alternativamente a la presión de sonido  $p$  se puede utilizar también la rapidez  $v$  del sonido para la descripción de una onda de sonido, es decir, la velocidad media de las partículas en el punto  $x$  en el medio oscilante en el instante  $t$ . La presión del sonido y su rapidez están enlazados entre sí, p. ej. Por medio de la ecuación de movimiento de Euler:

$$(1) \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$

$\rho_0$ : Densidad del gas

En el tubo de Kundt, las ondas de sonido se propagan a lo largo de su longitud. Se pueden por lo tanto describir por medio de una ecuación de onda en una dimensión, la cual vale tanto para la presión del sonido como para su rapidez, así que se obtiene:

$$(2) \quad \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{resp.}$$

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2}$$

$c$ : speed of sound

En el experimento se consideran ondas armónicas que se reflejan al extremo del tubo de Kundt.

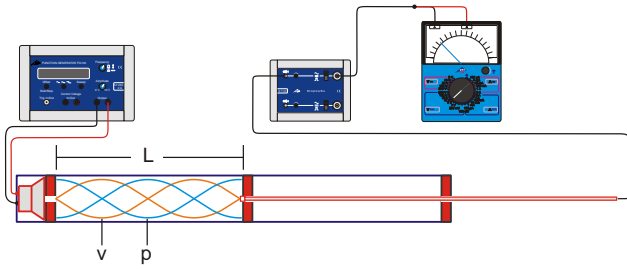


Fig. 2: Representación esquemática del montaje experimental

Como soluciones de la ecuación de onda se consideran las superposiciones de las ondas de ida y de la reflejada:

$$(3) \quad p = p_{0>} \cdot e^{2\pi i \left( f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right)} + p_{0<} \cdot e^{2\pi i \left( f \cdot t + \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$$v = v_{0>} \cdot e^{2\pi i \left( f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right)} + v_{0<} \cdot e^{2\pi i \left( f \cdot t + \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$p_{0>}, v_{0>}$ : Amplitudes de la onda de ida,  
 $p_{0<}, v_{0<}$ : Amplitudes de la onda reflejada  
 $f$ : Frecuencia,  $\lambda$ : Longitud de onda

Teniendo

$$(4) \quad f \cdot \lambda = c.$$

Llevando estas soluciones a la ecuación (1) y teniendo en cuenta por separado la onda de ida de la onda reflejada se obtiene la relación

$$(5) \quad p_{0>} = v_{0>} \cdot Z \text{ bzw. } p_{0<} = v_{0<} \cdot Z.$$

La magnitud

$$(6) \quad Z = c \cdot \rho_0$$

se conoce como la impedancia caracterísca del sonido y corresponde a la resistencia ondulatoria del medio. Ésta juega un papel importante en el estudio de reflexiones de una onda sonora en una pared con impedancia de pared igual a  $W$ :

Se tiene

$$(7) \quad r_v = \frac{v_{0<}}{v_{0>}} = \frac{Z - W}{Z + W} \text{ and } r_p = \frac{p_{0<}}{p_{0>}} = \frac{\frac{1}{Z} - \frac{1}{W}}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{W}}$$

En el experimento  $W$  es muchísimo mayor que  $Z$  y por lo tanto  $r_v = 1$  y  $r_p = -1$ .

Para simplificar, se asume la pared en  $x = 0$  y a partir de (3) se deduce para la parte espacial de la onda de sonido:

$$(8) \quad p = p_{0>} \cdot \left( e^{-2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} + e^{+2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

$$= 2 \cdot p_{0>} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

y

$$v = v_{0>} \cdot \left( e^{-2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} - e^{+2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

$$= -2 \cdot i \cdot v_{0>} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

Realidad física se encuentra sólo en la parte real de estos términos. Ellos corresponden a ondas estacionarias cuya presión de sonido en la pared (es decir en  $x = 0$ ) presenta un vientre de oscilación mientras la rapidez muestra un nodo de oscilación. Además, la presión está adelantada en un desplazamiento de fase de  $90^\circ$ .

A una distancia  $L$  de la pared se generan las ondas de sonido por medio de un altavoz que oscila con la frecuencia  $f$ . Allí también se crea a su vez un vientre de la presión y un nudo de la rapidez. Estas condiciones de entorno se cumplen sólo cuando  $L$  es un múltiplo entero de media longitud de onda:

$$(9) \quad L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}$$

Debido a (3), por lo tanto, las frecuencias deben cumplir la condición de resonancia:

$$(10) \quad f_n = n \cdot \frac{c}{2 \cdot L}.$$

### LISTA DE APARATOS

|   |  |                        |
|---|--|------------------------|
| 1 | Tubo de Kundt E                                      | 1017339 (U8498308)     |
| 1 | Sonda de micrófono, larga                            | 1017342 (U8498282)     |
| 1 | Caja de micrófono @230V                              | 1014520 (U8498283-230) |
| ó |  |                        |
| 1 | Caja de micrófono @115V                              | 1014521 (U8498283-115) |
| 1 | Generador de funciones FG 100 @230V                  | 1009957 (U8533600-230) |
| ó |  |                        |
| 1 | Generador de funciones FG 100 @115V                  | 1009956 (U8533600-115) |
| 1 | Osciloscopio USB 2x50 MHz                            | 1017264 (U112491)      |
| 1 | Multímetro analógico Escola 100                      | 1013527 (U8557380)     |
| 2 | Cables de AF, BNC / Clavija de 4-mm                  | 1002748 (U11257)       |
| 1 | Par de cables de experimentación de seguridad, 75 cm | 1002849 (U13812)       |
| 1 | Cable de AF  | 1002746 (U11255)       |

### MONTAJE Y REALIZACIÓN

- Se erige el tubo de sonido utilizando los pies soporte (fig. 1).
- Secuencialmente se introducen en el tubo de sonido, a ras entre sí, primero el disco capilar y luego la tapa de cierre que lleva casquillos de conexión para altavoz.
- Se introduce, primero la sonda de micrófono larga hasta el tope a través de la tapa con perforaciones para la barra calefactora y luego el disco guía.
- El disco de sonda se atornilla en la sonda de micrófono larga.
- Se introduce en el tubo de sonido la tapa de cierre que lleva los casquillos de conexión para la barra calefactora junto a la sonda de micrófono larga y el disco de sonda atornillado.

**Observación:**

Si es necesario, se aplica un poco de glicerina o jabón en los anillos de empaque, para hacer más fácil la colocación.

- La escala movable se sujeta en el soporte de los pies de apoyo y se desplaza de tal forma que la marca cero concuerde con el borde delantero del disco capilar.
- Los casquillos de salida del generador de funciones se conectan en el par de casquillos para la alimentación del altavoz.
- La sonda de micrófono larga se conecta en la entrada canal A de la caja de micrófono.
- La salida canal A de la caja de micrófono se conecta en el multímetro analógico por medio de un cable de adaptación BNC / 4-mm.
- La fuente de alimentación enchufable se conecta en la caja de micrófono y luego a la red.

En el experimento se varía la frecuencia  $f$  continuamente mientras la sonda de micrófono mide la presión del sonido en la pared de reflexión. Cuando se ha llegado a la resonancia la señal del micrófono muestra la máxima amplitud.

**Frecuencia fundamental en dependencia con la longitud**

- Sacando o metiendo la sonda de micrófono se ajusta una longitud de  $L = 80$  cm entre el disco capilar y el disco de sonda.
- La amplitud en el generador de funciones y el alcance de medida en el multímetro se ajustan apropiadamente entre sí y si es necesario se adaptan durante la medición. Se tiene en cuenta la potencia máxima del altavoz ( $U_{\text{eff}} = 6$  V max.).
- Se ajusta la frecuencia en 150 Hz y luego se eleva el nivel lentamente. Se encuentra la frecuencia para la cual el multímetro muestra *el primer valor máximo* y se anota este valor de la frecuencia en la Tab. 1.

Esta frecuencia, así encontrada, corresponde a la frecuencia  $f_1$  de la oscilación fundamental para  $L = 80$  m.

- La longitud  $L$  entre el disco capilar y el disco de sonda se ajusta en pasos de 10 cm hasta  $L = 10$  cm y en cada paso se repite la medición. Como frecuencia de inicio cada vez se toma la frecuencia de resonancia  $f_1$  de la medición anterior.

**Frecuencias de las oscilaciones fundamental y armónica con longitud fija**

- Sacando o metiendo la sonda de micrófono se ajusta una longitud de  $L = 60$  cm entre el disco capilar y el disco de sonda.
- La amplitud en el generador de funciones y el alcance de medida en el multímetro se adaptan entre sí en forma apropiada y si es necesario se adaptan nuevamente durante la medición. Se tiene en cuenta la potencia máxima del altavoz ( $U_{\text{eff}} = 6$  V max.).
- Lentamente se eleva la frecuencia desde 250 Hz hasta 3500 Hz. Se anotan en la Tab. 2 las frecuencias para las cuales el multímetro muestra valores máximos.

**Barrido de frecuencias**

- Sacando o metiendo la sonda de micrófono se ajusta una longitud de  $L = 60$  cm entre el disco capilar y el disco de sonda.
- La salida canal A de la caja de micrófono se conecta en el canal CH1 del osciloscopio USB por medio de un cable de AF.
- El par de casquillos "Entrada de tensión de control / Salida rampa" del generador de funciones se conecta directamente en el CH2 del osciloscopio USB.
- En el generador de funciones se pulsa la tecla "Sweep" y se ajustan los parámetros:

|                      |          |
|----------------------|----------|
| Freq. start          | 100 Hz   |
| stop                 | 6000 Hz  |
| int. continuous mode |          |
| Time                 | 4,00 sec |

- En el osciloscopio USB la marca para la posición horizontal de Trigger del canal CH1 se lleva totalmente a la izquierda, la marca posición-y del CH1, partiendo del centro, media cuadrícula hacia abajo y la marca de la posición-y del CH2 totalmente hacia abajo, se ajustan los siguientes parámetros:

|              |           |
|--------------|-----------|
| Time/DIV     | 400 ms    |
| CH1          | 1,00 V DC |
| CH2          | 2,00 V DC |
| Trigger Mode | Edge      |
| Sweep        | Auto      |
| Source       | CH2       |
| Slope        | -         |
| Level        | 850 mV    |

- Se inicia el Sweep en el generador de funciones y se espera hasta se muestre el espectro de frecuencias completo en el osciloscopio USB.
- Se detiene la medición pulsando el botón de control "Stop" en el osciloscopio USB y se toma una foto de la pantalla.

### EJEMPLO DE MEDICION Y EVALUACIÓN

Tab. 1: Frecuencias determinadas de la oscilación fundamental ( $n = 1$ ) y las longitudes de onda calculadas con la ecuación (9) para diferentes longitudes  $L$ .

| $L / m$ | $f_1 / \text{Hz}$ | $\lambda_1 = 2 \cdot L$ |
|---------|-------------------|-------------------------|
| 0,8     | 218               | 1,60 m                  |
| 0,7     | 250               | 1,40 m                  |
| 0,6     | 292               | 1,20 m                  |
| 0,5     | 350               | 1,00 m                  |
| 0,4     | 436               | 0,80 m                  |
| 0,3     | 583               | 0,60 m                  |
| 0,2     | 884               | 0,40 m                  |
| 0,1     | 1768              | 0,20 m                  |

Tab. 2: Frecuencias de resonancia encontradas para la oscilación fundamental y los armónicos y las longitudes de onda calculadas según la ecuación (9) para una longitud fija de  $L = 0,6 \text{ m}$ .

| $n$ | $f_n / \text{Hz}$ | $\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$ |
|-----|-------------------|-----------------------------------|
| 1   | 289               | 1,20 m                            |
| 2   | 582               | 0,60 m                            |
| 3   | 876               | 0,40 m                            |
| 4   | 1164              | 0,30 m                            |
| 5   | 1453              | 0,24 m                            |
| 6   | 1746              | 0,20 m                            |
| 7   | 2039              | 0,17 m                            |
| 8   | 2331              | 0,15 m                            |
| 9   | 2623              | 0,13 m                            |
| 10  | 3206              | 0,12 m                            |
| 11  | 3494              | 0,10 m                            |

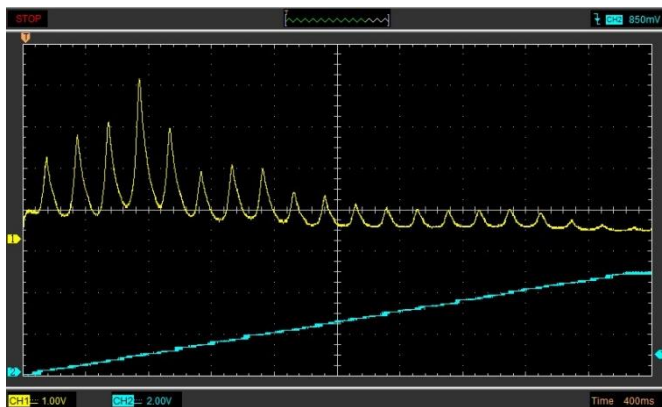


Fig. 3: Oscilograma del barrido de frecuencias,  $L = 0,6 \text{ m}$ .

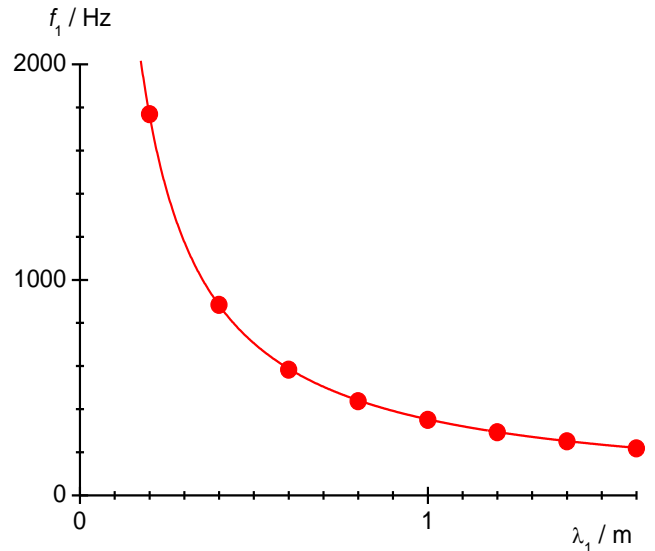


Fig. 4: Diagrama de frecuencias contra longitudes de onda para las oscilaciones fundamentales ( $n = 1$ ) con diferentes longitudes  $L$ .

#### Frecuencia fundamental en dependencia con la longitud

Según la ecuación (9) a las frecuencias de resonancia  $f_1$  encontradas corresponden las longitudes de onda:

$$(11) \lambda_1 = 2 \cdot L.$$

- Se calculan las longitudes de onda según la ecuación (11) y se anotan en la Tab. 1.
- Las frecuencias de resonancia encontradas y las longitudes de onda calculadas (Tab. 2) se representan en un diagrama  $f-\lambda$ . (Fig. 4).
- Una función de hiperbólica se adapta entre los puntos de medida:

$$(12) f_1 = a \cdot \frac{1}{\lambda_1}.$$

La adaptación comprueba la ecuación (4). La velocidad del sonido en el aire es igual a la pendiente  $a$ :

$$(13) c = a = 353 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

El valor se desvía en un 2% aprox. respecto al valor bibliográfico de  $c = 346 \text{ m/s}$  para  $T = 25^\circ\text{C}$ .

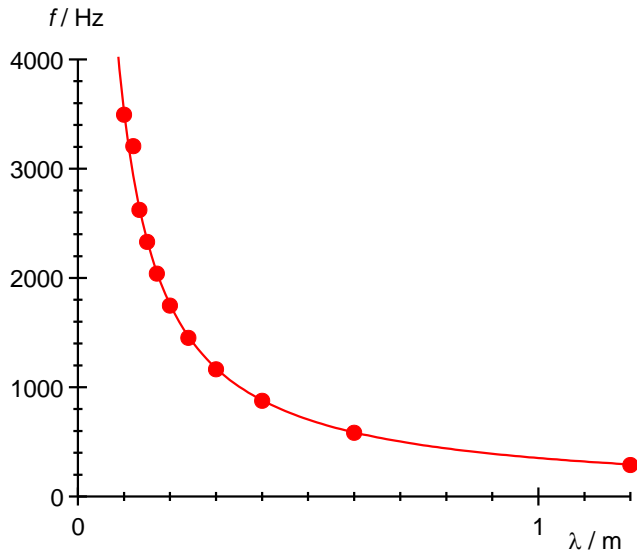


Fig. 5: Diagrama Frecuencia-longitudes de onda para las oscilaciones fundamental y armónicas para  $L = 0,6$  m.

### Frecuencias para las oscilaciones fundamental y armónicas con longitud fija

De acuerdo con la ecuación (9), las frecuencias de resonancia  $f_n$  determinadas deben tener las longitudes de onda:

$$(14) \lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n} .$$

- Se calculan las longitudes de onda de acuerdo con la ecuación (14) y se anotan en la Tab. 2.
- Las frecuencias de resonancia encontradas y las longitudes de onda calculadas (Tab. 2) se representan en un diagrama  $f \cdot \lambda$  (Fig. 5).
- Una función hiperbólica se adapta entre los puntos de medida:

$$(15) f = a \cdot \frac{1}{\lambda} .$$

La adaptación comprueba la ecuación (4). La velocidad del sonido en el aire es igual a la pendiente  $a$ :

$$(16) c = a = 356 \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

El valor se desvía en un 3% aprox. respecto al valor bibliográfico de  $c = 346$  m/s para  $T = 25^\circ\text{C}$ .

### Barrido de frecuencias

Los tiempos  $t_n$  en los cuales se dan los máximos del barrido de frecuencias se pueden determinar con la ayuda de los cursores del osciloscopio USB. Estos tiempos no corresponden a los períodos de oscilación  $T_n$ , los cuales pertenecen a las frecuencias de resonancia  $f_n$ . Las frecuencias de resonancia se pueden calcular de los parámetros del barrido de frecuencias como se indica a continuación:

$$(17) f_n = f_{\text{start}} + \frac{t_n}{T_{\text{sweep}}} \cdot (f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}) = 100 \text{ Hz} + \frac{t_n}{4 \text{ s}} \cdot 5900 \text{ Hz} .$$

De ellos se puede volver a calcular la velocidad del sonido como se describe arriba.

