

TAREFAS

- Geração de ondas sonoras estáticas em tubo de Kundt com ambas extremidades fechadas.
- Medição da frequência fundamental em dependência do comprimento do tubo de Kundt.
- Medição das frequências de oscilações fundamentais e superiores com comprimento fixo.
- Determinação da velocidade de onda a partir das frequências de ressonância.

OBJETIVO

Geração e medição de ondas sonoras estáticas em tubo de Kundt

RESUMO

As ondas sonoras se espalham em gases como ondas longitudinais. A velocidade do grupo corresponde à velocidade da fase. Na experiência, são geradas ondas estáticas no tubo de Kundt com ambas extremidades fechadas e a frequência fundamental é medida em dependência do comprimento do tubo, assim como as frequências da oscilação fundamental e superior com comprimento fixo do tubo. A velocidade das ondas é calculada a partir das frequências de ressonância e representada graficamente.

APARELHOS NECESSÁRIOS

Número	Instrumentos	Artigo Nº
1	Tubo de Kundt E	U8498308
1	Sonda microfona, longa	U8498282
1	Caixa de microfona (115 V, 50/60 Hz)	U8498283-115 ou
	Caixa de microfona (230 V, 50/60 Hz)	U8498283-230
1	Gerador de funções FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	U8533600-230 ou
	Gerador de funções FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	U8533600-115
1	Osciloscópio USB 2x50 MHz	U112491
1	Multímetro analógico AM50	U17450
1	Cabo HF, BNC / conector de 4 mm	U11257
1	Par de cabos de segurança para experiências, 75 cm	U13812
1	Cabo HF	U11255

FUNDAMENTOS GERAIS

Em um tubo de Kundt, podem ser geradas ondas estáticas, gerando-se ondas sonoras com frequência sonora adequada com auxílio de um alto-falante em uma extremidade do tubo que são refletidas na outra extremidade em uma parede. Com comprimento conhecido do tubo, pode-se determinar a velocidade da onda a partir da frequência de ressonância e do número das harmônicas.

Ondas sonoras espalham-se no ar e em outros gases como rápidas alterações de pressão e densidade. Elas são descritas mais simplesmente com auxílio da pressão sonora, que é sobreposta à pressão atmosférica. Alternativamente à pressão sonora  $p$  também pode ser utilizada, para a descrição da onda

sonora, a velocidade do som  $v$ , ou seja, a velocidade média das partículas no local  $x$  no meio oscilante no momento  $t$ . Pressão sonora e velocidade do som são conectadas, por exemplo, pela equação de movimento de Euler

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

$\rho_0$ : densidade do gás.

No tubo de Kundt, as ondas sonoras se espalham ao longo do tubo. Elas podem, assim ser descritas com auxílio de uma equação de onda unidimensional, que vale tanto para a pressão sonora quanto para a velocidade sonora:

$$(2) \quad \begin{aligned} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} &= c^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \text{ ou} \\ \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} &= c^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \end{aligned}$$

$c$ : velocidade do som

Na experiência, são observadas ondas harmônicas refletidas na extremidade do tubo de Kundt. Como soluções da equação de ondas, devem ser, assim, observadas as sobreposições de ondas de partida e de regresso:

$$(3) \quad \begin{aligned} p &= p_{0>} \cdot e^{2\pi i \left( f t - \frac{x}{\lambda} \right)} + p_{0<} \cdot e^{2\pi i \left( f t + \frac{x}{\lambda} \right)} \\ p_{0>}, v_{0>} &: \text{amplitudes da onda de partida,} \\ p_{0<}, v_{0<} &: \text{amplitudes da onda de regresso} \\ f &: \text{frequência, } \lambda: \text{comprimento de onda,} \end{aligned}$$

Sendo

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

Colocando-se estas soluções na equação (1), obtém-se, com observação separada de ondas de partida e de regresso, a relação

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

A grandeza

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

é chamada de impedância acústica característica e corresponde à resistência das ondas do meio. Ela tem papel importante na observação das reflexões de uma onda sonora em uma parede com impedância de parede  $W$ . Vale

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

Na experiência,  $W$  é substancialmente maior que  $Z$ , portanto,  $r_v = 1$  e  $r_p = -1$ . Se imaginarmos, para simplificar, a parede como  $x = 0$ , então, a partir de (3) resulta, para a parte espacial da onda sonora:

$$(8) \quad \begin{aligned} p &= p_{0>} \cdot \left( e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} + e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t} \\ &= 2 \cdot p_{0>} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t} \\ v &= v_{0>} \cdot \left( e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} - e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t} \\ &= -2 \cdot i \cdot v_{0>} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t} \end{aligned}$$

Somente as partes reais destes termos têm realidade física. Elas correspondem a ondas sonoras estáticas, cuja pressão sonora apresenta um ventre de oscilação na parede (ou seja, em  $x = 0$ ), enquanto a velocidade sonora tem

ali um nó de oscilação. Além disso a velocidade ultrapassa a pressão por um deslocamento de fase de  $90^\circ$ .

Na distância  $L$  em relação à parede, as ondas sonoras são geradas com auxílio de um alto-falante, que oscila com a frequência  $f$ . Ali, também se forma um ventre de oscilação da pressão e um nó de oscilação da velocidade sonora. Estas condições acessórias somente podem ser satisfeitas se  $L$  for um múltiplo inteiro da metade do comprimento da onda:

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

Por conta de (3), as frequências devem então satisfazer a condição de ressonância

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

Na experiência, a frequência  $f$  do alto-falante é variada continuamente, enquanto uma sonda microfona mede a pressão sonora na parede de reflexão. A ressonância é alcançada quando o sinal do microfone apresentar amplitude máxima.

ANÁLISE

Conforme (9), pertencem às frequência de ressonância  $f_n$  a serem determinadas, os comprimentos de onda  $\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$ .

Para a confirmação de (3) e para a determinação da velocidade das ondas, estes valores são representados em um diagrama  $f \cdot \lambda$ .

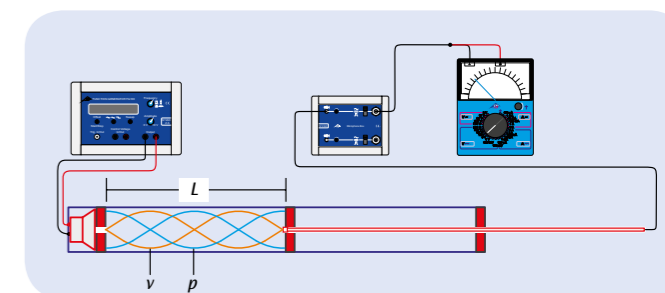


Fig. 1: Representação esquemática da montagem da experiência

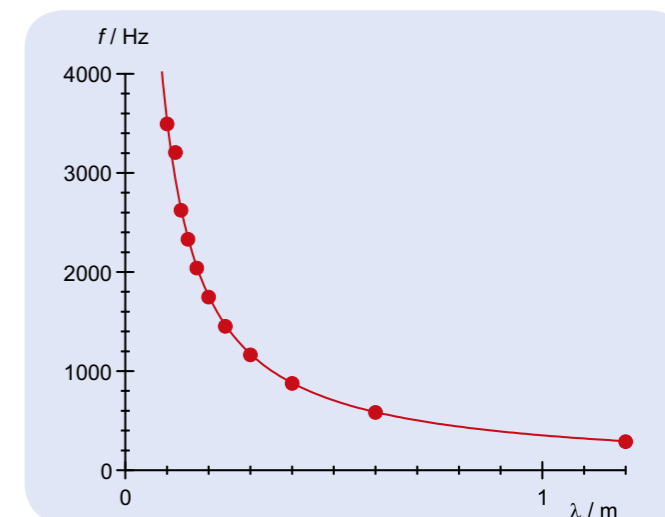


Fig. 2: Diagrama frequência-comprimentos de onda

