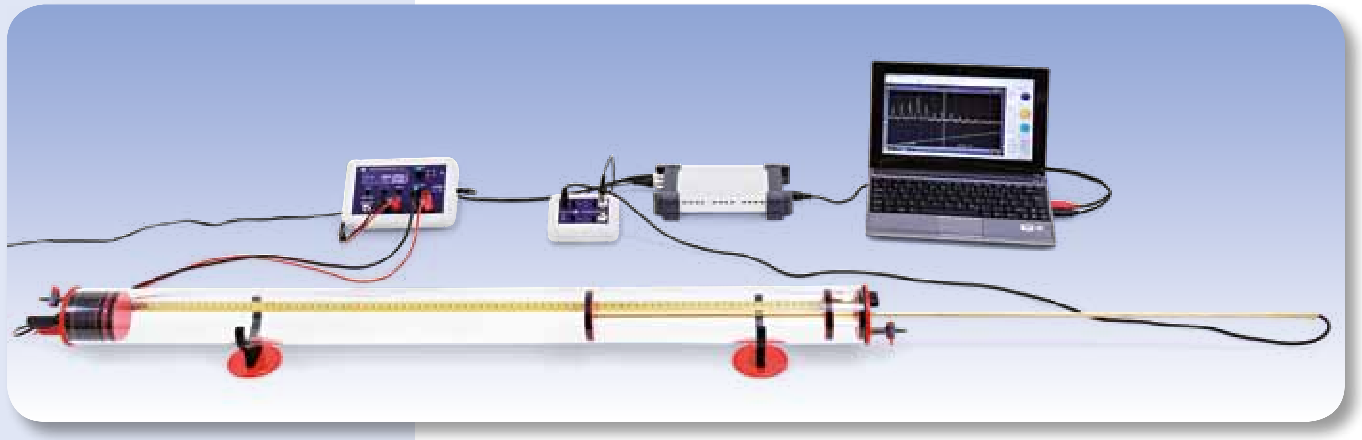
VITESSE DU SON DANS L'AIR



EXERCICES

- **Générer des ondes stationnaires sonores dans un tube de Kundt fermé des deux côtés.**
- **Mesurer la fréquence de base en fonction de la longueur du tube de Kundt.**
- **Mesurer les fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique avec une longueur de tube fixe**
- **Déterminer la vitesse d'onde à partir des fréquences de résonance.**

OBJECTIF

Générer et mesurer les ondes stationnaires sonores dans un tube de Kundt

RESUME

Dans les gaz, les ondes sonores se propagent sous forme d'ondes longitudinales. La vitesse de groupe coïncide à la vitesse de phase. Au cours de l'expérience, on génère des ondes stationnaires dans un tube de Kundt fermé des deux côtés et on mesure la fréquence de base en fonction de la longueur du tube ainsi que les fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique à une longueur de tube fixe. La vitesse d'onde est calculée à partir des fréquences de résonance, puis représentée sous forme graphique.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Tube de Kundt E	1017339
1	Sonde à microphone, à long	1017342
1	Amplificateur de microphone (115 V, 50/60 Hz)	1014521 ou
	Amplificateur de microphone (230 V, 50/60 Hz)	1014520
1	Générateur de fonctions FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957 ou
	Générateur de fonctions FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscope USB 2x50 MHz	1017264
1	Multimètre analogique AM50	1003073
1	Cordon HF, BNC / douille 4 mm	1002748
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm	1002849
1	Cordon HF	1002746

GENERALITES

Dans un tube de Kundt, on peut, à l'aide d'un haut-parleur, générer des ondes stationnaires en produisant des ondes sonores qui présentent une fréquence de résonance adéquate et qui sont réfléchies à l'autre extrémité d'une paroi. En connaissant la longueur du tube, on peut déterminer la vitesse des ondes à partir de la fréquence de résonance et du numéro de l'harmonique.

1

Dans l'air et dans d'autres gaz, les ondes sonores se propagent sous forme de modifications rapides de pression et de densité. Le plus simple est de les décrire à l'aide de la pression acoustique, qui se superpose à la pression atmosphérique. Comme variante à la pression acoustique p, on peut aussi se servir de la vitesse acoustique v pour décrire une onde sonore, c'est-à-dire la vitesse moyenne des particules à l'endroit x dans le fluide oscillant au moment t. La pression et la vitesse acoustiques sont corrélées par ex. par l'équation de mouvement d'Euler

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

ρ_0 : densité du gaz

Dans le tube de Kundt, les ondes sonores se propagent le long du tube. Elles peuvent donc être décrites par une équation d'onde unidimensionnelle qui s'applique tant à la pression qu'à la vitesse acoustique :

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

c : vitesse du son

Dans l'expérience, on observe des ondes harmoniques qui sont réfléchies à l'extrémité du tube de Kundt. Comme solutions de l'équation d'onde, on observe donc les superpositions d'ondes incidentes et réfléchies.

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

$p_0>$, $v_0>$: amplitudes de l'onde incidente,
$p_0<$, $v_0<$: amplitudes de l'onde réfléchie,
f : fréquence, λ : longueur d'onde,

Avec

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

En appliquant ces solutions à l'équation (1) et en considérant séparément les ondes incidentes et réfléchies, on obtient le rapport suivant :

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

La grandeur

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

est l'impédance acoustique caractéristique qui correspond à l'impédance caractéristique du fluide. Elle joue un rôle important lorsqu'on observe les réflexions d'une onde sonore contre une paroi d'une impédance W :

Dans ce cas :

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

Dans l'expérience, W est sensiblement supérieure à Z et, par conséquent, $r_v = 1$ et $r_p = -1$.

Si, pour des raisons de simplicité, on imagine la paroi à $x = 0$, il résulte de (3) pour la part spatiale de l'onde sonore :

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

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

et

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

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

La réalité physique ne retient que les parts réelles de ces termes qui correspondent à des ondes stationnaires sonores dont la pression acoustique contre la paroi (donc à $x = 0$) présente un anti-nœud, tandis que la vitesse acoustique y montre un nœud. En outre, la vitesse précède la pression d'un déphasage de 90°.

Dans l'écart L avec la paroi, les ondes sonores sont générées au moyen d'un haut-parleur qui oscille à la fréquence f. Là, la pression forme également un anti-nœud et la vitesse acoustique un nœud. Ces conditions ne peuvent être réunies que si L constitue un multiple entier d'une demi-longueur d'onde :

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

Par conséquent, en raison de (3), les fréquences doivent remplir la condition de résonance

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

Dans l'expérience, la fréquence f du haut-parleur varie en permanence, tandis qu'une sonde microphonique mesure la pression acoustique sur la paroi de réflexion. La résonance est obtenue lorsque le signal microphonique présente une amplitude maximale.

EVALUATION

Conformément à (9), les longueurs d'onde font partie des fréquences de résonance f_n déterminées

$$\lambda_n=\frac{2\cdot L}{n}\,.$$

Pour confirmer (3) et déterminer la vitesse d'onde, ces valeurs sont représentées dans un diagramme f-λ.

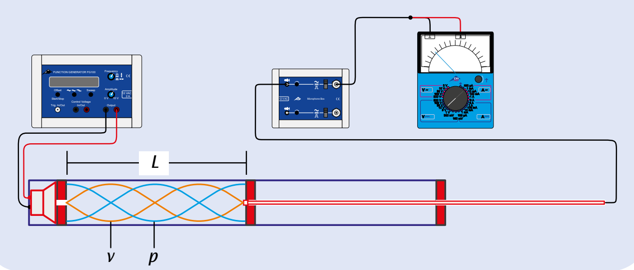


Fig. 1 Représentation schématique du montage expérimental

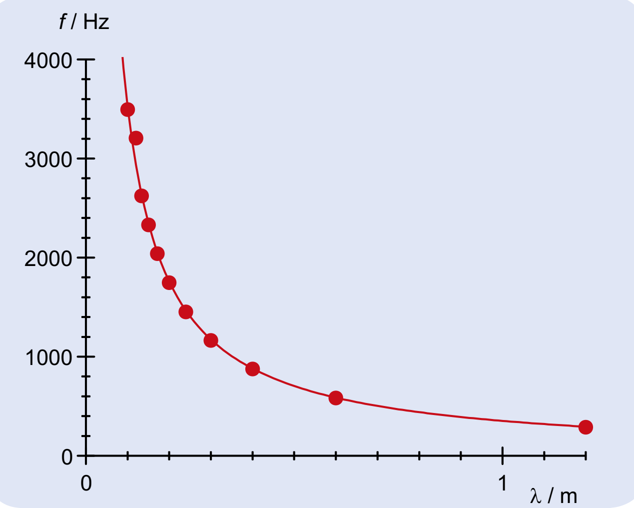


Fig. 2 Diagramme fréquence / longueurs d'onde