21. Übung zu Physik SS 2020

Ausgabe:12.05.2020 Prof. D. Suter

1. Mechanische Wellen

(a) Nennen Sie mindestens zwei Eigenschaften mechanischer Wellen.
(b) Erläutern Sie anhand einer der genannten Eigenschaften, wie die Lärmbelastung durch den Straßenverkehr gemindert werden kann.

(a) Mechanische Wellen breiten sich gleichförmig aus und werden an Hindernissen reflektiert. Sie werden auch gebeugt, gebrochen und überlagern sich.

(b) Beim Bau von Lärmschutzwänden wird unter anderem die Eigenschaft genutzt, dass mechanische Wellen reflektiert werden. Dabei wird darauf geachtet, dass eine diffuse Reflexion eintritt und somit der Lärm in alle möglichen Richtungen und nicht nur in eine bestimmte Richtung reflektiert wird.

2. Schallreflexion und -transmission

Musik aus einem Lautsprecher wird senkrecht auf eine Betonwand gerichtet. Die Dichte des Betons wird zu ρ_B = 2400 kg/m^3 und der Elastizitätsmodul zu E_B = 3·10^{10} N/m^2 angenommen. Der Kompressionsmodul der Luft betrage K_L = 1,42·10^5 Pa und die Luftdichte sei ρ_L = 1.2 kg/m^3

(a) Welcher Anteil der Schallintensität wird reflektiert und welcher Anteil geht in die Wand über?

(b) Wie groß ist der Anteil der Intensität, der im hinter der Wand liegenden Raum ankommt? Geben Sie die Abschwächung dieser Betonwand in dB an. Absorption soll vernachlässigt werden.

(c) Wieso hört man trotz der relativ guten Schalldämpfung einer Betonwand häufig auch die nicht zu laute Musik des Nachbarn?

(a) Aus den Angaben lassen sich die Schallgeschwindigkeiten für Luft und Beton berechnen (Kapitel 6.3.7):

$$v_L = \sqrt{\frac{K_L}{\rho_L}} \approx 344\, m/s$$

$$v_B = \sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}} \approx 3536\, m/s$$

Die Schallhärte oder Schallimpedanz berechnet sich aus Schallgeschwindigkeit mal Massendichte (Kapitel 6.2.3):

$$Z_L = v_L \cdot \rho_L \approx 412.8\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s \cdot m^2}}$$

$$Z_B = v_B \cdot \rho_B \approx 8.49 \cdot 10^6\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s \cdot m^2}}$$

An der Grenzschicht Luft-Beton wird von der ursprünglichen Intensität I_0 ein Anteil

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(Z_L - Z_B)^2}{(Z_L + Z_B)^2} \approx 0.9998$$

reflektiert und ein Anteil

$$\alpha_t = 1 - \alpha_r = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4 Z_L Z_B}{(Z_L + Z_B)^2} \approx 1.94 \cdot 10^{-4}$$

transmittiert (Kapitel 6.4.1).

(b) In dem hinter der Wand liegenden Raum gibt es natürlich dann eine zweite Luft-Beton Grenzschicht, an der auf Grund der Symmetrie dieselben Anteile reflektiert, bzw. transmittiert werden. Die gesamte Schallintensität, die von dem ersten Raum in den zweiten gelangt ist dann

$$I = I_0 \cdot \alpha_t^2 = 3.78 \cdot 10^{-8} I_0$$

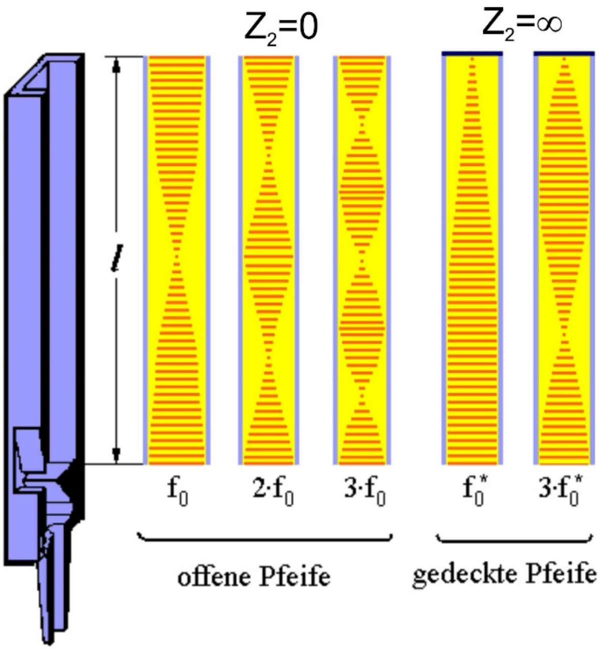
Die Schalldämpfung in dB ist entsprechen (Kapitel 6.2.6)

$$R = 10 \cdot log_{10} \frac{I}{I_0} = -74{,}2 \text{ dB}$$

(c) Weil der Lautsprecher nicht in der Luft schwebt, wird der Schall nicht nur über die Luft übertragen. Es findet auch eine Übertragung von der Membran auf das Gehäuse und von dort entweder direkt auf die Wand statt oder indirekt über Schrank/Tisch auf Boden und Wand. Die Schallimpedanzen all dieser Festkörper sind wesentlich besser angepasst, sodass der transmittierte Anteil viele Größenordnungen grösser ist. Und obwohl eventuell deutlich mehr Grenzflächen zu überwinden sind, wird auf diesem Wege ein nicht unerheblicher Anteil der Schallintensität transmittiert.

3. Pfeife

Zeigen Sie, dass man bei einer gedeckten Pfeife nicht die Oktave zum Grundton erzeugen kann.



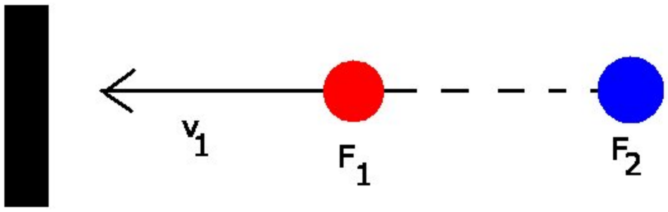
Wie die Schwingungsbilder zeigen (Kapitel 6.2.6), gibt es bei der gedeckten Pfeife nur die Eigenfrequenzen f_0^*, $3f_0^*, 5f_0^*$ usw. (dabei ist f_0^* die Eigenfrequenz der Grundschwingung der gedeckten Pfeife). Damit man die Oktave spielen kann, müsste eine Eigenschwingung die doppelte Frequenz einer anderen Eigenschwingung besitzen. Dies ist bei der gedeckten Pfeife nicht möglich (wohl aber bei der offenen Pfeife).

4. Dopplereffekt

Fledermäuse orientieren sich mit Hilfe von Ultraschallsignalen. Eine von zwei Fledermäusen F_1 fliegt mit einer Geschwindigkeit von v_1=10 m/s frontal auf eine Wand zu, wobei sie Ultraschallsignale mit einer Frequenz von 50 kHz abgibt. Eine zweite Fledermaus F_2 sitzt in Fluchtlinie zur ersten Fledermaus auf einem Baum und hört zu. Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt c = 330 m/s.

(a) Welche Frequenzen hört die Fledermaus F_1 und welche Frequenzen hört die Fledermaus F_2?

(b) Welche Frequenzen hören die beiden Fledermäuse, wenn sich die Wand mit der Geschwindigkeit v_W=1 m/s auf die Fledermäuse zu bewegt?



(a) Die Geschwindigkeit der Fledermaus F_1 ist $v_{Quelle} = v_1 = 10\ m/s$ und ihre Senderfrequenz $\nu_0 = 50\ kHz$. Betrachten wir zunächst die Fledermaus F_2. Sie bewegt sich nicht, also ist $v_{Beobachter,2} = 0$. Sie hört einmal die direkt von F_1 kommenden Frequenzen. Diese sind durch (Kapitel 6.4.4)

$$\nu_1 = \frac{\nu_0}{1 + \frac{v_{Quelle}}{c}}$$

gegeben. Die Wand wirkt als Empfänger der Frequenz

$$\nu_2 = \nu_0 \cdot \left(1 - \frac{v_{Quelle}}{c}\right)$$

Diese Wellen werden reflektiert und ebenfalls von F_2 empfangen. Die Fledermaus F_1 hört einmal die Frequenz ν_0 in ihrem eigenen Ruhesystem. Zum anderen hört sie die von der Wand reflektierten Wellen, allerdings als Beobachter mit der Geschwindigkeit $v_{Beobachter,1} = v_{Quelle}$:

$$\nu_3 = \nu_2 \cdot \left(1 - \frac{v_{Quelle}}{c}\right)$$

Zusammengefasst erhalten wir die Frequenzen:

$$F_1: \nu_0 = 50\ \text{kHz und}\ \nu_3 = \nu_0 \cdot \frac{1 - \frac{v_{Quelle}}{c}}{1 + \frac{v_{Quelle}}{c}} = 53{,}1\ \text{kHz}$$

$$F_2: \nu_1 = \frac{\nu_0}{1+\frac{v_{Quelle}}{c}} = 48{,}5 \text{ KHz und } \nu_2 = \nu_0 \cdot \left(1-\frac{v_{Quelle}}{c}\right) = 51{,}6 \text{ kHz}$$

(b) Die Frequenzen ν_0 und ν_1 ändern sich nicht. Die Wand mit $v_W = 1 \text{ m/s}$ wirkt jetzt als Empfänger der Frequenz

$$\nu_2'' = \nu_0 \cdot \frac{1+\frac{v_W}{c}}{1-\frac{v_{Quelle}}{c}}$$

und als Sender der Frequenz

$$\nu_2' = \frac{\nu_2''}{1-\frac{v_W}{c}} = \nu_0 \cdot \frac{1+\frac{v_W}{c}}{\left(1-\frac{v_W}{c}\right)\cdot\left(1-\frac{v_{Quelle}}{c}\right)} = 51{,}9 \text{ kHz}$$

Daraus folgt für die Frequenz ν_3':

$$\nu_3' = \nu_2' \cdot (1+\frac{v_{Quelle}}{c}) = \nu_0 \cdot \frac{\left(1+\frac{v_W}{c}\right)\cdot\left(1+\frac{v_{Quelle}}{c}\right)}{\left(1-\frac{v_W}{c}\right)\cdot\left(1-\frac{v_{Quelle}}{c}\right)} = 53{,}4 \text{ kHz}$$

Die Änderungen sind also sehr klein ($\nu_3' - \nu_3 = 300 \text{ Hz}$, $\nu_2' - \nu_2 = 300 \text{ Hz}$), trotzdem können Fledermäuse diese wahrnehmen.