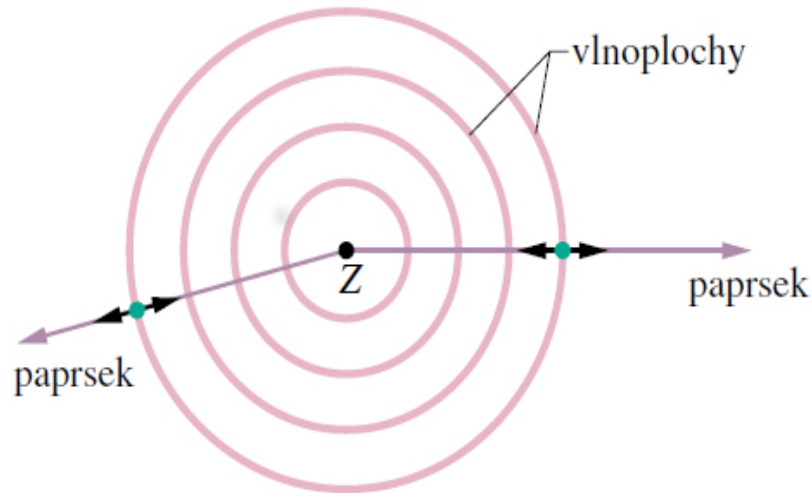


Podélné vlnění - zvuk

Základní pojmy.



Zvuk je podélné mechanické vlnění hmotného prostředí, které se může šířit pouze v hmotném prostředí jako jsou vzduch voda, pevná látka.

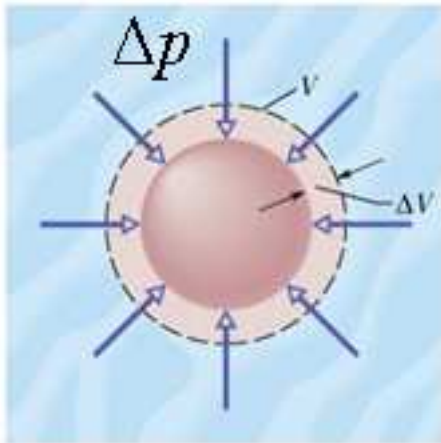
Vlnoplocha - plocha na níž mají všechny částice vzduchu stejně velkou výchylku a rychlost, tedy fázi.

Paprsek - čára kolmá k vlnoplochám, určuje směr šíření vlny.

Základní pojmy.

Tlak p působící v tekutině (plyny a kapaliny) je síla F již působí tekutina na jednotkovou plochu S daného tělesa:

$$p = \frac{F}{S}$$



Objemový modul pružnosti K je definován jako poměr změny tlaku Δp ku relativní změně objemu $\Delta V/V$ tělesa.

$$K = - \frac{\Delta p}{\Delta V / V}$$

Hustota ρ tekutiny je definována poměrem hmotnosti tělesa k jím zaujímanému objemu V :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Rychlost zvuku v šířícího se tekutinou je dána setrvačnými vlastnostmi, hustotou ρ a mechanickými vlastnostmi prostředí, (plynu, tekutiny), modulem pružnosti K :

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Rychlost zvuku v různých prostředích.+

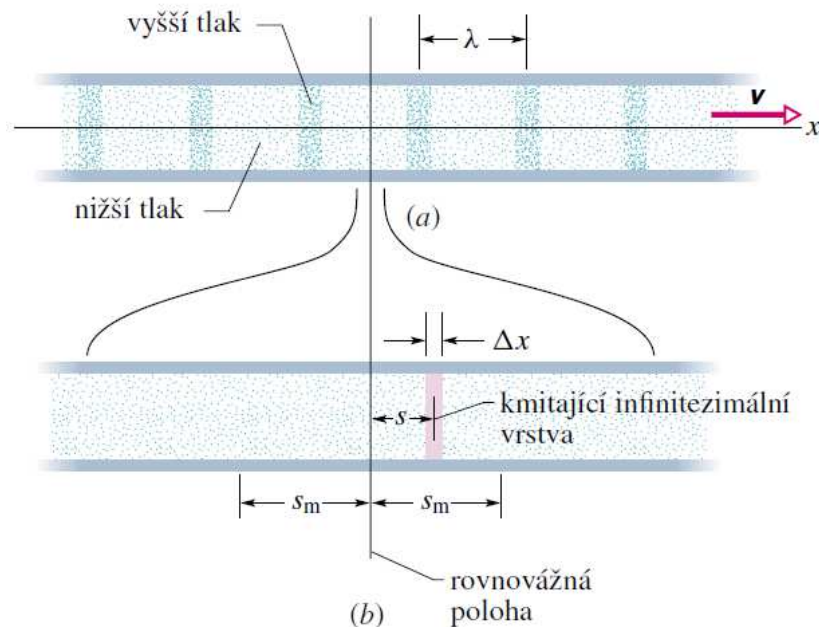
Tabulka 18.1 Rychlost zvuku

PROSTŘEDÍ	$\frac{v}{\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$	PROSTŘEDÍ	$\frac{v}{\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$	PROSTŘEDÍ	$\frac{v}{\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$
<i>Plyny^a</i>		<i>Pevné látky^a</i>		<i>Kapaliny^a</i>	
Vzduch (0 °C)	331	Hliník	6 420	Voda (0 °C)	1 402
Vzduch (20 °C)	343	Ocel	5 941	Voda (20 °C)	1 482
Helium	965	Žula	6 000	Mořská voda ^b	1 522
Vodík	1 284				

^a 0 °C a tlak 1 atm, pokud neuvedeno jinak.

^b Při 20 °C a salinitě 3,5 ‰.

Princip šíření zvuku.



Uvažme tenkou vrstvičku vzduchu tloušťky Δx , o souřadnici x . Při průchodu zvukové vlny kmitá tato vrstvička okolo rovnovážné polohy, podle vztahu:

$$s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$$

s_m je maximální výchylka (amplituda), k je vlnové číslo a ω je kruhová frekvence.

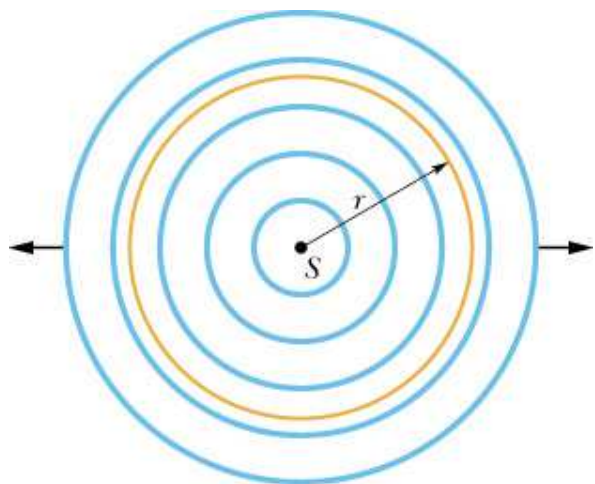
Změny tlaku Δp spojené s průchodem zvukové vlny jsou dány rovnicí:

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$$

Amplituda tlaku Δp_m a amplituda výchylky s_m kmitající infinitezimální vrstvy plynu souvisí vztahem:

$$\Delta p_m = (v \rho \omega) s_m$$

Intenzita zvuku a její hladina.



Zvuková vlna přenáší energii. energii procházející za jednotku času (výkon) P plochou velikosti A nazýváme intenzitou vlny I :

$$I = \frac{P}{A}$$

SI jednotka: W/m^2

Intenzita zvukové vlny jejíž amplituda je s_m je dána vztahem: $I = \left(\frac{\rho v \omega^2}{2} \right) s_m^2$

Intenzita zvukové vlny vyjádřená ve změnách tlaku amplitudy je Δp_m je pak dána vztahem:

$$I = \left(\frac{1}{2\rho v} \right) \Delta p_m^2$$

Závislost intenzity zvuku na vzdálenosti od bodového zdroje je vyjádřena vztahem:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Intenzita zvuku a její hladina-cont.

Maximální amplituda tlaku hlasitého zvuku Δp_m kterou lidské ucho snese je 28 Pa (tlak vzduchu je 10^5 Pa) Jaké je posunutí s_m vzduchové částice u takového zvuku s frekvencí 1kHz? Vzduch má hustotu $\rho = 1,21 \text{ kgm}^{-3}$.

Řešení dostaneme z rovnice: $\Delta p_m = (v\rho\omega)s_m \rightarrow s_m = \frac{\Delta p_m}{v\rho\omega} = \frac{\Delta p_m}{v\rho 2\pi f}$

$$s_m = \frac{\Delta p_m}{v\rho\omega} = \frac{28\text{Pa}}{(343\text{ms}^{-1})(1,21\text{kgm}^{-3})2\pi 1000\text{Hz}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 11\mu\text{m}$$

Výchylka, kterou lidské ucho snese je rovna přibližně 1/7 tloušťky listu papíru. Amplituda tlaku pro nejslabší slyšitelný zvuk o frekvenci 1kHz je přibližně okolo $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, amplituda s_m odpovídající tomuto tlaku je okolo $1,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ tedy 11 pm (poloměr atomu vodíku je 25 pm).

Průměrný člověk slyší zvuk ve frekvenčním rozsahu 20 Hz - 20 kHz. V mladším věku je horní hranice slyšitelnosti mírně nad 20 kHz, naopak s přibývajícím věkem se horní hranice snižuje. Pes vnímá zvuky od 30 Hz - 45 kHz, kočka od 15 Hz - 50 kHz, netopýr až 100 kHz.

Weber-Fechnerův psychofyzilogický zákon

Citlivost lidského sluchu při vnímání akustické intenzity se s rostoucí intenzitou zvuku snižuje. Se zvyšováním akustické intenzity sluchový orgán postupně ztrácí schopnost vnímat v plné hodnotě její další přírůstek. Závislost velikosti zvukového podnětu a velikosti sluchového vjemu, je logaritmická (německý fyziolog Ernst Heinrich Weber (1795–1878) a zakladatel psychofyziky Gustav Theodor Fechner (1801–1887)).

Weber–Fechnerův psychofyzický zákon: Míra fyziologického vjemu je úměrná logaritmu míry jeho fyzikální příčiny

Ke kvantifikaci intenzity zvuku zavádíme jednotku **1 decibel (1 dB)** definovanou vztahem:

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

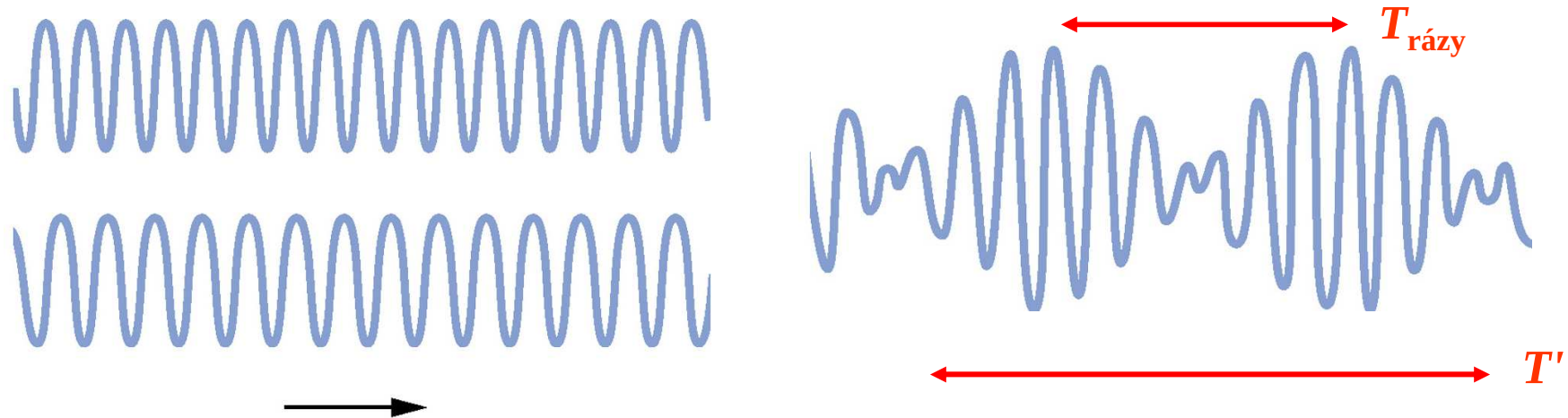
Kde I_0 je referenční intenzita $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$.

Poznámka 1: Pro $I = I_0$: $\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I_0}{I_0} = 10 \log 1 = 0$

Poznámka 2: β vzrůstá o 10 dB, vzroste-li poměr I/I_0 10 krát.
Například $\beta = 40$ dB odpovídá $I/I_0 = 10^4$.

	Zvuk		Zvuk
0	hranice slyšitelnosti	70	hluk na silně frekventovaných ulicích velkoměsta, vysavač
10	šelest listí, ticho na venkově	80	hluk v tunelech podzemních železnic, křik, symfonický orchestr
20	šum listí, knihovna, tikot hodinek	90	hluk motorových vozidel
30	pouliční hluk v tichém předměstí	100	maximální hluk motorky, pneumatická vrtačka
40	tlumený rozhovor	110	hlasité obráběcí stroje, rocková kapela
50	normální pouliční hluk, ruch v kanceláři	120	startující letadlo (z 1 m)
60	hlasitý (normální) rozhovor, ruch v davu	130	hluk působící bolest

Zázněje (rázy).



Registruje li naše ucho tóny dvou velmi blízkých frekvencí f_1 a f_2 , které není schopné od sebe odlišit, pak vnímáme zvuk jehož frekvence je průměrem frekvencí obou vln $f_{\text{průměr}}$, zároveň ale zaznamenáme poměrně pomalé střídavé změny v intenzitě zvuku – zázněje (rázy) s frekvencí $f_{\text{zázněje}}$.

$$f_{\text{průměr}} = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

$$f_{\text{zázněje}} = f_1 - f_2$$

Zázněje (rázy).

Uvažme dvě zvukové vlny s_1 a s_2 , stejné amplitudy s_m a velmi blízkých frekvencí ω_1 a ω_2 .

$$s_1 = s_m \cos \omega_1 t, \quad s_2 = s_m \cos \omega_2 t$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$$

Podle principu superpozice platí:

$$s = s_1 + s_2 = s_m (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) = 2s_m \cos \left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \right) t \right] \cos \left[\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \right) t \right]$$

Kde označme:

$$\omega' = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$$
$$\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$$

→

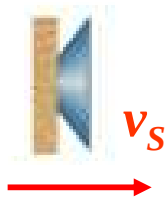
$$s(t) = (2s_m \cos \omega' t) \cos \omega t$$

Jelikož frekvence ω_1 a ω_2 jsou velmi blízké a tedy platí $\omega \gg \omega'$ můžeme výchylku $s(t)$ považovat za kosinusoidu s časově proměnnou amplitudou. Tato amplituda bude maximální, kdykoliv $\cos \omega' t$ bude roven ± 1 . Z toho vyplývá, že frekvence s níž se budou opakovat rázy bude rovna:

$$\omega_{\text{zázněje}} = 2\omega' = \omega_1 - \omega_2$$

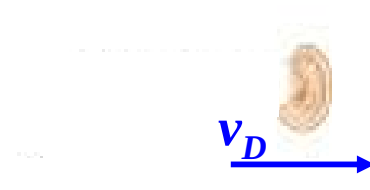
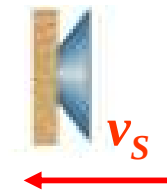
Z čehož vyplývá

$$\omega = 2\pi f \rightarrow f_{\text{zázněje}} = f_1 - f_2$$



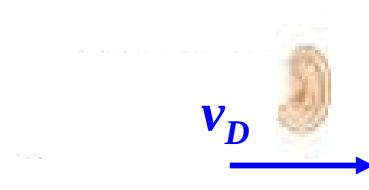
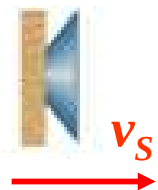
$$f' = f \frac{v + v_D}{v - v_S}$$

$$f' > f$$

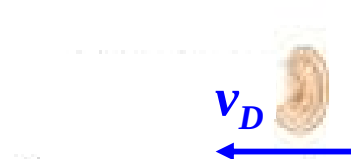


$$f' = f \frac{v - v_D}{v + v_S}$$

$$f' < f$$



$$f' = f \frac{v - v_D}{v - v_S}$$



$$f' = f \frac{v + v_D}{v + v_S}$$

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S}$$