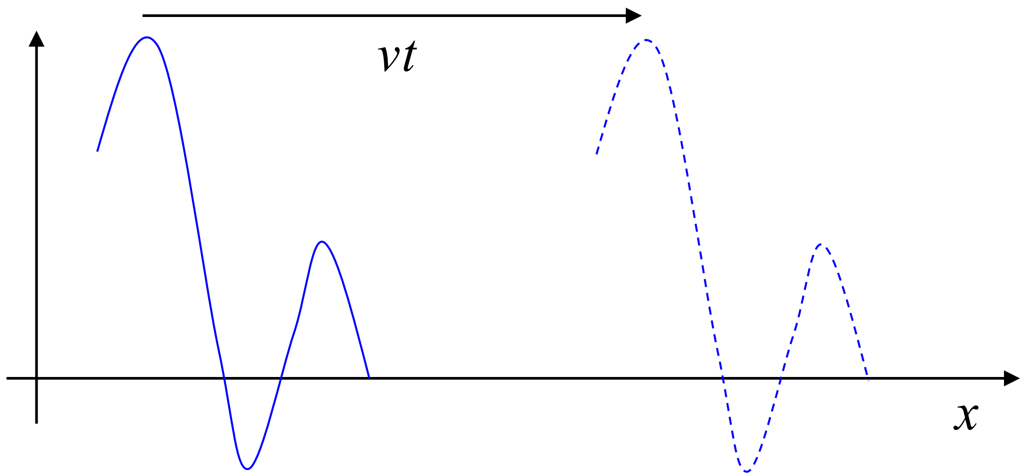
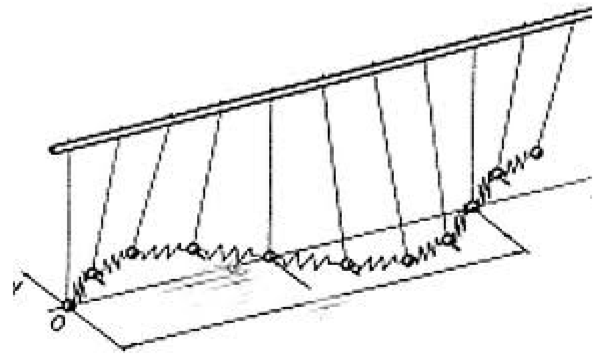
Vlnění

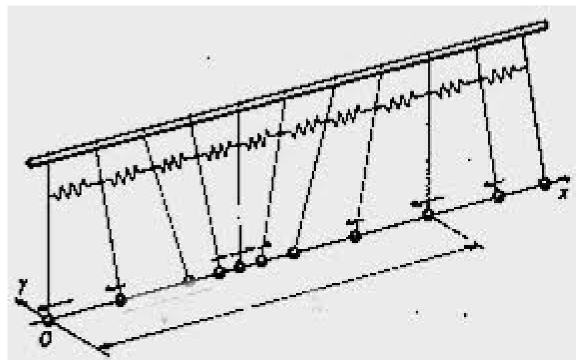
- šíření vzruchu nebo oscilací
- vlna: $\xi(x,t) = f(x - vt)$



- příčné vlnění



- podélné vlnění



Zvuk

- plyn se pohybuje → mění se jeho hustota → změna tlaku

- nerovnoměrné rozložení tlaku → pohyb plynu

- vztah mezi tlakem a hustotou: $p = f(\rho)$

dodatečný tlak

- rovnovážný tlak p_0= 1.0133 bar = 1013.3 hPa, zvuk : $p_e = p - p_0$

- hladina akustického tlaku $I[\mathrm{dB}] = 20 \log\left(\frac{p_e}{p_{ref}}\right)$

$$p_{ref} = 2 \times 10^{-10} \text{ bar} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$ (0 dB, práh slyšení)

- hlasitý hovor: 60 dB (p_e = 2 × 10^{-2} Pa)

- práh bolesti: 120 dB (p_e = 20 Pa)

Zvuk

• vztah mezi tlakem a hustotou: $p = f(\rho)$

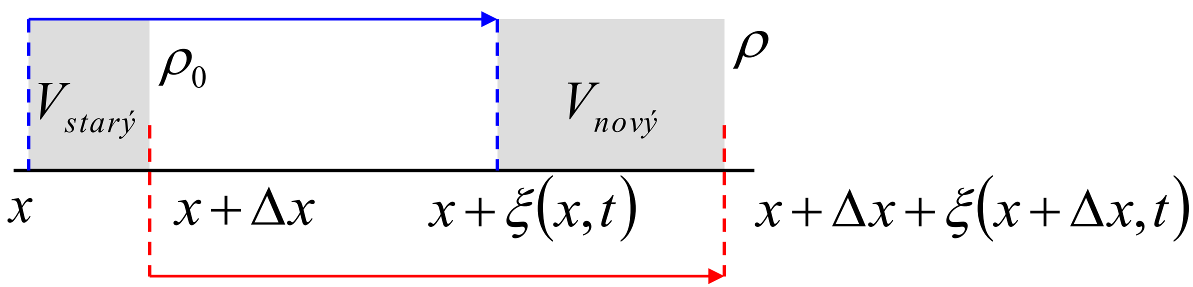
$$p = p_0 + p_e \qquad \rho = \rho_0 + \rho_e$$

$$p_0 + p_e = f(\rho_0 + \rho_e) = f(\rho_0) + \rho_e f'(\rho_0)$$

dodatečný tlak je úměrný dodatečné hustotě

$$p_e = f'(\rho_0)\rho_e = \kappa \rho_e \qquad \kappa \equiv \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{\rho=\rho_0}$$

• zvuková vlna: $\xi(x,t)$



$$\rho_0 \Delta x = \rho\left[x + \Delta x + \xi(x + \Delta x, t) - x - \xi(x,t)\right]$$

$$\rho_0 \Delta x = \rho\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\Delta x + \Delta x\right)$$

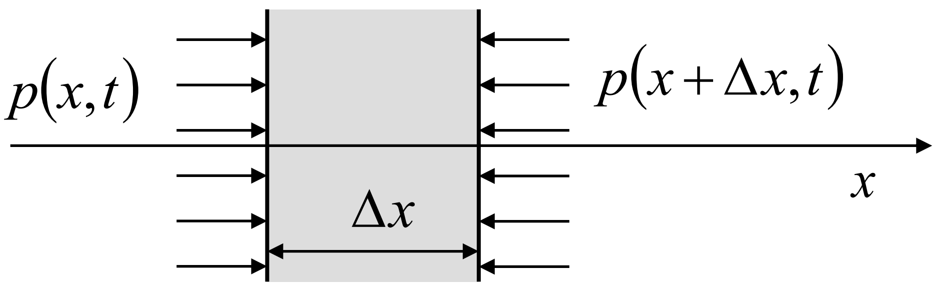
$$\rho_0 = (\rho_0 + \rho_e)\frac{\partial \xi}{\partial x} + \rho_0 + \rho_e$$

$$\rho_e = -\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

když se plyn pohybuje mění se hustota

Zvuk

• síla na jednotku plochy: $p(x,t) - p(x+\Delta x,t) = -\frac{\partial p}{\partial x}\Delta x = -\frac{\partial p_e}{\partial x}\Delta x$



• 2. Newtonův zákon: $\rho_0 \Delta x \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = p(x,t) - p(x+\Delta x,t)$

$$p_e = f'(\rho_0)\rho_e = \kappa \rho_e$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial p_e}{\partial x} = -\kappa \frac{\partial \rho_e}{\partial x}$$

$$\rho_e = -\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \kappa \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

vlnová rovnice $$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v_z^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

rychlost zvuku

$$v_z^2 \equiv \kappa$$

Vlnění

• vlna: $\xi(x,t) = f(x - vt)$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f''(x - vt)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = v^2 f''(x - vt)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{\kappa}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \longrightarrow v^2 = \kappa$$

• vlna postupující opačným směrem: $\xi(x,t) = f(x + vt)$

• princip superpozice:
je-li ξ_1 a ξ_2 řešení je $\xi_1 + \xi_2$ také řešení

vlnová rovnice $$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{\kappa}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

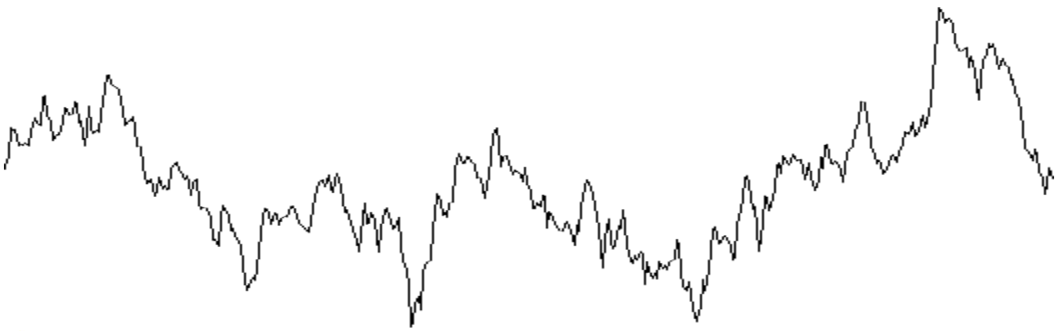
vlastnost prostředí

rychlost zvuku

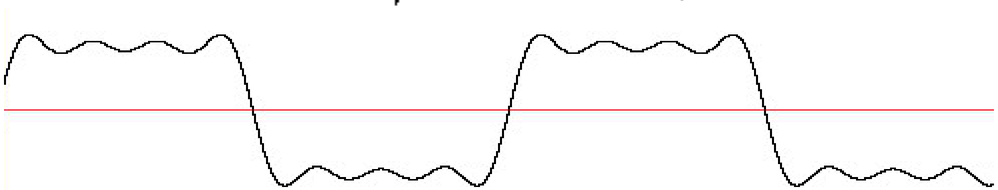
• zvuk se šíří rychlostí: $v = v_z = \kappa^{1/2} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)^{1/2}_{\rho=\rho_0}$

Vlnění

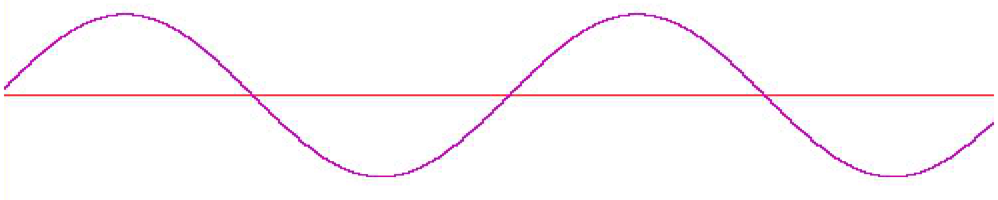
- vlna: $\xi(x,t) = f(x - vt)$



neperiodické vlnění



periodické vlnění



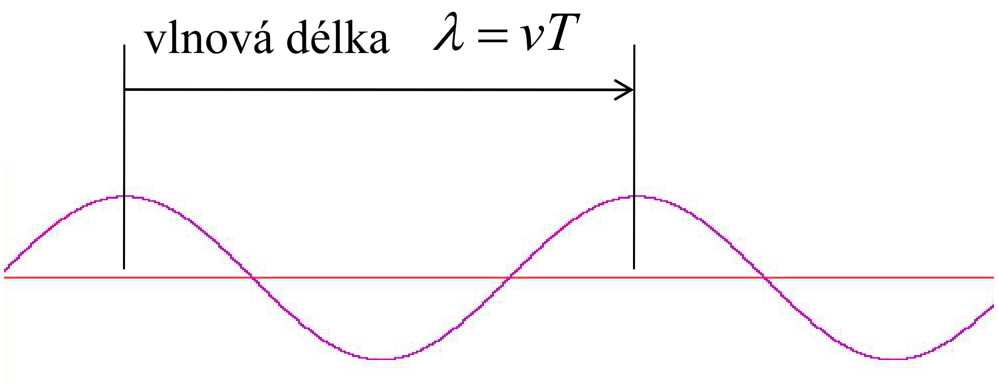
periodické harmonické vlnění

Souvislost frekvence a vlnové délky

- vlna: $\xi(x,t) = f(x - vt)$

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$$



perioda kmitů T

frekvence $f = \frac{1}{T}$

úhlová frekvence $\omega = 2\pi f$

vlnová délka λ

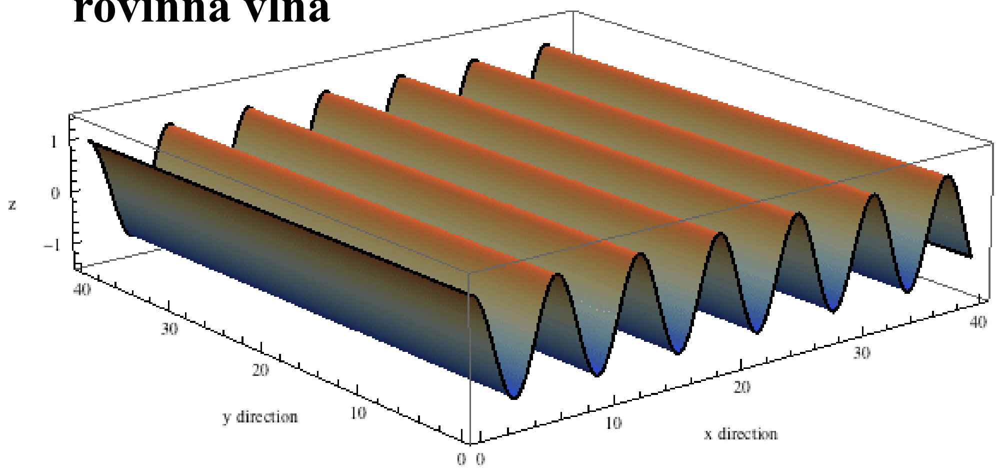
vlnočet $\frac{1}{\lambda}$

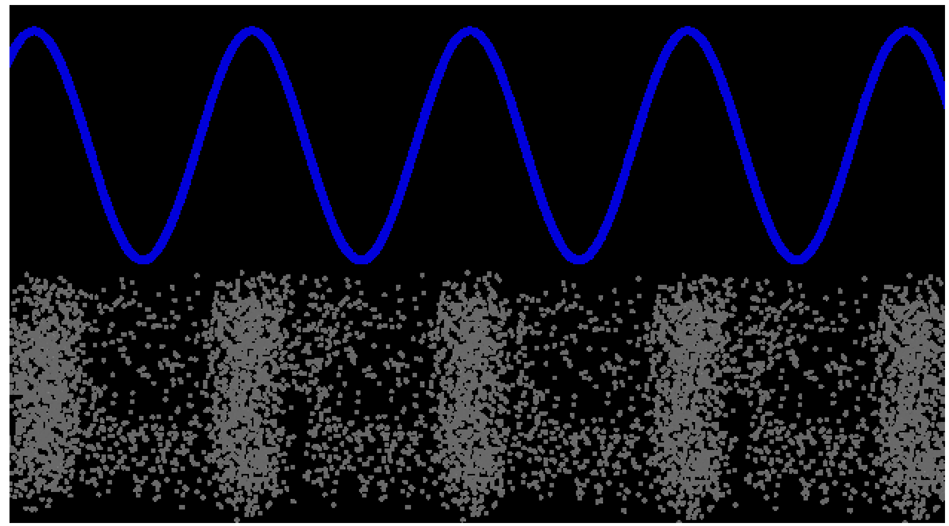
úhlový vlnočet $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (velikost vlnového vektoru)

Harmonické vlnění

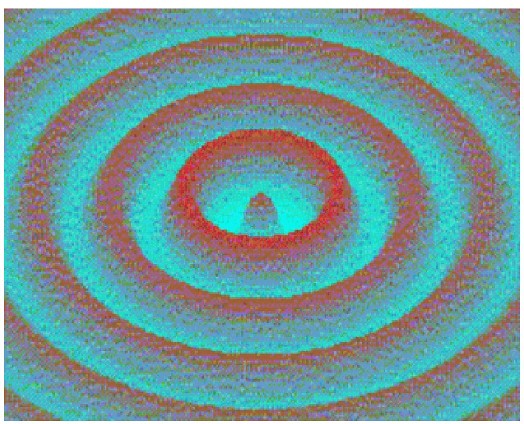
• harmonická vlna: $\xi(x,t) = A\sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) = A\sin(\omega t - kx) \longrightarrow Ae^{i(\omega t - kx)}$

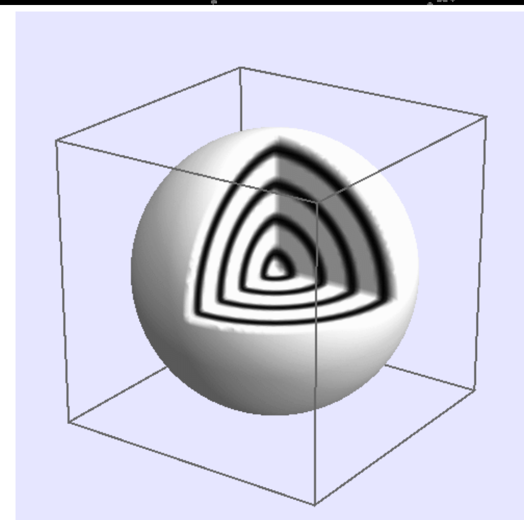
rovinná vlna





• **sférická harmonická vlna**: $\xi(r,t) = Ae^{i(\omega t - kr)}$





Rychlost zvuku

• rychlost šíření zvuku $$v_z^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\rho=\rho_0}$$

$$v_z^2 = \frac{\gamma\, kT}{m} = \frac{\gamma\, RT}{M}$$

rychlost zvuku závisí na teplotě plynu a ne na tlaku nebo hustotě

• stlačení plynu $\rightarrow$ nárůst teploty
• zředění plynu $\rightarrow$ pokles teploty

molární plynová konstanta $R = 8.314$ J K^{-1} mol^{-1}

• adiabatický děj (pro rychlosti zvukových vln)

$$\left.\begin{array}{l} pV^{\gamma} = \text{konst} \\ \rho \sim \dfrac{1}{V} \end{array}\right\} \longrightarrow \frac{p}{\rho^{\gamma}} = \text{konst}$$

$$pV = NkT$$

stavová rovnice ideálního plynu

$$v_z^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{\gamma\, p}{\rho} = \frac{\gamma\, pV}{\rho V}$$

$$\rho V = Nm$$

celková hmotnost plynu

Rychlost zvuku

- rychlost šíření zvuku $$v_z^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\rho=\rho_0}$$

- Poissonova konstanta (ideální plyn) $\gamma = 1 + \dfrac{2}{f}$

  počet stupňů volnosti $\nearrow$

$$v_z^2 = \frac{\gamma\, kT}{m} = \frac{\gamma\, RT}{M}$$

rychlost zvuku závisí na teplotě plynu a ne na tlaku nebo hustotě

molární plynová konstanta $R = 8.314\ \mathrm{J\ K^{-1}\ mol^{-1}}$

- jeden atom $f = 3 \rightarrow \gamma = 5/3$
- dvouatomová molekula $f = 5 \rightarrow \gamma = 7/5$
- dusík N_2, T = 20^{o}C: v_z = 349 m/s
- vzduch (80% N_2 + 20% O_2) T = 20^{o}C: v_z = 344 m/s
- helium T = 20^{o}C: v_z = 1008 m/s
- argon T = 20^{o}C: v_z = 292 m/s

Rychlost zvuku

• frekvenční rozsah, který je člověk schopen slyšet: 20 Hz – 20 kHz

• odpovídající rozsah vlnových délek: 18 mm – 18 m

• citlivost lidského ucha na různé frekvence je různá