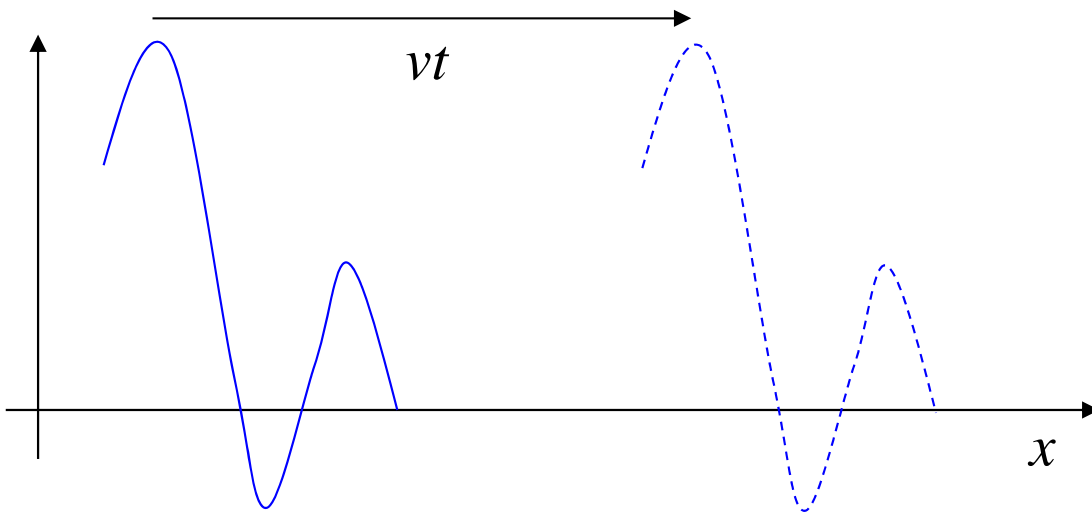
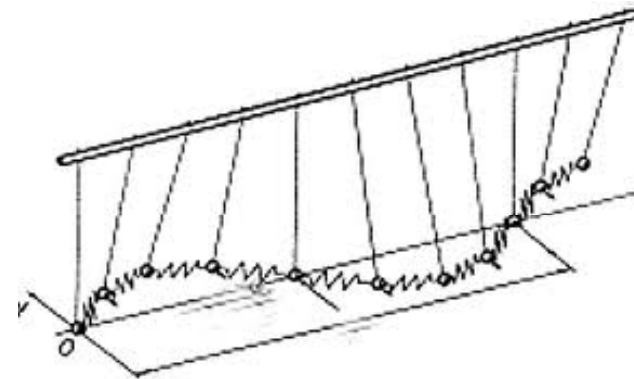


# Vlnění

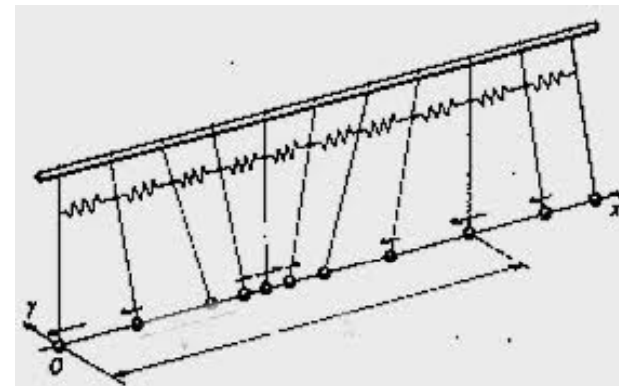
- šíření vzruchu nebo oscilací
- vlna:  $\xi(x, t) = f(x - vt)$



- příčné vlnění



- podélné vlnění



# Zvuk

- plyn se pohybuje → mění se jeho hustota → změna tlaku
  - nerovnoměrné rozložení tlaku → pohyb plynu
  - vztah mezi tlakem a hustotou:  $p = f(\rho)$
  - rovnovážný tlak  $p_0 = 1.0133 \text{ bar} = 1013.3 \text{ hPa}$ , zvuk :  $p_e = p - p_0$  ← dodatečný tlak
  - hladina akustického tlaku  $I[\text{dB}] = 20 \log\left(\frac{p_e}{p_{ref}}\right)$
- $p_{ref} = 2 \times 10^{-10} \text{ bar} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  (0 dB, práh slyšení)
- hlasitý hovor: 60 dB ( $p_e = 2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ )
  - práh bolesti: 120 dB ( $p_e = 20 \text{ Pa}$ )

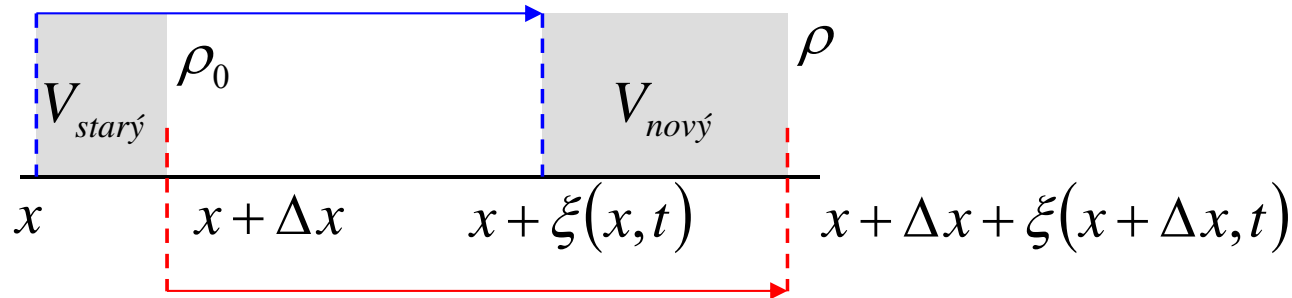
# Zvuk

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

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

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

- zvuková vlna:  $\xi(x, t)$



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

dodatečný tlak je úměrný dodatečné hustotě

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

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

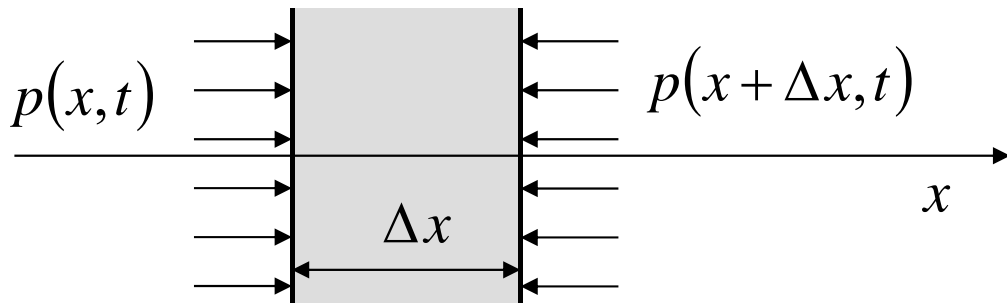
$$\rho_0 = (\rho_0 + \rho_e) \frac{\partial \xi}{\partial x} + \rho_0 + \rho_e$$

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

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:  $\rho_0 \Delta x \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = p(x, t) - p(x + \Delta x, t)$   $p_e = f'(\rho_0) \rho_e = \kappa \rho_e$

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

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

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

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

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

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

rychlost zvuku

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

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

- princip superpozice:

je-li  $\xi_1$  a  $\xi_2$  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

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

- stlačení plynu → nárůst teploty
- zředění plynu → pokles teploty

- adiabatický děj (pro rychlosti zvukových vln)

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

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

$$pV = NkT$$

stavová rovnice ideálního plynu

$$\rho V = Nm$$

celková hmotnost plynu

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

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

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

# Rychlost zvuku

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

• Poissonova konstanta (ideální plyn)  $\gamma = 1 + \frac{2}{f}$   
počet stupňů volnosti  $\nearrow$

• jeden atom  $f = 3 \rightarrow \gamma = 5/3$

• dvouatomová molekula  $f = 5 \rightarrow \gamma = 7/5$

• dusík  $N_2$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ :  $v_z = 349 \text{ m/s}$

• vzduch (80%  $N_2$  + 20%  $O_2$ )  $T = 20^\circ\text{C}$ :  $v_z = 344 \text{ m/s}$

• helium  $T = 20^\circ\text{C}$ :  $v_z = 1008 \text{ m/s}$

• argon  $T = 20^\circ\text{C}$ :  $v_z = 292 \text{ m/s}$

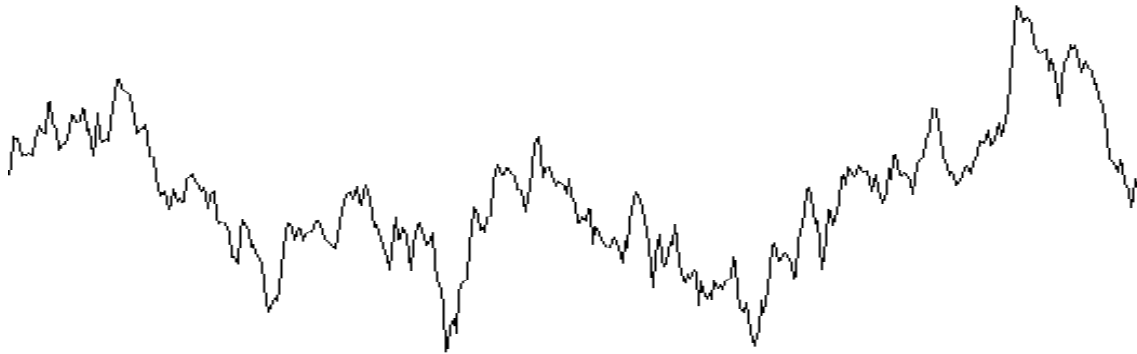
$$v_z^2 = \frac{\gamma kT}{m} = \frac{\gamma RT}{M}$$

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

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

# Vlnění

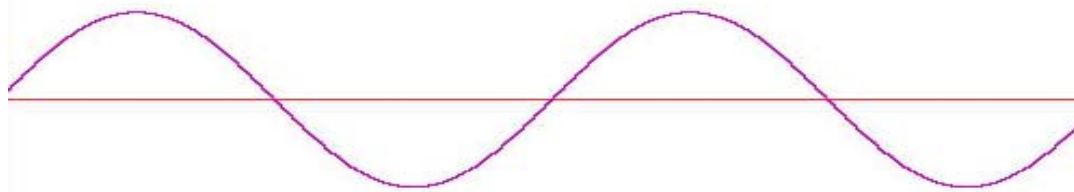
- vlna:  $\xi(x,t) = f(x - vt)$



neperiodické vlnění



periodické vlnění

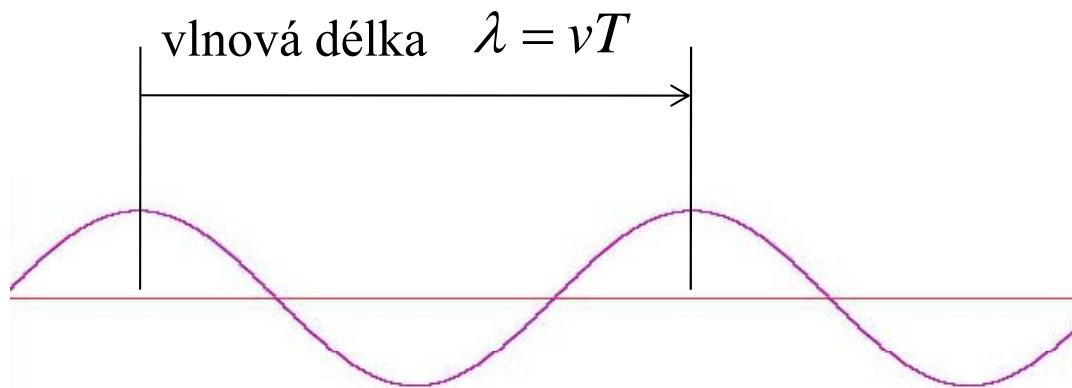


periodické harmonické vlnění



# Souvislost frekvence a vlnové délky

• vlna:  $\xi(x, t) = f(x - vt)$



perioda kmitů  $T$

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

úhlová frekvence  $\omega = 2\pi f$

vlnová délka  $\lambda$

vlnočet  $\frac{1}{\lambda}$

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

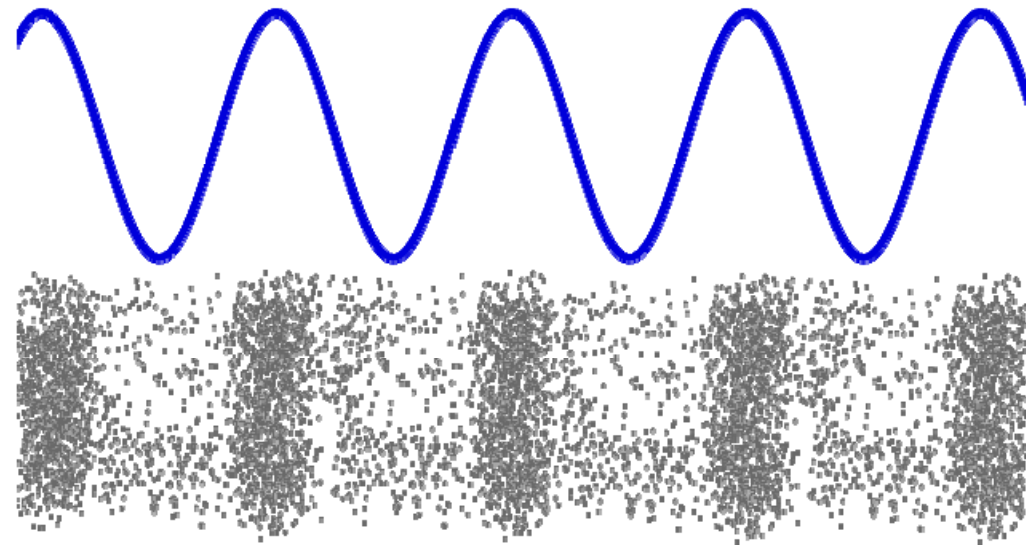
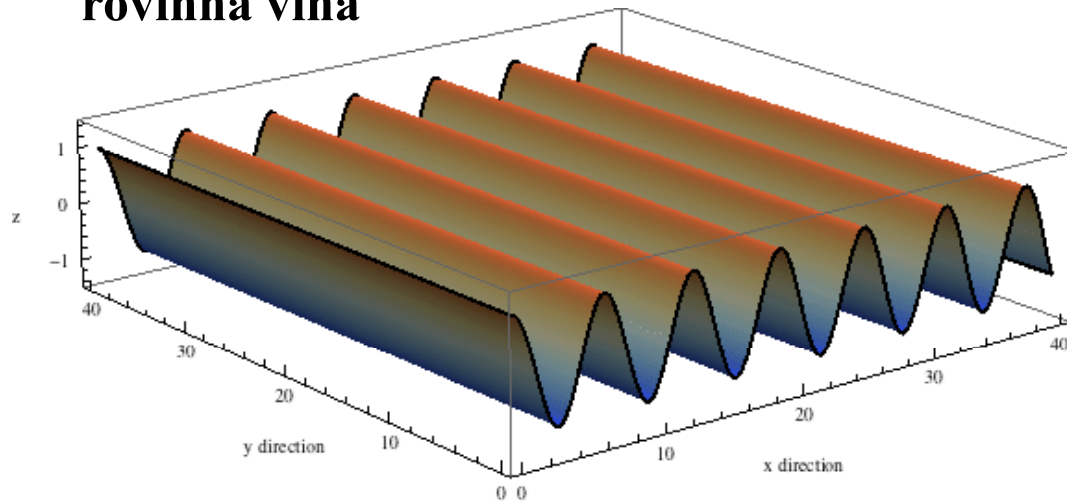
$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

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

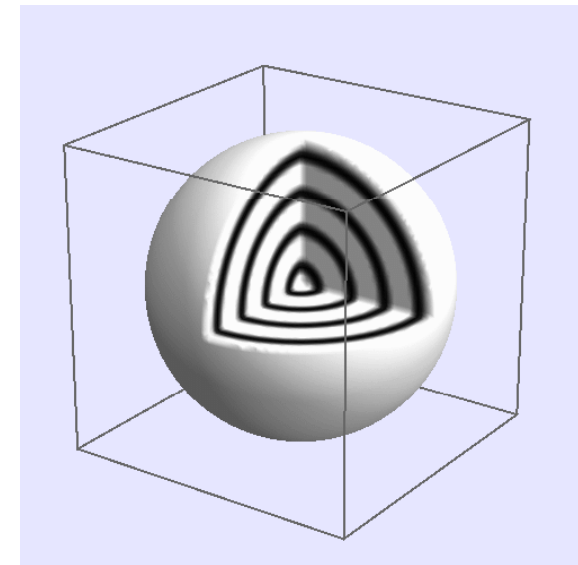
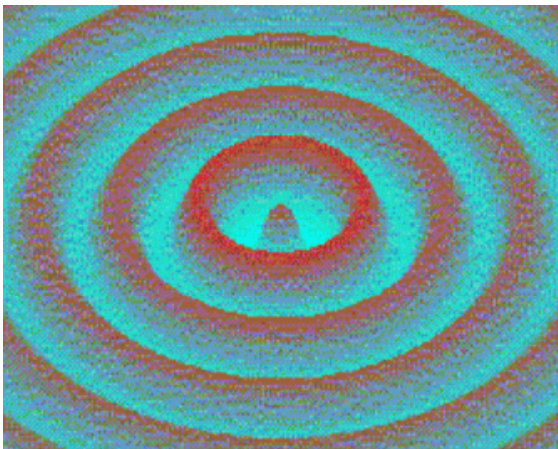
# Harmonické vlnění

- harmonická vlna:  $\xi(x, t) = A \sin\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = A \sin(\omega t - kx) \quad Ae^{i(\omega t - kx)}$

**rovinná vlna**



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



# 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

