

# ZVUKOVÁ VLNĚNÍ

MUNI  
ARTS

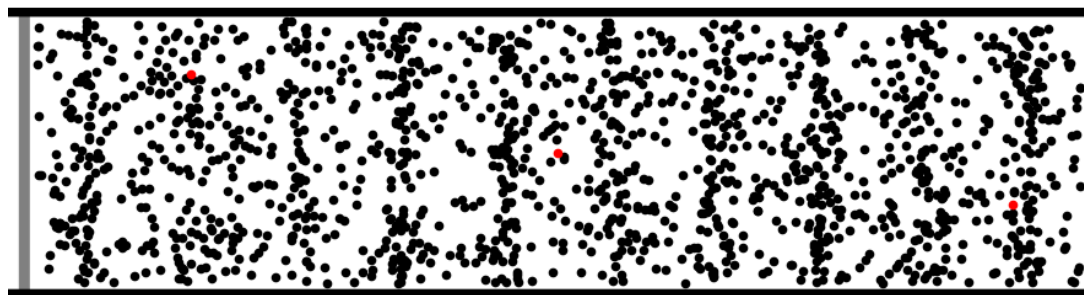
**Kurz:**      **Studiová technika II**

---

**Autor:**     Jiří Schimmel

# Šíření zvuku

- **Zvuk:** mechanické vlnění hmotného prostředí zvukového pole (prostor, ve kterém se šíří zvuk).
- V důsledku pružnosti prostředí se vytvářejí při kmitání částic místa se zhuštěním nebo zředěním prostředí postupující od zdroje kmitání předáváním kinetické energie částic prostředí.

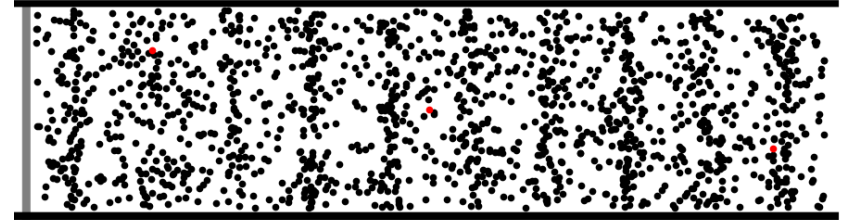


©2011. Dan Russell

©1998-2013 by Daniel A. Russell, [Acoustics and Vibration Animations](#)

# Šíření zvuku

- Šíření zvukového vlnění je závislé na prostředí, ve kterém se zvuk šíří (podélné, příčné, povrchové, kombinované).
- V plynném prostředí se zvuk šíří v podobě podélného vlnění – částice vychýlené mechanickým podnětem ze své klidové polohy kmitají pouze ve směru šíření zvuku kolem rovnovážné polohy.



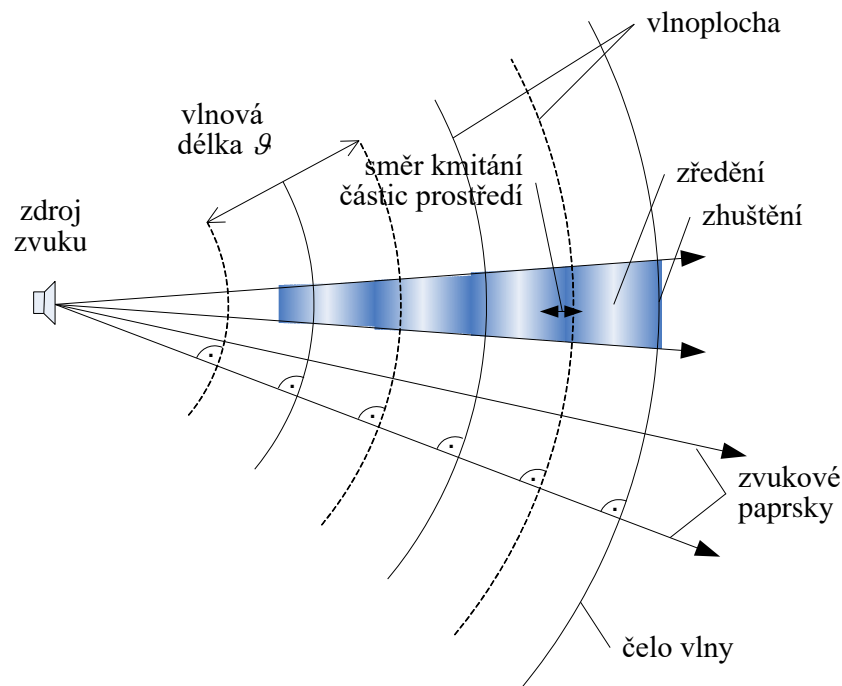
©2011, Dan Russell



©1998-2013 by Daniel A. Russell  
[Acoustics and Vibration Animations](#)

# Šíření zvuku

- **Zvuková vlna:** změna hustoty prostředí vytvořená kmitáním částic prostředí.
- **Vlnoplocha:** plocha, kam dospěje zvuková vlna od svého zdroje za stejný čas; představuje místa se stejnou fází kmitání částic.
- **Čelo vlny:** vlnoplocha nejvzdálenější od zdroje zvuku.



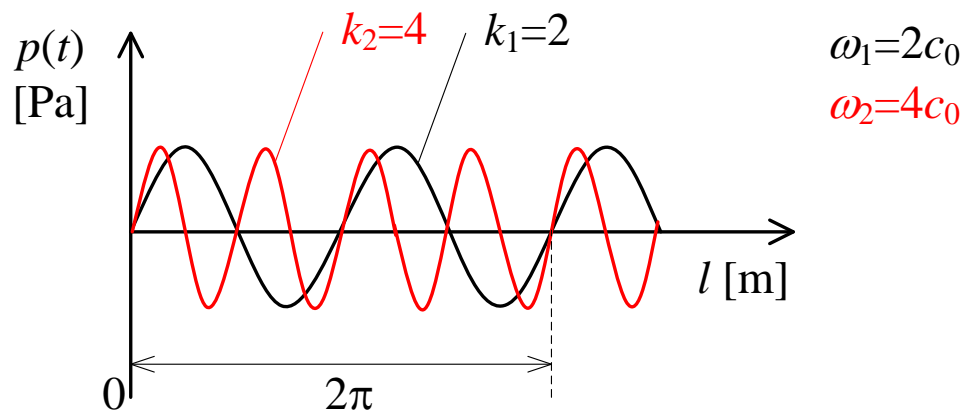
# Vlnová délka a vlnové číslo

- **Vlnová délka:** vzdálenost, kterou zvukové vlnění urazí za jednu periodu kmitání.

$$\lambda = c_0 T = \frac{c_0}{f} = 2\pi \frac{c_0}{\omega}$$

- **Vlnové číslo:** počet vlnových délek na vzdálenost  $2\pi$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{\omega}{c_0} [\text{m}^{-1}]$$



# Veličiny zvukového pole

# Akustická výchylka a akustická rychlost

- Akustická výchylka
  - vzdálenost, o kterou se částice vychylují ze své rovnovážné polohy

$$\xi(t, \mathbf{r}_0) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_0$$

- Akustická rychlost

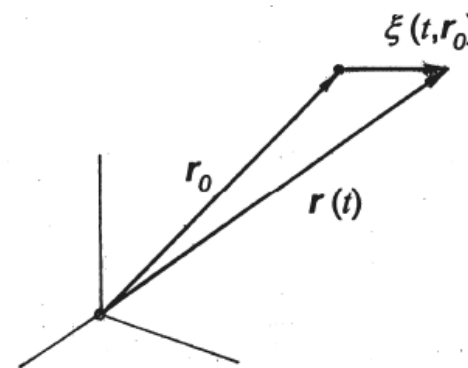
- proměnná vektorová veličina měnící svoji velikost a směr s časem

$$\vec{v}(t, \mathbf{r}_0) = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} \quad \vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$$

- velikost vektoru akustické rychlosti

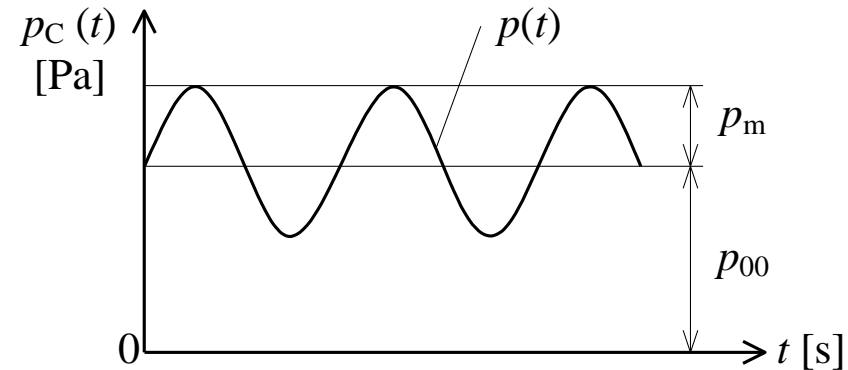
$$v(t) = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)}$$

$$v_x(t) = \frac{d\xi_x}{dt}, \quad v_y(t) = \frac{d\xi_y}{dt}, \quad v_z(t) = \frac{d\xi_z}{dt}$$



# Akustický tlak

- Rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku  $p_C$  v daném bodě zvukového pole za přítomnosti zvuku a statickou hodnotou atmosférického (barometrického) tlaku  $p_{00}$ .
- Střídavá složka tlaku, která je superponovaná k barometrickému tlaku za přítomnosti zvuku.
- V každém bodě zvukového pole se hodnota celkového tlaku mění v čase.



$$p(t) = \frac{F(t)}{S}$$



# Hladina akustického tlaku a rychlosti

- **Hladina akustického tlaku** (*Sound Pressure Level, SPL*)

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa – vztažná hodnota pro 0 dB

- jednotka hladiny akustického tlaku se označuje zkratkou SPL v dolním indexu nebo v závorce – dB<sub>SPL</sub>, dB(SPL), dB<sub>(SPL)</sub>, aby se zdůraznilo, že se jedná o hladinu akustického tlaku vztaženou k hodnotě  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.
- hladina akustického tlaku dB(Pa) – vztažnou hodnotou je  $p_0 = 1$  Pa

- **Hladina akustické rychlosti**

$$L_v = 10 \log \frac{v^2}{v_0^2} = 20 \log \frac{v}{v_0} \quad [\text{dB}]$$

$$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

# Akustický výkon

- Zvukové pole vzniká jako důsledek činnosti zvukového zdroje, který vysílá zvukovou energii prostřednictvím kmitání svých mechanických částí.
- Akustický výkon: mechanický výkon vyjádřený pomocí akustických veličin

$$P(t) = F(t)v(t)\cos\phi = p(t)Sv(t)\cos\phi$$

$\phi$  – úhel, který svírá normála k ploše  $S$  s vektorem akustické rychlosti  $\vec{v}$ ,  $v(t)$  velikost akustické rychlosti

# Intenzita zvuku

- Elementární výkon působící na elementární plochu  $dS$ :

$$dP(t) = p(t)v(t)dS$$

- Akustický výkon připadající na celou vlnoplochu  $S$ :

$$P(t) = \int_S p(t)v(t)dS$$

- Měrný akustický výkon: plošná hustota akustického výkonu

$$P_m(t) = \frac{dP(t)}{dS} = \frac{dF(t)v(t)}{dS} = \frac{p(t)dSv(t)}{dS} = p(t)v(t)$$

- Intenzita zvuku: střední časová hodnota měrného akustického výkonu

$$I = \bar{P}_m = \frac{1}{T} \int_0^T P_m(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t)dt$$

# Hladiny intenzity zvuku a akustického výkonu

- Hladina intenzity zvuku:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

- Hladina akustického výkonu:

$$L_P = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}]$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

# Akustická impedance

- Rychlost kmitání částic prostředí je analogická velikosti časové změny nábojů, tj. elektrického proudu – zaveden pojem akustická impedance analogická k elektrické impedanci.
- Vyjadřuje působení akustického tlaku na plochu  $S$ :

$$Z_A = \frac{p}{vS}$$

$p$  – akustický tlak,  $v$  – velikost akustické rychlosti,  $vS$  – akustická *objemová rychlost*.

- Specifická akustická impedance:

$$z_A = \frac{p}{v}$$

- představuje reakci prostředí na jednotku plochy čela zvukové vlny
- komplexní veličina:  $Z_A = r_A + jx_A$ ,  $Z_A = |Z_A|e^{j\varphi_A}$

# Hustota zvukové energie

- **Hustota zvukové energie:** množství zvukové energie  $E$  připadající na jednotku objemu  $V$ :

$$w = \frac{E}{V} = \frac{I}{c_0} \quad [\text{J/m}^3] \quad [\text{Ws/m}^3]$$

$c_0$  – rychlost šíření zvuku

- je rovna součtu hustoty potenciální energie  $w_p$  a kinetické energie  $w_c$

$$w_p = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\chi \rho_0} \quad w_c = \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{v}^2$$

$\chi$  – Poissonova konstanta,  $\rho_0$  – hustota vzduchu

# Rychlost šíření zvuku v plynech

- Pro izotermický děj bude  $p/\rho = \text{konst.}$  a změna tlaku a hustoty je zanedbatelná vůči statickým hodnotám tlaku a hustoty:

$$pV = p \frac{M}{\rho} = RT \quad \Rightarrow \quad \frac{p_0}{\rho_0} = \frac{RT}{M}$$

$T$  – absolutní teplota,  $R$  – plynová konstanta,  $M$  – molekulová hmotnost plynu

- Po dosazení za  $c_0^2$ :

$$c_0^2 = \frac{\chi p_0}{\rho_0} \quad \Rightarrow \quad c_0 = \sqrt{\frac{\chi RT}{M}} = \sqrt{\frac{\chi R}{M} (T_0 + \vartheta)}$$

$\chi$  – Poissonova konstanta,  $T_0 = 273,15$  K,  $\vartheta$  – teplota ve stupních Celsia.

- Při suchém vzduchu a barometrickém tlaku  $p_0 = 1013$  hPa:

$$c_0 = 331,6 + 0,61\vartheta$$

při 20 °C:  $c_0 = 344$  m/s

# Rychlost šíření zvuku v kapalinách a pevných látkách

- Vztah mezi tlakem a hustotou kapaliny podle stavové rovnice kapaliny:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{1}{K\rho_0} = c_0^2$$

$\rho_0$  – statická hodnota hustoty prostředí,  $K$  – koeficient adiabatické stlačitelnosti

- Rychlost šíření zvuku v kapalinách:

$$c_0 = \sqrt{\frac{1}{K\rho_{00}}}$$

ve vodě při 0 °C:  $c_0 = 1440$  m/s.

- Rychlost šíření zvuku v pevných látkách:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

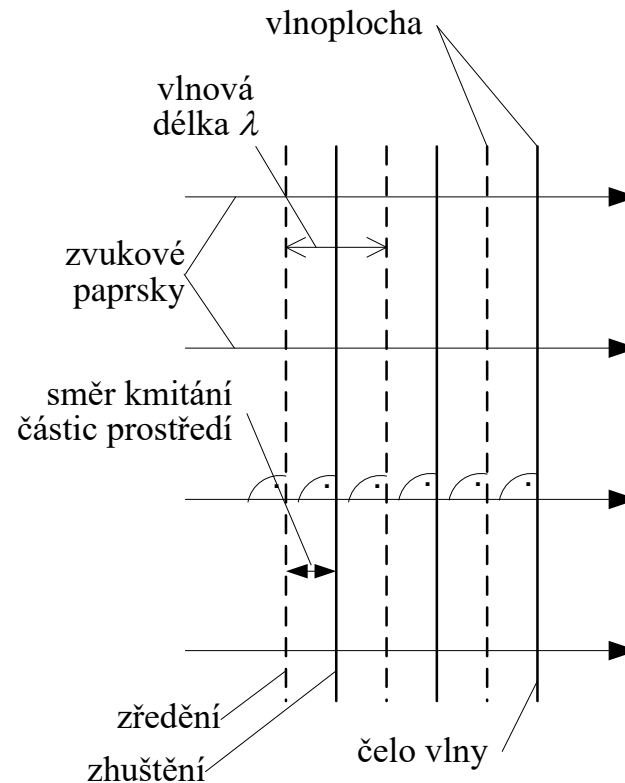
$E$  – modul pružnosti v tahu,  $G$  – modul pružnosti ve smyku [N/m<sup>2</sup>].



# Základní typy vlnění

# Rovinné vlnění

- vlnění se šíří kolmo k rovině  $yz$  (ve směru osy  $x$ ) – kmitající rovina
- řešení v kartézských souřadnicích
  - $x$  – vzdálenost od osy  $x$
  - $y$  – vzdálenost od osy  $y$
  - $z$  – vzdálenost od osy  $z$



# Energetické poměry rovinného vlnění

- Intenzita harmonického rovinného vlnění:

$$I = \frac{p_{\text{ef}}^2}{|z_A|} \cos \varphi_A = \frac{p_{\text{ef}}^2}{\rho_0 c_0}$$

- Akustický výkon:

$$P = Fv = pSv \cos \phi = SI = \frac{Sp_{\text{ef}}^2}{\rho_0 c_0}$$

$\phi$  – úhel, který svírá normála k ploše  $S$  s vektorem akustické rychlosti

- Akustický výkon je konstantní a obsah povrchu vlnoploch nemění se vzdáleností od zdroje zvuku, z toho vyplývá:

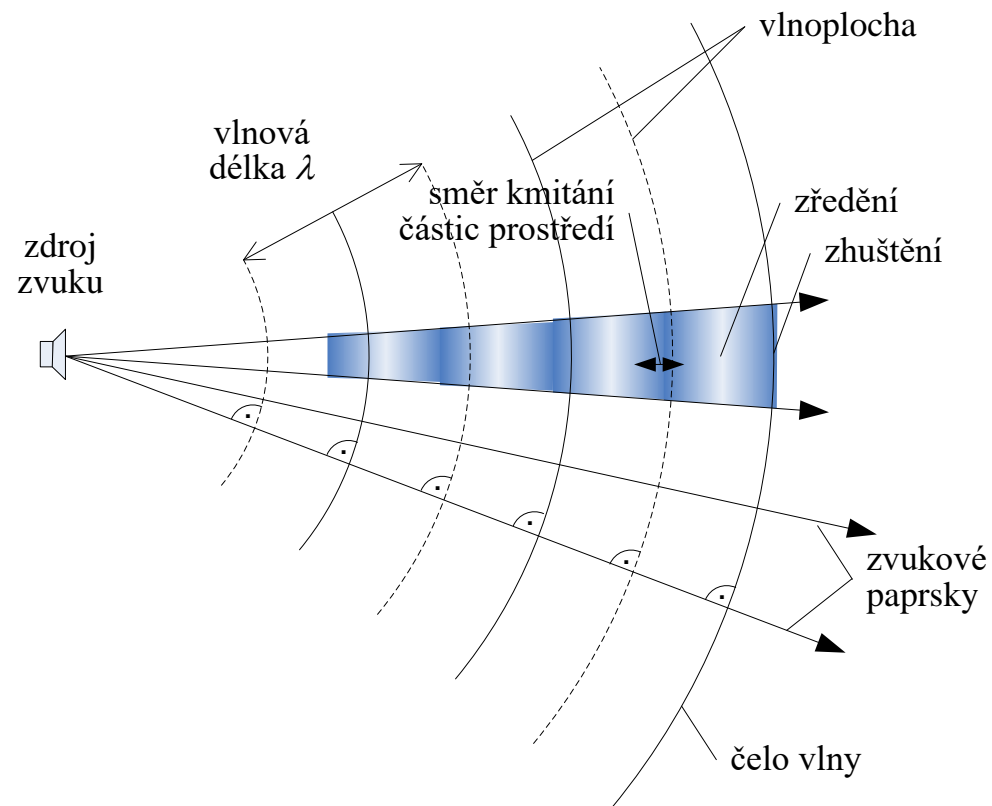
- 1) intenzita zvuku se se vzdáleností od zdroje zvuku nemění

$$I_2 = I_1$$

- 2) akustický tlak se se vzdáleností od zdroje zvuku nemění

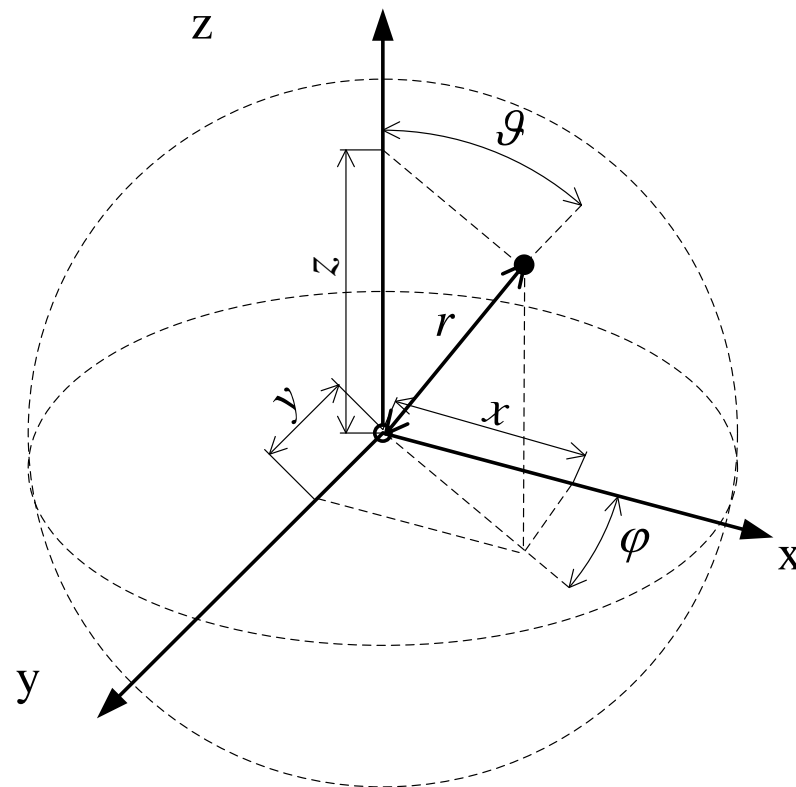
$$p_2 = p_1 \quad L_{p2} = L_{p1}$$

# Kulové vlnění



# Kulové vlnění

- vlnění se šíří kulově symetricky k počátku souřadnic ve směru souřadnice  $r$
- řešení ve sférických souřadnicích
  - $r$  – poloměr
  - $\varphi$  – azimut
  - $\mathcal{G}$  – elevace



# Energetické poměry kulového vlnění

- Intenzita zvuku harmonického kulového vlnění

$$I = \frac{P_{\text{ef}}^2}{z_A} = \frac{P_{\text{ef}}^2}{\rho_0 c_0} \left( 1 - j \frac{1}{kr} \right)$$

pro  $kr \rightarrow \infty$  se imaginární část  $\rightarrow 0$  a intenzita zvuku je stejná jako u rovinné vlny

- Akustický výkon  $P = SI$  je konstantní a plocha kulové vlny ( $S = 4\pi r^2$ ) se se vzdáleností od zdroje zvuku zvětšuje s  $r^2$ , z toho vyplývá

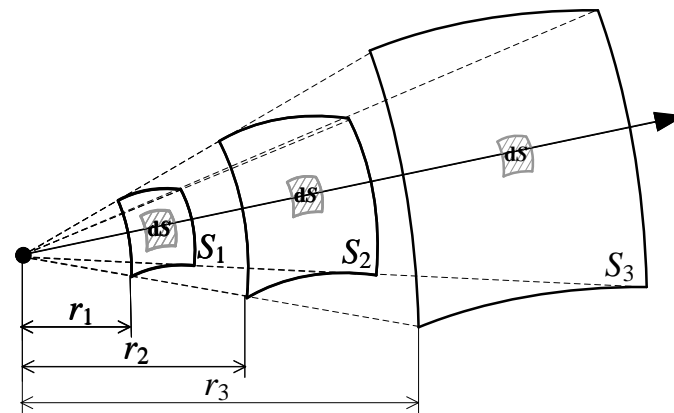
- intenzita zvuku se vzdáleností od zdroje zvuku klesá s 2. mocninou vzdálenosti

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 \quad I_2 = I_1 (r_1 / r_2)^2$$

- akustický tlak se vzdáleností od zdroje zvuku klesá s 1. mocninou vzdálenosti

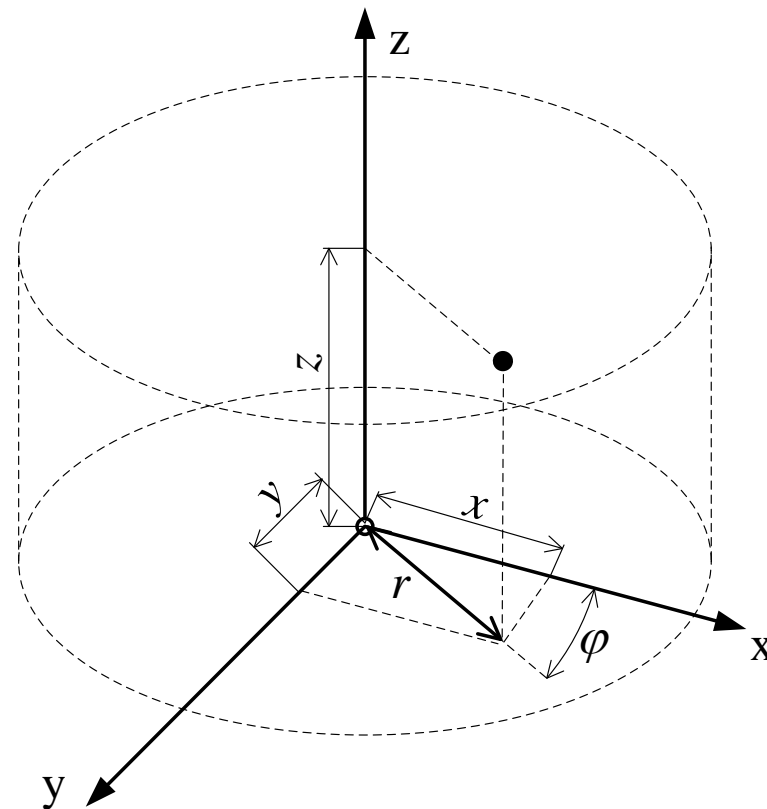
$$\frac{P_{\text{ef1}}^2}{z_A} = \frac{P_{\text{ef2}}^2}{z_A} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \quad p_2 = p_1 (r_1 / r_2)$$

$$L_{p2} = L_{p1} + 20 \log(r_1 / r_2)$$



# Válcové vlnění

- vlnění se šíří válcově symetricky k ose  $z$  ve směru souřadnice  $r$
- řešení v cylindrických souřadnicích
  - $r$  – poloměr
  - $\varphi$  – úhel
  - $z$  – vzdálenost od osy  $z$



# Energetické poměry při válcovém vlnění

- Akustický výkon  $P = SI$  je konstantní a plocha válcové vlny ( $S = 2\pi rz$ ) se se vzdáleností od zdroje zvuku zvětšuje s  $r$ , z toho vyplývá:

- 1) intenzita zvuku se vzdáleností od zdroje zvuku klesá s 1. mocninou vzdálenosti

$$2\pi r_1 z I_1 = 2\pi r_2 z I_2 \quad I_2 = I_1 (r_1 / r_2)$$

- 2) akustický tlak se vzdáleností od zdroje zvuku klesá s odmocninou vzdálenosti

$$\frac{p_{\text{ef1}}^2}{z_A} = \frac{p_{\text{ef2}}^2}{z_A} \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \quad p_2 = p_1 \sqrt{r_1 / r_2}$$

$$L_{p2} = L_{p1} + 10 \log(r_1 / r_2)$$



# Typy zvukových polí

# Typy zvukových polí

- **Primární vlny:** postupující od zdroje zvuku
- **Sekundární vlny:** primární vlny odražené od stěn prostoru a překážek
- **Volné pole:** hustota akustické energie sekundárních vln je nižší než hustota akustické energie primárních vln

- Hustota akustické energie primárních vln:

$$w_V = \frac{P}{c_0 S}$$

$P$  – akustický výkon zdroje zvuku,  $c_0$  – rychlost šíření zvuku,  $S$  – plocha vlnoplochy

- **Difúzní pole:** směr šíření energie zvukového vlnění je náhodný a stále se mění, nelze definovat vlnoplochu
- Hustota akustické energie sekundárních vln:

$$w_D = 4 \frac{P}{c_0 A}$$

$A$  – celková pohltivost prostoru

# Typy zvukových polí

- **Dozvuková vzdálenost:** vzdálenost od zdroje zvuku, kde se hustota akustické energie primárních vln rovná hustotě akustické energie sekundárních vln  $w_V = w_D$ :

$$\frac{P}{c_0 4\pi r^2} = 4 \frac{P}{c_0 A}$$

- Pro kulové vlnění je obsah vlnoplochy  $S = 4\pi r^2$ , tj.

$$r^2 = \frac{A}{16\pi} \quad \rightarrow \quad r = 0,14\sqrt{A}$$

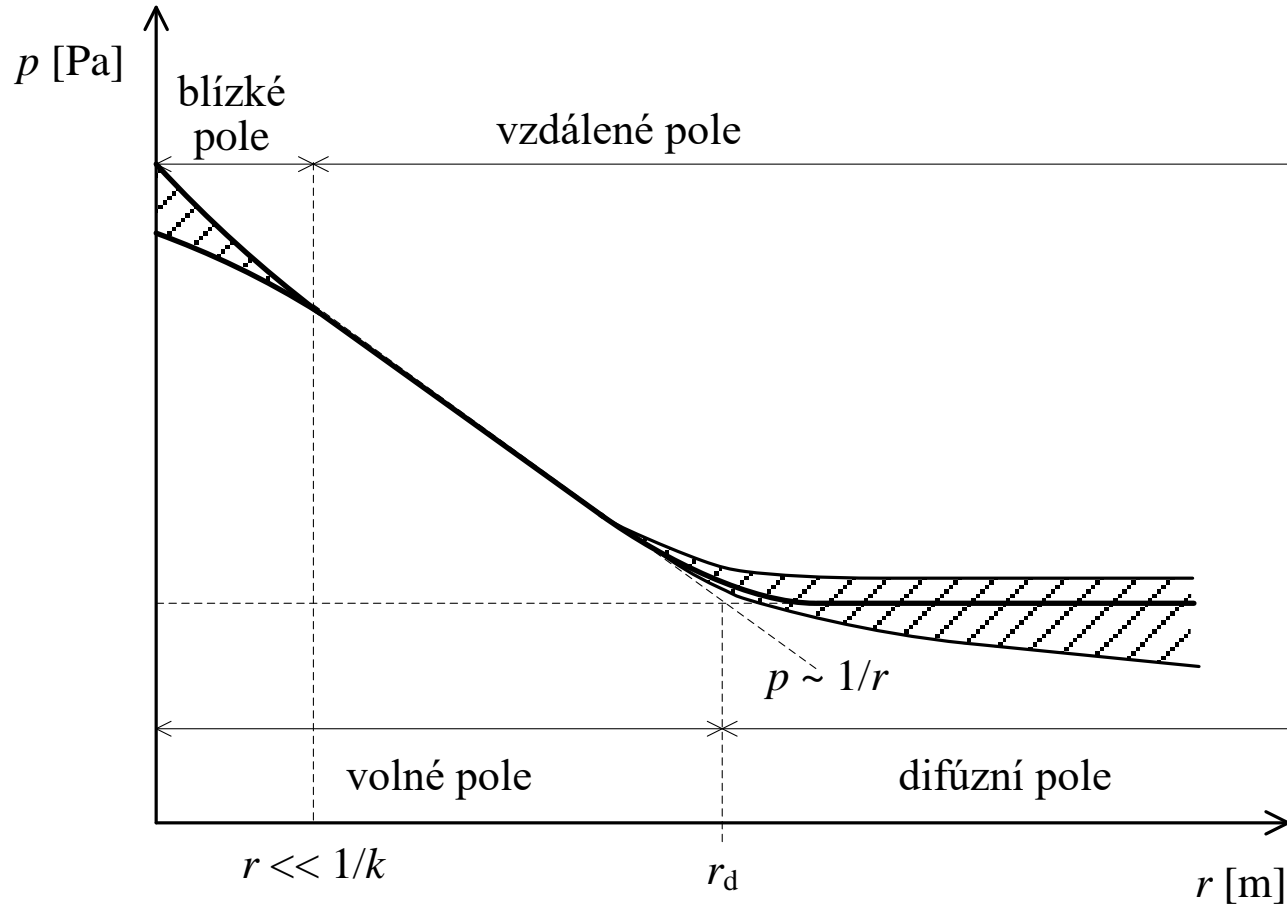
- **Blízké pole** (Fresnelův prostor): nehomogenní pole vzniklé interferencí v blízkosti větších zdrojů zvuku

$$kr \ll 1$$

$r$  – vzdálenost od zdroje zvuku,  $k$  – vlnové číslo

- **Vzdálené pole:** pole v dostatečné vzdálenosti od zdroje zvuku
- V blízkém a difúzním poli není poměr akustického tlaku a akustické rychlosti roven vlnové impedanci a proto v nich neplatí mnohé z používaných vztahů!

# Typy zvukových polí



# Zvuková vlnění