

# Zvuková tvorba

## Osnova:

- Zvuk, jeho vlastnosti, šírenie, zdroje zvuku
- Mikrofóny, vlastnosti, použitie, technika snímania zvuku
- Ostatné zdroje audiosignálu
- Technické prostredie spracovania zvuku
- Mixážne pulty, vlastnosti, koncepcia, použitie
- Spracovanie vo frekvenčnej, amplitúdovej a časovej oblasti
- Analógový záznam a reprodukcia elektroakustického signálu
- Digitalizácia zvuku, vlastnosti prevodníkov
- Záznam a editácia zvukových signálov v softvérovom prostredí
- Kompresné formáty, ich princíp a použitie
- Kontajnery na transport a záznam digitálneho zvuku
- Viackanálové zvukové systémy
- Zvuková syntéza a syntezátory, MIDI
- Práca so zvukom, zvuková zložka multimediálneho diela
- Zvuková a ruchová dramaturgia

Sylaby k prednáškam: [kt.uniza.sk/download/...multimédia](http://kt.uniza.sk/download/...multimédia)

## Ostatná odporúčaná literatúra:

Vlachý, V.: Praxe zvukové techniky. Muzikus, 1995

Forró, D.: Domáci nahrávací studio. Grada, 1996

Bláha, I.: Zvuková dramaturgie audiovizuálního díla. AMU Praha 2006

Grebler, E.: AUDITION Ignite!, 2004

Owsinski, B.: The Recording Engineer's Handbook. ArtistPro, 2005

Huang, Y., Benesty, J.: Audio signal processing for Next Generation  
Multimedia communication systems.

Zvuk – chvenie **hmotných** častíc prostredia, napr. vzduchu  
 Zhust'ovanie a zried'ovanie hmotných častíc vzduchu ► **zmena tlaku**  
 vzduchu postupujúca prostredím ► **Zvuková vlna**

**Akustický tlak** ( $p$ ) ► Zmena tlaku  $p_{max} - p_{min} = p$  [Pa, Pa, Pa]

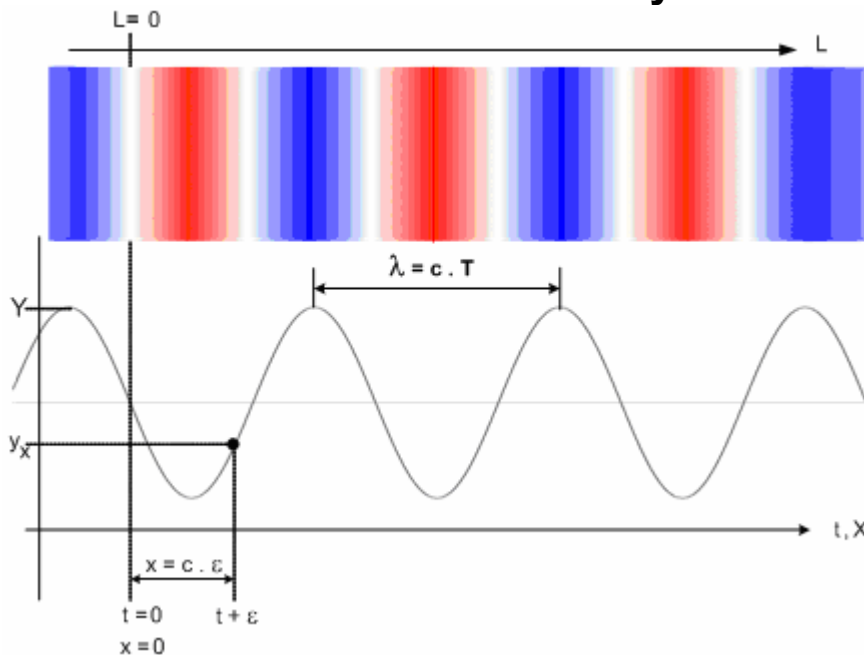
Akustický tlak má veľkosť, je všesmerový ► skalárna veličina

**Frekvencia** ( $f$ ) ► Počet „zhustení“ za jednotku času [Hz]

Vlnová dĺžka ( $\lambda$ ) ► Vzďialenosť, do ktorej dorazí vzruch za periódu  $T$  (dva najbližšie body kmitajúce s rovnakou fázou):

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad [m, m \cdot s^{-1}, s; \quad m \cdot s^{-1}, Hz]$$

**Rýchlosť šírenia vzruchu – fázová rýchlosť vlnenia,  $c$ :**



Rýchlosť pozdĺžneho šírenia v pevnom prostredí:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}, N \cdot m^{-2}, kg \cdot m^{-3}]$$

$E$  - Youngov model pružnosti,  $\rho$  - merná hustota materiálu.

Rýchlosť šírenia v plynnom prostredí: Rovnaký vzťah, zmena premenných:

$$E_p = \chi \cdot p \quad [N \cdot m^{-2}, -, N \cdot m^{-2}],$$

$P$  – tlak plynu,  $\chi$  - **adiabatická konštanta plynu** ( $\chi = 1,4$  pre vzduch),  $E_p$  = pružnosť plynného prostredia

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{kg}, \text{m}^{-3}; \text{N} \cdot \text{m}^{-2}, \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}, \text{K}].$$

Merná hustota – pomer hmotnosti a objemu plynu alebo tlaku plynu  $p$ , molekulovej hmotnosti  $M$ , plynovej konštanty  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  a absolútnej teploty  $T$ .

Vzduch:  $M = 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Fázová rýchlosť šírenia zvuku:

$$c = 20,1 \cdot \sqrt{(273 + t)} \approx 331,6 + 0,6t \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{°C}]$$

Priečna – transverzálna vlna (napr. struna) – rýchlosť šírenia:

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Rýchlosť šírenia úmerná napnutiu struny a nepriamo úmerná mernej hmotnosti.

Materiál	$c$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	Materiál	$c$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Voda, 25 °C	1450	Sklo	5200
Betón	1700	Vzduch, 20 °C	344
Oceľ	5190	Hélium	965
Guma, kaučuk	50	Vodík	1270
Drevo buk, v smere vláknien	4537	Drevo buk, proti smeru vláknien	1138
Oceľ, struna, 1 mm, 500N	285,8		

## VZŤAH MEDZI FREKVENCIOU $f$ A VLNOVOU DĹŽKOU $\lambda$

$f$ [Hz]	$\lambda$ [cm]	$f$ [Hz]	$\lambda$ [cm]
16	21 200	2 000	17
100	3 400	8 000	4,2
440	85	20 000	1,7

## Parametre zvukovej vlny a prostredia

**Akustická rýchlosť:**  $v = \omega \cdot u$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}$ ]

$u$  – amplitúda rozkmitu častíc,  $\omega$  – uhlová rýchlosť

Derivácia akustickej rýchlosti podľa súradnice smeru šírenia zvuku:

**Akustické zrýchlenie:**  $a = \omega^2 \cdot u = \omega \cdot v$  [m.s<sup>-2</sup>, rad.s<sup>-1</sup>, m]

**Akustická objemová rýchlosť** (akustický tok) – súčin rýchlosti toku prostredia v ktorom sa šíri zvuková vlna a plochy, ktorou preteká:

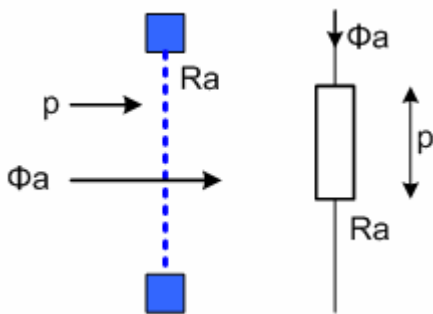
$$\Phi_a = v \cdot S \quad [m^3 \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-1}, m^2]$$

Podobne akustické **objemové zrýchlenie**

**Akustická impedancia (akustický Ohmov zákon):**

Elektromechanická analógia (ak. tlak/napätie, obj. rýchlosť/prúd)

Akustická impedancia - pomer ef. akustického tlaku na ploche a objemovej rýchlosti toku, ktorý tlak vyvoláva, komplexný charakter, závislosť na frekvencii

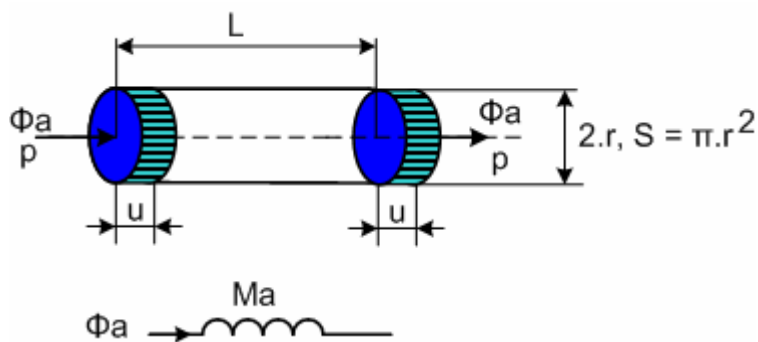


$$Z_{ak} = \frac{p}{v \cdot S} \equiv \frac{p}{\Phi_a}$$

$$[\Omega_{ak} = kg \cdot m^{-4} \cdot s^{-1}, s \cdot Pa = m^2 kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}, m^3 \cdot s^{-1}]$$

Hrany, mriežky, tkanina, malé otvory,...

**Akustická hmotnosť (zotrvačnosť):** Hmotnosť kmitajúceho vzduchu na konci žiarča



**Akustická objemová výchylka:**

$$O_v = S \cdot u \quad [m^3]$$

$$p_a = j \cdot \omega \cdot \Phi_a \cdot M_a$$

$$M_a = \frac{\rho \cdot \left( L + \frac{16 \cdot r}{3 \cdot \pi} \right)}{S} \quad [kg \cdot m^{-4}]$$

**Mechanická impedancia** – Komplexný pomer sily a rýchlosti kmitania sústavy:

$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{p \cdot S}{v} = Z_{ak} \cdot S^2 \quad [\Omega_m = \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

**Charakteristická akustická impedancia** (prenosového média) - komplexný odpor, ktorý kladie prostredie voči šíreniu akustického rozruchu

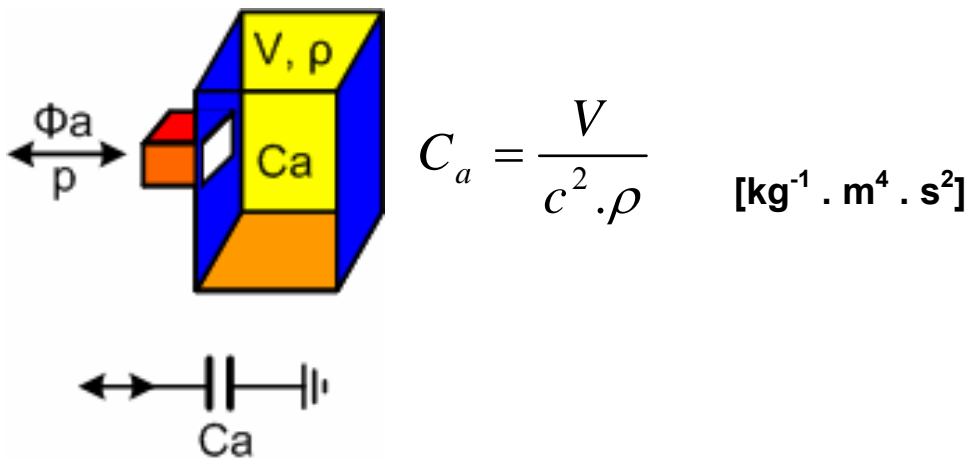
$$Z_0 = \rho \cdot c = \frac{p}{v} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Vzduch:  $\rho$  (1,21 kg.m<sup>-3</sup>) a  $c$  (344 m.s<sup>-1</sup>):  $Z_0 = 416,24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

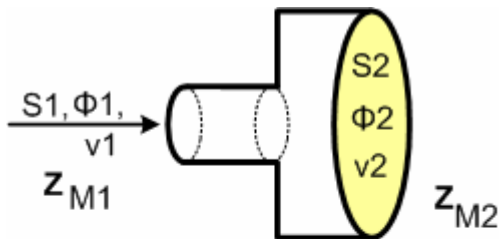
Ak. impedancia môže mať charakter reálny ( $R_a$ ), charakter kmitajúcej hmoty ( $j \cdot \omega \cdot M_a$ ) alebo poddajnosti ( $1/(j \cdot \omega \cdot C_a)$ )

Platí 1. a 2. Kirhoffov zákon ( $\Sigma \Phi_i = 0, \Sigma p_i = 0$ )

**Akustická poddajnosť** – dutina:

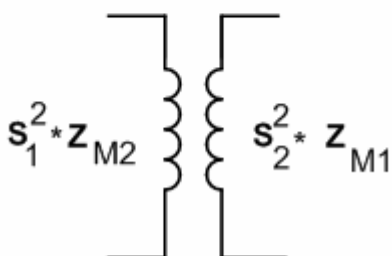


**Impedančné prispôsobenie** – rovnaký význam ako v elektrickej oblasti (akustický transformátor)



**Prevod v ak. oblasti:** ( $\Phi_1 = \Phi_2, Z_{a1} \cdot p_2 = Z_{a2} \cdot p_1$ )

**Prevod v mech. oblasti:**  $\frac{Z_{M1}}{Z_{M2}} = \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2$



**Činiteľ reflexie:**

$$R(f) = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

**Činiteľ transmisie:**

$$T(f) = \frac{2 \cdot Z_0}{Z + Z_0}$$

## VÝKONOVÉ POMERY AKUSTICKÉHO TOKU

**AKUSTICKÝ VÝKON** – energia, ktorá prejde plochou **S** za 1 sec:

$$P = F \cdot v = S \cdot p \cdot v = \rho \cdot \Phi \quad [W, N, m \cdot s^{-1}, Pa, m^3 \cdot s^{-1}] \text{ - špičkový výkon}$$

Stredný výkon:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T F_m \cdot \cos \omega t \cdot v_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) dt = \frac{F_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot \cos \varphi \quad [W]$$

$$P = Z_{ak} \cdot v^2 \cdot S^2 \quad [W, W \cdot m^{-2}, m^2]$$

**Intenzita zvuku** – množstvo energie **E** prechádzajúcej cez jednotkovú plochu kolmú na smer šírenia vlny za jednotku času (výkon zvuku prechádzajúci jednotkovou plochou):

$$I = \frac{E}{t \cdot S} = \frac{P}{S} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad [W \cdot m^{-2}, J, s, m^2; W, m^2; Pa, kg \cdot m^{-3}; m \cdot s^{-1}]$$

Alebo: súčin akustickej rýchlosti a akustického tlaku (plocha 1 m<sup>2</sup>)

$$I = p \cdot v \cdot \cos \varphi \quad [W \cdot m^{-2}, Pa, m \cdot s^{-1}]$$

**tg  $\varphi = \lambda / 2 \cdot \pi \cdot r$**       $r$  – vzdialenosť od žiariča, [m],  $r > 0 \Rightarrow \varphi = 90^\circ$ ,  $r \rightarrow \infty \Rightarrow \varphi = 0^\circ$

**Hladina akustického tlaku SPL:**

$$L = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad [dB, Pa, Pa],$$

(Sound pressure Level)

$$p_0 = 2,00 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

**Hladina intenzity zvuku (SIL, Sound Intensity level):**

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

Vzduch:  $\rho$  (1,21 kg.m<sup>-3</sup>) a  $c = 330,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ :

Akustický tlak [Pa]	SPL [dB]	Intenzita zvuku [W.m <sup>-2</sup> ]	SIL [dB]
2,00.10 <sup>-5</sup>	0	9,6.10 <sup>-13</sup>	0
6,30.10 <sup>-5</sup>	10	9,6.10 <sup>-12</sup>	10
2,00.10 <sup>-4</sup>	20	9,6.10 <sup>-11</sup>	20
2,00.10 <sup>-3</sup>	40	9,6.10 <sup>-9</sup>	40
2,00.10 <sup>-2</sup>	60	9,6.10 <sup>-7</sup>	60
2,00.10 <sup>-1</sup>	80	9,6.10 <sup>-5</sup>	80
1,00	94	2,4.10 <sup>-3</sup>	94
2,00	100	9,6.10 <sup>-3</sup>	100
20,00	120	0,95	120
63,00	130	9,6	130

## Šírenie zvukovej vlny

Reálne: Zvuková vlna veľmi zložitý charakter, daný vlastnosťami zdroja, priestoru,.... riešenie cez diferenciálne vlnové rovnice

Teoreticky tri typy zdrojov zvuku: Bodový – rovinný - líniový

### BODOVÝ ZDROJ (PULZUJÚCA GUĽA, AKUST. MONOPÓL)

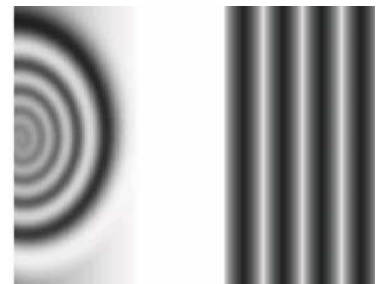
PRIEMER ZDROJA  $\ll \lambda$ , minimálne  $< \lambda/4$

- MAXIMÁ A MINIMÁ LEŽIA NA GUĽOPOCHÁCH s plochou  $4.\pi.r^2$
- AKUSTICKÝ TLAK AJ RÝCHLOSŤ KLESAJÚ LINEÁRNE SO VZDIALENOSŤOU  $r$ :

$$p, v \approx 1/r$$

- INTENZITA ZVUKU: vo vzdialenosti  $r$ , priemer gule  $a$ , rozkmit  $v_s$

$$I(r) = z_0 \cdot \frac{v_s^2}{2.r^2} \cdot \frac{k^2}{1+k^2.a} . a^4$$



MEDZI AKUST. TLAKOM A RÝCHLOSŤOU FÁZOVÝ POSUN  $\cos \varphi$   $\varphi = \arctg(\lambda/2.\pi.r)$

Vlnové číslo:  $k = 2\pi/\lambda$  [rad.s.m<sup>-1</sup>]

### ROVINNÁ VLNA – ZDROJ KMITAJÚCA DOSKA, PRIEMER $\gg \lambda$

AKUSTICKÝ TLAK A AKUSTICKÁ RÝCHLOSŤ SÚ VO FÁZE,  $\cos \varphi = 1$

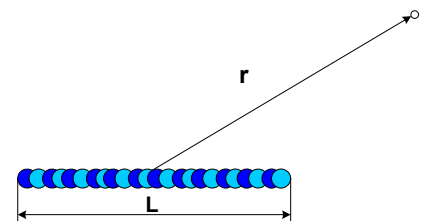
$$p = \rho.\omega.A.\sin(\omega t + X) \quad v = k.A.\sin(\omega t + X)$$

Tlak aj rýchlosť postupujú s fázovou rýchlosťou  $c$  s amplitúdou nezávislou na čase a súradnici

### LÍNIOVÝ ZDROJ (PULZUJÚCA PRIAMKA)

– VALCOVÁ VLNA,  $r \ll L$

- AKUSTICKÝ TLAK KLESA S ODMOCNINOU VZDIALENOSTI  $r$



$$p, v \approx 1/r^{1/2}$$

INTENZITA ZVUKU:  $I \approx 1/r$

ak  $r \gg L$  vlastnosti ako guľový zdroj

Vlastnosti šírenia závisia na vzdialenosti od zdroja, jeho vlastnostiach a vlastnostiach prostredia (prenosového prostredia, média)

Poloha zdroja a prijímača signálu v priestore - rozlišujeme:

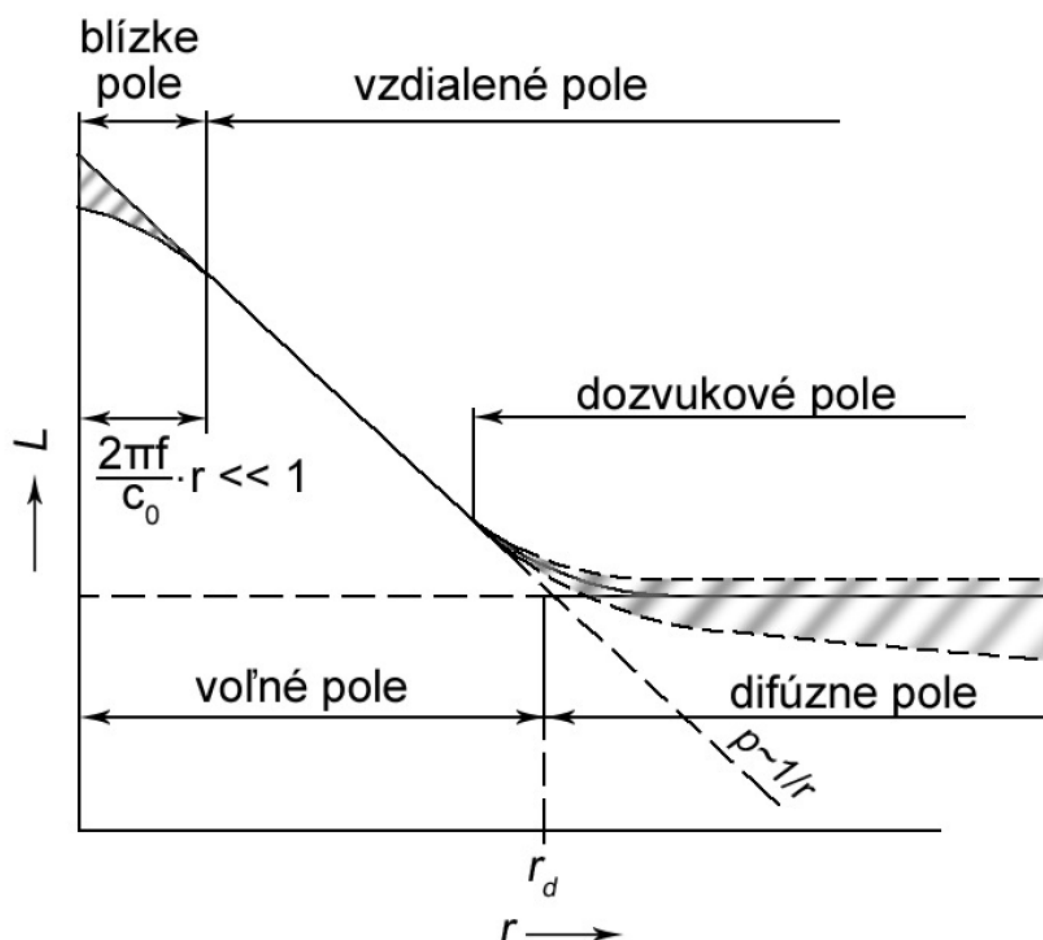
- **Blízke a vzdialené pole**
- **Voľné a difúzne pole.**

**Blízke pole ( $k \cdot r \ll 1$ ):** Vlastnosti akust. poľa nezávisia na prenosovom prostredí

**Voľné pole:** bez odrazov, len zvuk generovaný zdrojom

Blízke pole:

f [Hz]	$\lambda$ [cm]	k [rad.s.m <sup>-1</sup> ]	$r_{\max}$ [cm]
68	5000	1.256	80 cm
680	50	12.56	8 cm
6800	5	125.6	0,8 cm



**Rovinná vlna vo voľnom vzdialenom poli**

Hladina akustického tlaku klesá so štvorcem vzdialenosti  $r$

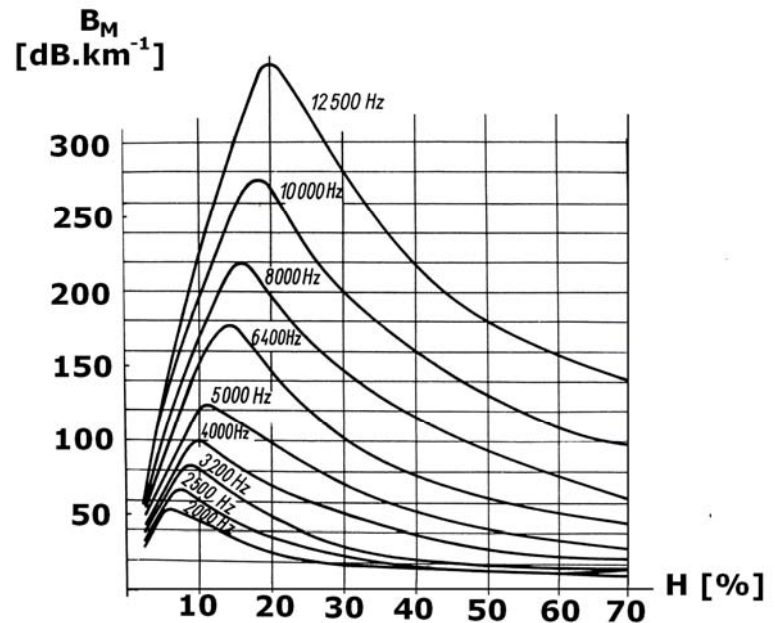
$$L_r = L_G + 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2}\right)$$



prenos energie klesá stratami – vznik tepla,... Molekulárne tlmenie, atmosferické,....

$$L_r = L_G - 11 - 2 \cdot \log(r) - B_M - B_E$$

$B_E$  - tlmenie atmosférou, frekvenčne silno závislé



## OSTATNÉ VLASTNOSTI AKUSTICKÉHO PROSTREDIA A SIGNÁLOV:

**LOM ZVUKOVÝCH VLŇN:** pri prechod z jedného prostredia do iného (napr. vzduch s rôznou teplotou), Snellov zákon

$$v_1 \cdot \sin \beta = v_2 \cdot \sin \alpha$$

### ODRAZ ZVUKOVEJ VLNY:

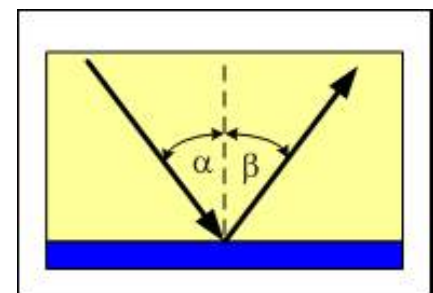
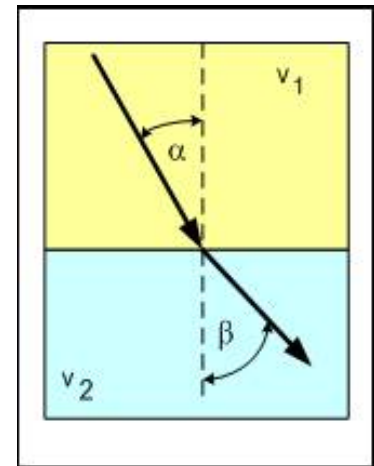
od plochy väčšej ako vlnová dĺžka uhol odrazu = uhol dopadu

Množstvo odrazenej energie dané pohltivosťou plochy (jednotka „Otvorené okno“,  $a = 1$ )

- Odraz a lom sa riadi štandardnými fyzikálnymi princípmi

### Dopplerov efekt

Zmena frekvencie zvuku pohybujúceho sa zdroja/prijímača



## Prekážka vo zvukovom poli

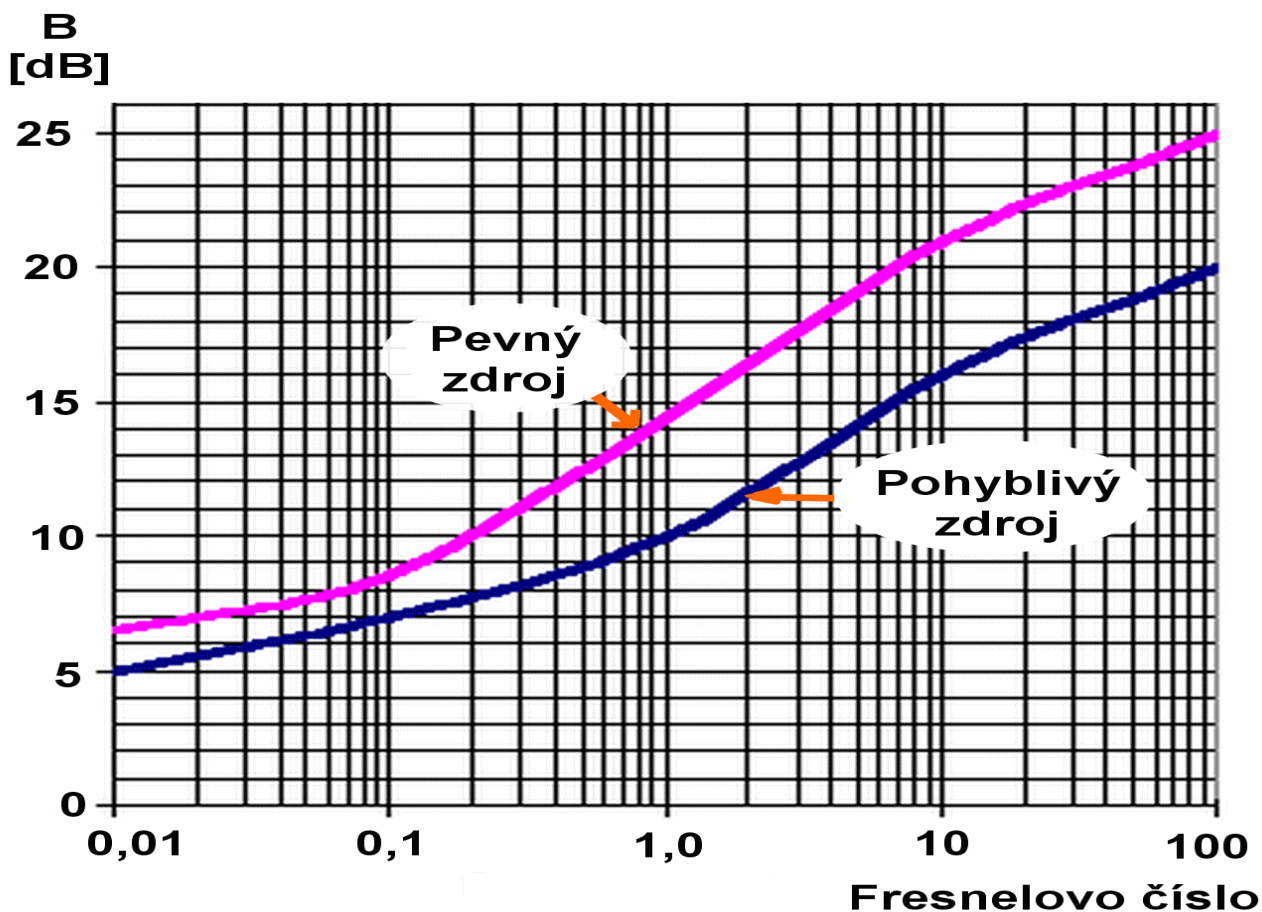
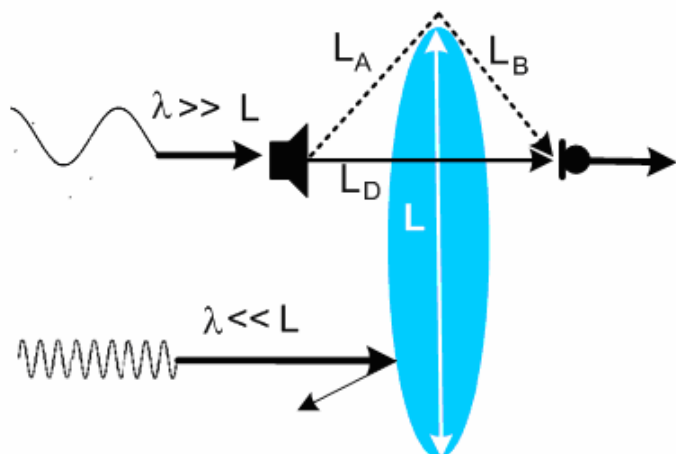
Dopad vlnenia na **pevnú prekážku**  $\gg \lambda$ : Pohltienie / odraz energie

Dopad vlnenia na **pevnú prekážku**  $\leq \lambda$ : Obtekanie prekážky

Akustický tieň, tlmenie stanovuje Fresnelovo číslo:

$$N = \frac{2 \cdot (L_A + L_B - L_D)}{\lambda}$$

[-, m, m, m, m]



## Interakcia zvuku a priestoru

Významný vplyv na charakter zvuku /umocnenie vnemu i degradácia

5P pre kvalitný záznam zvuku:

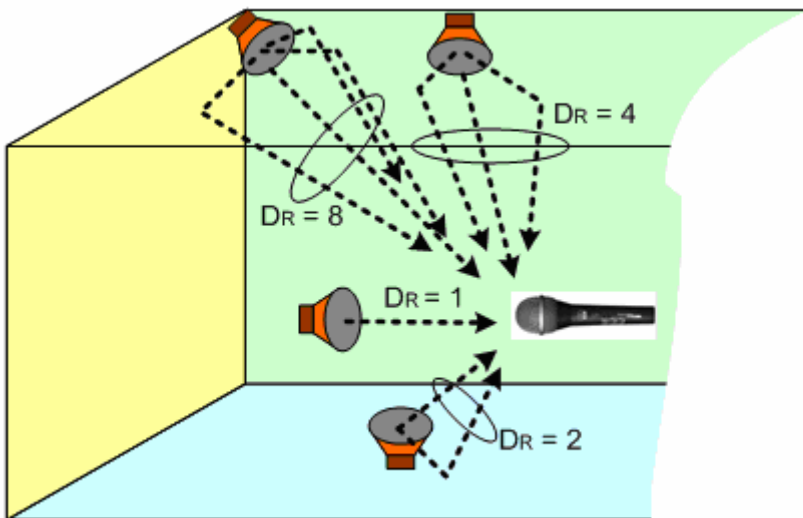
1. Výber vhodného priestoru (najvyššia priorita)
2. Výber vhodnej polohy nástroja v priestore
3. Výber vhodnej polohy mikrofónu
4. Výber vhodného mikrofónu
5. Ak predchádzajúce opatrenia nie sú dostatočné, použitie korekcií v elektrickej oblasti

Na rozdiel od plenéru (alebo anechoidnej komory) vznik odrazov

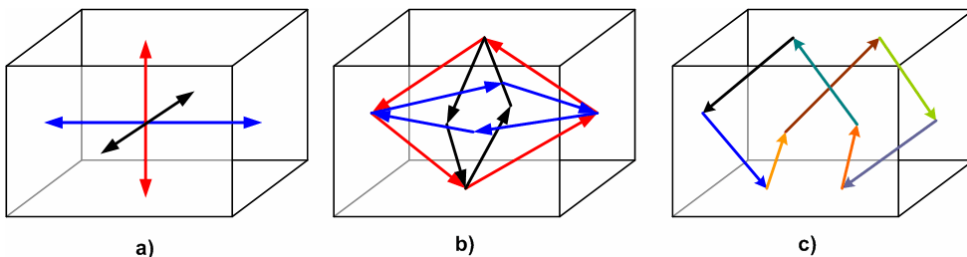
Superpozícia priameho a odrazeného zvuku v rôznom pomere

Vyžarovanie do časti priestoru – vymedzeného bezprostrednou blízkosťou (max.  $0,1 \lambda$ ) reflexnej plochy

**Charakteristika vyžarovania zdroja: činiteľ smerovitosti D**



## Vznik odrazov v uzatvorenom priestore



Axiálny, tangenciálny a viacnásobne lomený mód

Výkonovo je dominantný axiálny mód

## Stojaté vlnenie

- Užitočné (hudobné nástroje – chvenie vzduchového stĺpca a pod.)
- Škodlivé – vznik uzlov a kmitní v uzatvorenom priestore.

### Kritická frekvencia:

$$f = \frac{c}{2 \cdot x} \quad [\text{Hz}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}]$$

$c$  – rýchlosť šírenia zvuku,  $x$  – všetky kombinácie vzdialeností odrazových plôch a ich násobky.

Komplexne:

Rozmery miestnosti  $X, Y, Z$ , počet sledovaných módov –  $n$ :

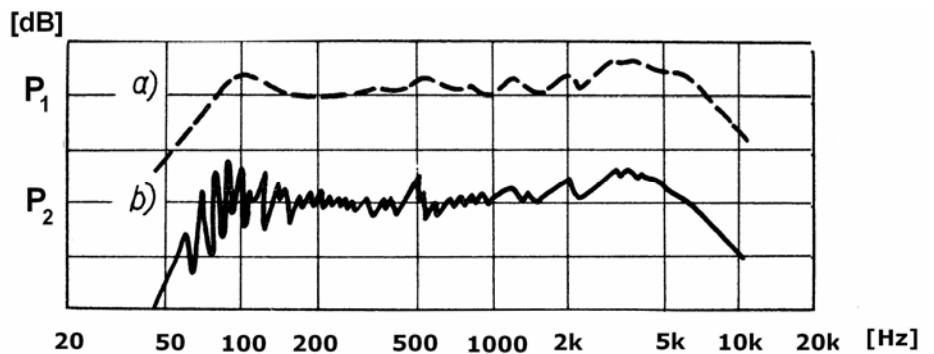
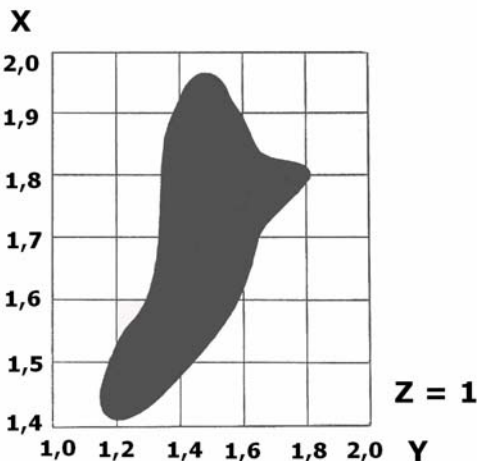
$$\{f_{i,j,k}\}_{i,j,k} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{i^2}{X^2} + \frac{j^2}{Y^2} + \frac{k^2}{Z^2}\right)} \quad [\text{Hz}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}, \text{m}, \text{m}] \quad i, j, k$$

( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 0, 1, 2, \dots, n$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ )

**Príklad: prvých 40 frekvencií axiálneho módu pre miestnosť, ktorá má rozmery 7 m x 5 m x 3 m:**

Frekvencia [Hz]								
24,6	34,4	49,1	57,3	68,8	73,7	98,3	103,2	114,7
122,9	137,6	147,4	172	172	172	196,6	206,4	221,1
229,3	240,8	245,7	270,3	275,2	286,7	294,9	309,6	319,4
344	344	344	368,6	378,4	401,3	412,8	447,2	458,7
481,6	516	516	573,3	630,7	688	745,3	802,7	860

Požiadavka na rovnomerné rozloženie rezonančných módov – optimálne pomery rozmerov miestnosti,  $\{1:1,28:1,54\}$ ,  $\{1:1,14:1,39\}$ ,  $\{1:1,6:2,33\}$ , Boltov diagram



Nerovnoběžné steny – eliminácia trepotavej ozveny

## Regulácia reflexných vlastností priestoru

Reflexné vlastnosti priestoru – užitočné, ale musia byť definované a riadené z hľadiska:

- Množstva odrazenej energie
- Spektrálnych vlastností
- Časových vlastností
- Homogenity poľa.

Podiel absorbovaného akustického výkonu  $I_A$  a dopadajúceho výkonu  $I_D$ :

**Absorpčná konštanta (činiteľ pohltivosti)  $\alpha$ ,**

$\alpha = 0$  (reflexný povrch, všetka energia sa odráža)

$\alpha = 1$  (totálna pohltivosť, „otvorené okno“):

$$\alpha = \frac{I_A}{I_D} \quad [-, \text{W.m}^{-2}, \text{W.m}^{-2}]$$

**Koeficient absorbcie:**

$$A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i \quad [\text{m}^2, \text{m}^2, ]$$

**Priemerná hodnota absorpčnej konštanty:**

$$\alpha_m = \frac{A}{S} \quad [-, \text{m}^2, \text{m}^2]$$

**Reflexné číslo R**

$$R = \frac{A}{1 - \alpha_m} \quad [\text{m}^2, \text{m}^2].$$

**Reflexné vlastnosti priestoru:**

Hladina akustického tlaku v mieste prijímača:

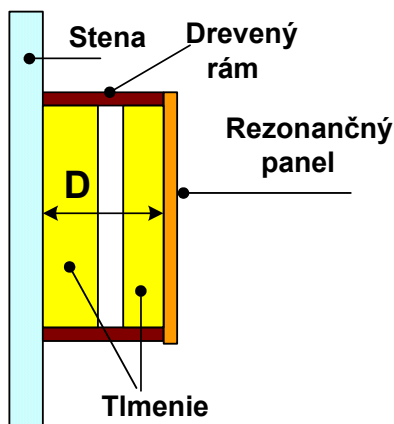
$$p_P = p_V + 10 \cdot \log \left( \frac{D_R}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}, \text{dB}, -, \text{m}, \text{m}^2]$$

Difuzita a homogenita zvuku - difuzory a pod.

Materiál	Činiteľ pohltivosti $\alpha$					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Tehla pálená	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Obklad - kachličky	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Betónový blok, surový	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Betónový blok, natretý	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Dverový otvor	0.28	0.20	0.10	0.10	0.08	0.08
Drevené dvere	0.10	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04
Betónová dlážka	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Drevená dlážka na hranoloch	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Koberiec, 7 mm vlas	0.05	0.10	0.15	0.30	0.50	0.55
Sklené okno	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Drevený panel	0.24	0.19	0.14	0.08	0.13	0.10
Sedadlo v divadle	0.5	0.3	0.4	0.76	0.8	0.76
Dospelý človek	0.5	0.3	0.4	0.76	0.8	0.76
Záves, 620g.m <sup>-1</sup>	0.14	0.35	0.53	0.75	0.7	0.6
Minerálna vlna na stene, 25 mm	0.03	0.22	0.69	0.91	0.96	0.99
Obklad Audiotec S000, 50 mm	0,2	0,6	0,98	1,05	1,0	1,0
Obklad Audiotec S290, 20 mm	0,08	0,25	0,5	0,85	0,98	0,9

## Riešenie pohltivosti v oblasti nízkych frekvencií - akustické rezonančné prvky

**Panelový absorbér** – kmitajúci panel - vzduchová dutina vyplnená pohltivým materiálom ako poddajnosť



$$f = \frac{60}{\sqrt{D \cdot \rho}} \quad [\text{Hz, cm, kg.m}^{-2}]$$

Súčasne: Optimálna plocha panelu:

$$S = \frac{11100}{f^2} \quad [\text{m}^2, \text{Hz}]$$

Príklad:  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $S = 3,1 \text{ m}^2$  (pomer strán je približne 1:6),  $\rho = 10 \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $D = 10 \text{ cm}$

**Helmholtzov rezonátor:** dutina prepojená na vonkajšie prostredie úzkym hrdlom vo funkcii zvukovodu:

$$f = 508 \sqrt{\frac{P}{T \cdot D}} \quad [\text{Hz}, -, \text{cm}, \text{cm}]$$

kde P je percentuálne vyjadrenie pomeru neperforovanej a perforovanej plochy panelu, D je šírka vzduchovej dutiny a T efektívna dĺžka otvoru. Možnosť navrhnuť s podstatne vyššou kvalitou – selektívne potlačenie úzkeho pásma frekvencií.

Príklad: Absorbér 50 cm x 50 cm x 40 cm, dĺžka otvorov 2 cm, dutina D = 10 cm:

P [%]	f [Hz]	Q [-]	B <sub>-3 dB</sub> [Hz]	f <sub>min</sub> – f <sub>max</sub> [Hz]
19,6	81,8	0,52	158,3	2,65 - 161
3,14	48,5	8,0	6,0	45,5 – 51,5
0,78	31,3	64,6	0,48	31,08 – 31,56
0,2	19,3	504	0,04	19,3

## Dozvuk a ozvena

Oneskorenie viac ako 100 ms – ucho vníma samostatný zvuk – ozvenu (echo). Kritická vzdialenosť 17 m, vysoká reflexia odraznej plochy

Ozvena (Hall, reverberation) – podstatne komplikovanejší mechanizmus:

- Prvotné oneskorenie (Pre-delay) – existuje len priama vlna, čas trvania závisí na rozmeroch priestoru
- Prvotné odrazy (Early Reflections) – čas udávajú rozmery priestoru a činiteľ reflexie
- Ustálený stav (Sustain) – kvazistacionárne difúzne zvukové pole
- Pokles úrovne signálu (Decay Time) – postupný pokles úrovne ak. tlaku

**Poloempirický vzťah na stanovenie doby dozvuku (Sabinov vzťah):**

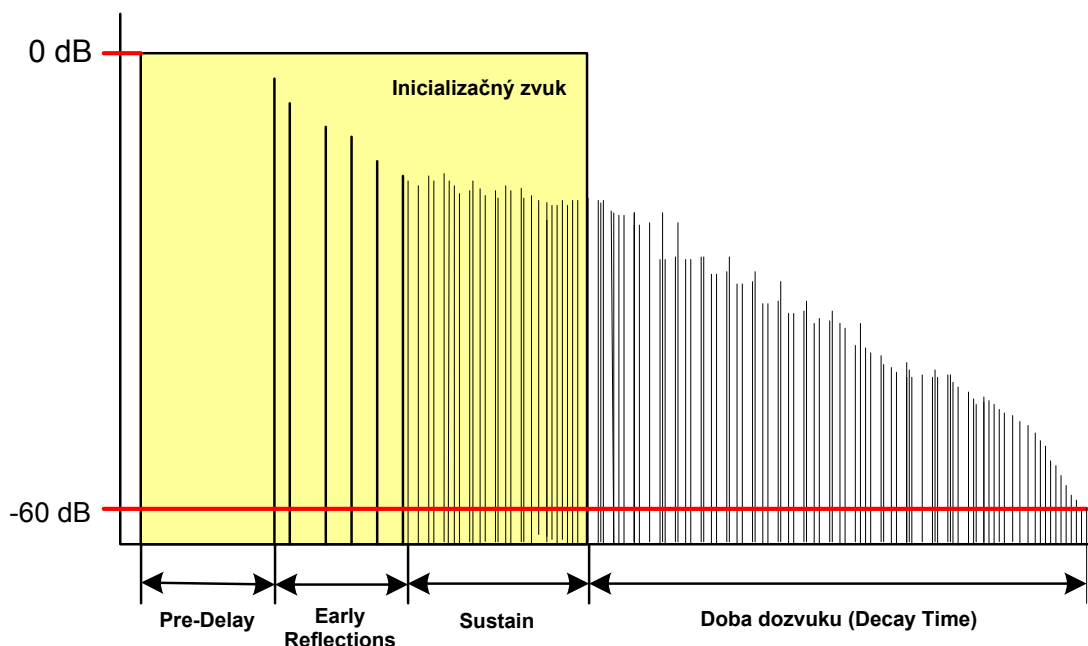
$$t_D \cong 0,164 \cdot \frac{V}{A} \quad [\text{s}, \text{m}^3, \text{m}^2]$$

**Nevyhovuje pre veľkú pohltivosť priestoru**

**Eyringov vzťah:**

Modifikuje činiteľ  $\alpha$  výrazom:  $\alpha_E = -\ln(1 - \alpha)$

$$A_E = S \cdot \alpha_E$$

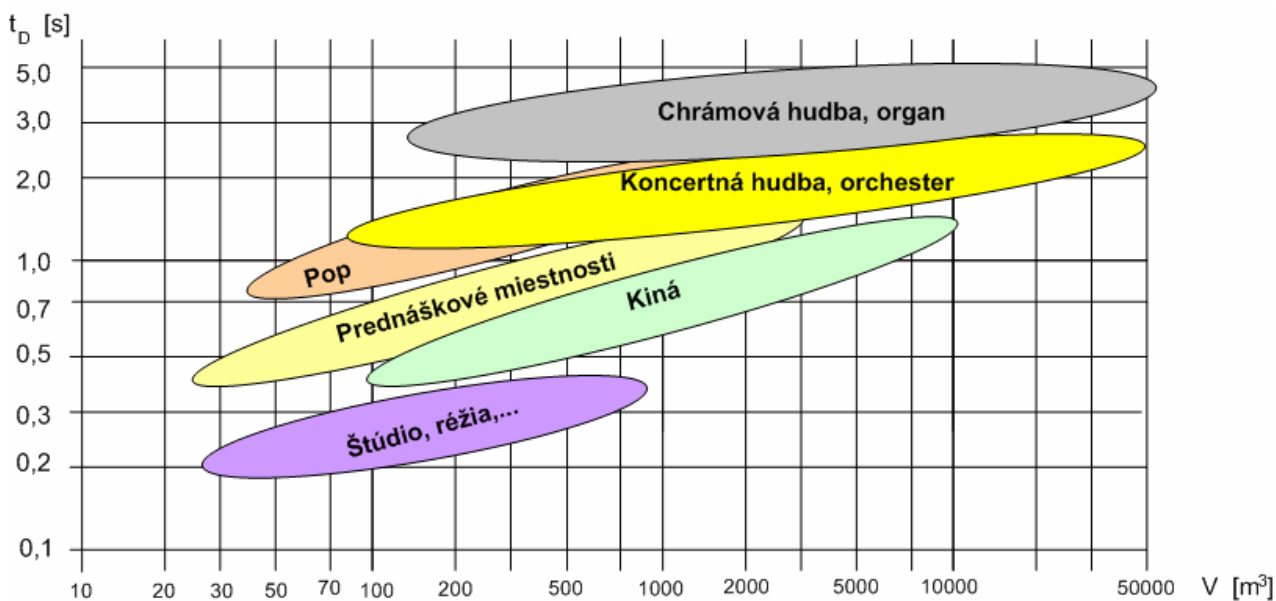


### Polomer dozvuku:

Vzdialenosť medzi zdrojom zvuku a prijímačom zvuku, pri ktorej je rovnaká energia priamej vlny a difúzneho poľa:

$$r_D = \sqrt{\frac{D.R}{16.\pi}} \quad [\text{m, -, m}^2]$$

### Optimálna doba dozvuku:



Pre štúdiá, konferenčné miestnosti a pod.:

$$T = 0,4.\log(V + 62) - 0,38 \quad [\text{s, m}^3]$$

Optimum: v celom pásme 30 Hz ....12 kHz, aspoň: 500 Hz – 12 kHz s plynulým nárastom T na frekvencii 62 Hz na max. 150%.



## Vnímanie zvuku človekom

**Sluchový orgán** - komplexný systém, pozostávajúci (vo veľmi hrubej, „technickej“ interpretácii) z akustických snímačov, prevodníkov akustického signálu na binárny elektrický signál prenášaný neurónmi do mozgu, ktorý zabezpečuje komplexné spracovanie prijatých vzruchov do takej podoby, v akej poznáme a vnímame interpretáciu všetkých zvukov.

Ľudské ucho:

- + **vonkajšie ucho** tvorené ušnicou a vonkajším zvukovodom,
- + **stredné ucho** s bubienkom a sluchovými kostičkami a
- + **vnútorné ucho** so zvukovým labyrintom.

**Vonkajšie ucho:**

- + **sústredenie zvukových vln do vonkajšieho zvukovodu - kanálik nepravidelného tvaru s priemerom okolo 8 mm**
- + **Zvukovod - rezonátor s nízkou kvalitou,  $f_{\text{rez}} = 2 - 5$  kHz. Ukončený bubienkom**

**Stredné ucho:**

- + **Bubienok – kladivko – kovadlinka – strmienok – oválne okienko**
- + **akusticko-mechanický prevodník a mechanicko-hydraulický transformátor s prevodom približne 1:18 (pomer mech. impedancie vnútorného a vonkajšieho ucha asi 1:330**

**Vnútorné ucho**

- + **umiestené v pevnej hlavovej kosti, vyplnené endolymfou**
- + **labyrint, tvorený špirálovo stočeným útvarom – slimákom, chodbičkami a predsieňou**
- + **Dno slimáka - baziliárna membrána s množstvom nervových zakončení**
- + **Nervové zakončenia reagujú selektívne na jednotlivé podnety v závislosti na ich frekvencii – ekvivalent spektrálneho analyzátoru, „Fourierova transformácia- like“, reálny zvuk vždy zmes frekvencií**
- + **komplexná analýza zvukových podnetov**
- + **prenos jednotlivých vzruchov pomocou sluchového nervu formou elektrických signálov do mozgu – logaritmické vyhodnotenie**
- + **Hlasivky/vnútorné ucho súčasť lebečnej dutiny – výrazný presluch**

## Podporné a ochranné mechanizmy ucha:

- ✚ Vyrovnanie statického tlaku na bubienku - Eustachova trubica, ústiaca do nosohltanu
- ✚ napínač bubienku - sval, reguláci napnutie bubienka podľa akustického tlaku – AGC
- ✚ Cortiho orgán - systém na vyhodnotenie rovnováhy
- ✚ Citlivosť a prenos ľudského ucha sú výrazne frekvenčne závislé – max. citlivosť v rozmedzí frekvencií 2 000 Hz až 6 000 Hz.
- ✚ Prahovú hodnotu hladiny akustického tlaku SPL = 0 dB - len niekoľko percent populácie
- ✚ S vekom a únavou sluchového orgánu prah okolo SPL = 30 - 40 dB
- ✚ Monourálny poslech – citlivosť zhoršená o asi o 10 dB

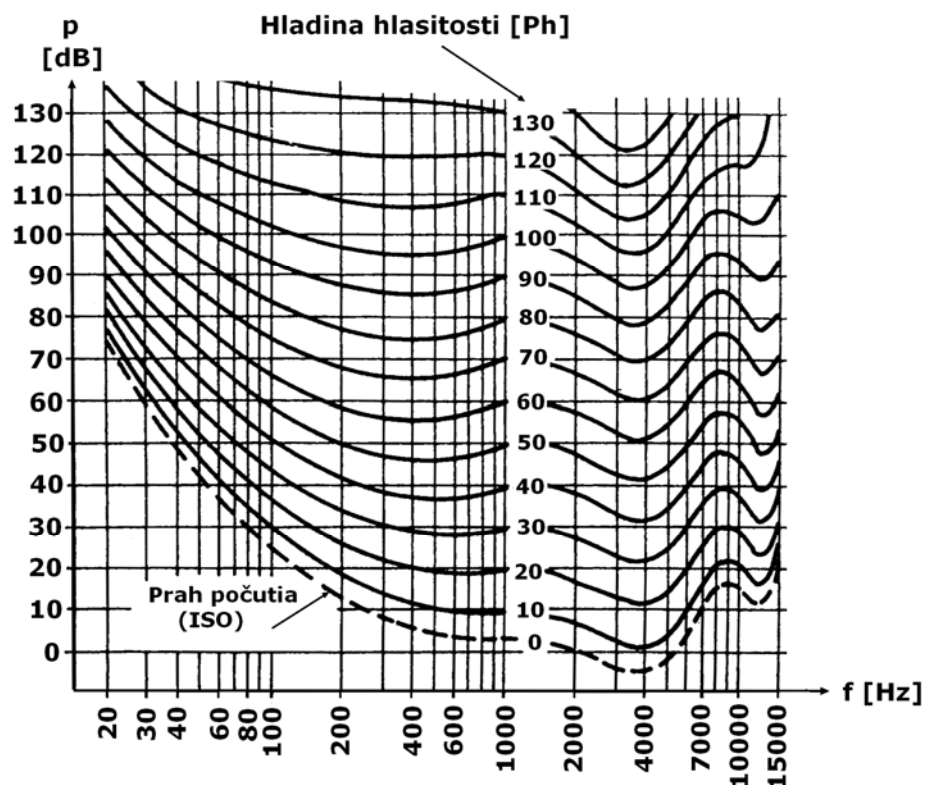
## Krivky rovnakej subjektívnej hlasitosti (izofónne krivky, Fletcher a Munson)

Jednotkou hlasitosti je fón (Ph): hodnota hladiny intenzity zvuku násobená konštantou  $k$  rešpektujúcou frekvenčnú závislosť citlivosti priemerného sluchového orgánu človeka.

$$L_H = k \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

[Ph, -,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

Jednotka *subjektívneho* pocitu *hlasitosti* definovaná v jednotkách *son*

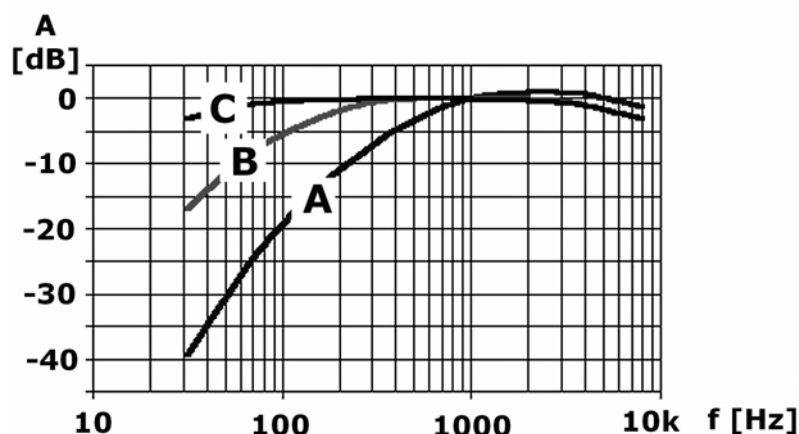


**Jeden son** - hlasitosť, s akou vníma poslucháč referenčný tón s frekvenciou 1 kHz vysielaného s hladinou 40 dB. Subjektívne **n-krát** väčšiu hlasitosť vyjadrujeme ako **n** sonov.

Vzťah medzi **hlasitosťou** [son] a **hladinou hlasitosti** [Ph]:

$$\log N = 0,03 \cdot L_H - 1,2 \quad [\text{son}, \text{Ph}]$$

**Váhovanie úrovni akustických/elektroakustických signálov s rešpektovaním vlastností ľudského sluchu**



Krivka A predpokladá posluhovú hladinu 40 dB.

Rozlišovacia schopnosť ucha z hľadiska úrovne SPL: ideálne podmienky 1 dB, bežne 3 dB.

### Diskusia k vplyvom nerovnomernej frekvenčnej charakteristiky ucha na prácu so zvukom

$L_H$ [Ph]	Zvuková udalosť
0	Prah počuteľnosti vybraných jedincov
10	Ľudský dych zo vzdialenosti 3 m
20 - 30	Šum lístia, základná úroveň hluku v štúdiu, ticho prírody,...
40	Šepot (vzdialenosť 15 cm), ticho v noci – obytné bloky,
50	Tichá kaviareň, tiché kancelárske a bytové priestory
60	Tichá reč, akustická gitara - sólo
70	Normálna reč zo vzdialenosti 1m, flauta, klavír - piano
80	Hlasná reč, klarinet, organ – piano, akustická gitara - forte
90	Hudobné kvarteto, dychové hudobné nástroje,
94	Referenčná hladina pre stanovenie citlivosti mikrofónov (1 Pa)
100	Spev (hlasný, 15 cm), výkriky, hlasná reprodukcia v domácnosti

<b>110</b>	Orchester – forte, klavír - forte
<b>120</b>	Rockový koncert, štart lietadla, veľký bubon 3-5 cm, organ - forte
<b>130</b>	Prah bolesti pri všetkých frekvenciách, štart rakety,...

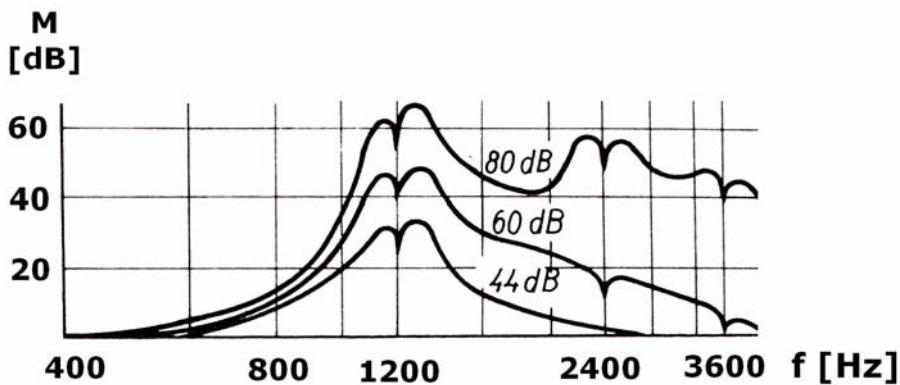
## Hlava ako frekvenčne a časovo závislý prvok v prenosovom reťazci

- ✚ Hlava – pre frekvencie  $>2000$  Hz akustická prekážka – obtekanie, tieň
- ✚ Vzdialenosť uší asi 25 cm – oneskorenie okolo 750 us
- ✚ 750 us - perióda signálu s frekvenciou asi 1350 Hz, fázový posun pozorovateľný takmer v celom akustickom pásme

Prenosové vlastnosti hlavy - definované prenosovou funkciou **HRTF (Head Related Transfer Function)**

### Efekty maskovania zvukov vo frekvenčnej aj časovej oblasti:

**Frekvenčná oblasť:** Maskovací efekt silno závisí na hlasitosti maskujúceho a maskovaného tónu a ich vzájomnej frekvenčnej polohe – maskovací efekt je najvýraznejší pri malom rozdieli frekvencií a veľkom rozdieli úrovne hlasitosti:



Tón s frekvenciou 1200 Hz je prenášaný s SPL 80 dB (60, 44 dB).

Tón s frekvenciou 800 Hz musí mať SPL aspoň 15 dB, tón s frekvenciou 1000 Hz 36 dB a pri frekvencii 1250 Hz okolo 70 dB, aby bol

počuteľný

- ✚ Kritické frekvenčné pásmo okolo dominantného tónu s maskovacím efektom
- ✚ Rozdelenie frekvenčného spektra na kritické intervaly napr. (E. Zwicker):
- ✚ 24 intervalov, tzv. Barkov (podľa H. Barkhausena) - stanovené na základe rozboru činnosti ucha, ktoré pri vzorkovaní jednotlivých akustických podnetov spolu s mozgom separuje tie nervové podráždenia, ktoré vznikli presluchom v baziliárnej membráne:

<b>Stredná frekvencia [Hz]</b>	<b>50</b>	<b>150</b>	<b>250</b>	<b>350</b>	<b>450</b>	<b>570</b>	<b>700</b>	<b>840</b>
	<b>1000</b>	<b>1170</b>	<b>1370</b>	<b>1600</b>	<b>1850</b>	<b>2150</b>	<b>2500</b>	<b>2900</b>
	<b>3400</b>	<b>4000</b>	<b>4800</b>	<b>5800</b>	<b>7000</b>	<b>8500</b>	<b>10500</b>	<b>13500</b>

### **Maskovacie efekty v časovo-amplitúdovej oblasti:**

- ✚ Krátky časový úsek (30 – 50 ms) po doznení silného zvuku je citlivosť ucha znížená, takže slabý zvuk nezachytí**
- ✚ Sluchový systém potláča slabý zvuk predchádzajúci silnému s predstihom rádovo ms**
- ✚ Ak nasledujú po sebe v intervale 10 – 20 ms dva rovnaké zvuky z rôznych smerov, ucho (lepšie povedané celý sluchový podsystem – vrátane spracovania informácií v mozgu) lokalizuje smer zvuku k prvému zvuku, aj keď druhý bol silnejší do približne 10 dB**

### **Vplyv maskovacích efektov**

#### **Pozitívny:**

- ✚ maskovanie šumu a ostatných nežiadúcich signálov**
- ✚ Kompresné technológie, napr, mp3 neprenášajú informácie pod maskovacím prahom**
- ✚ Potlačenie vlastného skreslenia ucha**

#### **Negatívny:**

- ✚ Nepočuteľnosť niektorých zvukov v spektre,**
- ✚ maskovanie zvuku nástrojov při súzvuku viacerých tónov**
- ✚ nerovnomerná frekvenčná charakteristika – riziko maskovania vyššie**