



# **Komunikačná akustika**

**L2**

## **Akustický priestor**

**(Úvod do priestorovej akustiky)**

**prof. Ing. Jozef Juhár, CSc.**

**<http://voice.kemt.feit.tuke.sk>**

# Vlnová rovnica zvuku

(všeobecný matematický model vzniku a šírenia zvuku v priestore)

Odvođená z:

- Eulerovej rovnice
- rovnice kontinuity
- Poissonovej rovnice

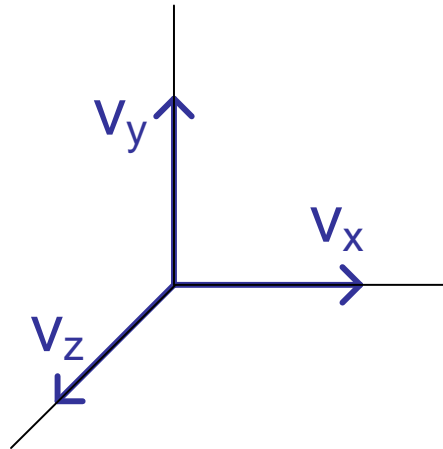
$$\Delta \Phi = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\delta^2 \Phi}{\delta t^2}$$

Rýchlostný potenciál  $\Phi$ :

$$\text{grad } \Phi = \mathbf{v}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \mathbf{i} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot \mathbf{j} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{v}$$

$$v_x \cdot \mathbf{i} + v_y \cdot \mathbf{j} + v_z \cdot \mathbf{k} = \mathbf{v}$$



Laplaceov operátor  $\Delta$ :

$$\Delta = \nabla^2 = \text{div grad}$$

$$\Delta = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}$$

# VLNOVÁ ROVNICA PRE HARMONICKÝ ROZRUCH

*Vstupný predpoklad:*  $\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-j\omega t}$

$$\Delta \Phi + k^2 \cdot \Phi = 0$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad - \text{vlnové číslo}$$

*Všimnite si podobnosť medzi frekvenciou (kmitanie v čase) a vlnovým číslom (kmitanie v priestore):*

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}; T[s] \text{ (perióda kmitania)}$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}; \lambda[m] \text{ (vlnová dĺžka kmitania)}$$

# RIEŠENIE VLNOVEJ ROVNICE PRE ROVINNÚ ZVUKOVÚ VLNU

- V prípade rovinatej zvukovej vlny predpokladáme šírenie zvukovej vlny v smere jednej z osí (x,y,z) kartézskej (pravouhlej) súradnicovej sústavy.
- Ak napr. predpokladáme šírenie zvukovej vlny v smere osi x, bude platiť:

$$\Phi = \frac{\delta^2 \Phi}{\delta x^2}$$

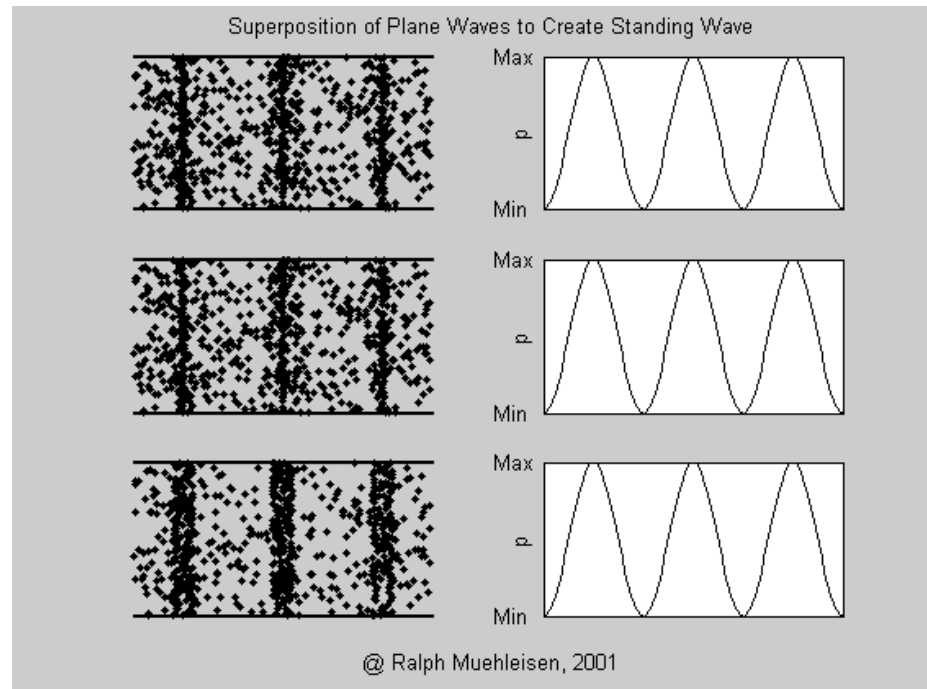
vlnová rovnica:  $\frac{\delta^2 \Phi}{\delta x^2} + k^2 \cdot \Phi = 0$

riešenie:  $\Phi = A \cdot e^{j(\omega t - kx)} + B \cdot e^{j(\omega t + kx)}$

- časo-priestorový charakter zvukovej vlny; (-kx): priama vlna, šíriaca sa od zdroja; (+kx): odrazená (spätná) vlna, šíriaca sa k zdroju;

# Stojatá vlna

- tzv. oscilujúca vlna
- vzniká pri sčítaní priamej a odrazenej vlny (rovnakej amplitúdy a frekvencie)
- v uzloch stojatej vlny ( $kx = \pi/2, 3\pi/2, \dots$ ) je nulová výchylka kmitania tým aj nulový ak. tlak
- v „antiuzloch“ ( $kx = 0, \pi, 2\pi, \dots$ ) stojatej vlny je výchylka maximálna a dvojnásobná (v porovnaní s priamou resp. odrazenou vlnou)
- keďže pozícia uzlov a „antiuzlov“ je v priestore stabilná, zdá sa, akoby vlna stála na jednom mieste – stojatá vlna
- animácie: <http://www.walter-fendt.de/ph14e/stwaveref1.htm>



ak:

$$A=B$$

rýchl. potenciál:

$$\Phi = A \cdot e^{j(\omega t - kx)} + A \cdot e^{j(\omega t + kx)}$$

$$\Phi = 2A \cdot \cos(kx) e^{j\omega t}$$

# Akustický tlak a akustická rýchlosť v poli priamej rovinnej zvukovej vlny

- dá sa dokázať, že platí:

$$v = v_x = \frac{\delta \Phi}{\delta x} = -j \cdot k \cdot A \cdot e^{j(\omega t - kx)}$$

$$p = -\rho_0 \cdot \frac{\delta \Phi}{\delta t} = -j \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot A \cdot e^{j(\omega t - kx)}$$

- amplitúda ak. tlaku a rýchlosti rovinnej zvukovej vlny nezávisí od vzdialenosti od zdroja
- akustický tlak a akustická rýchlosť sú vo fáze (medzi fázormi akustického tlaku a rýchlosti v komplexnej rovine nie je fázový posun)

# Vlnová impedancia a akustická intenzita v poli rovinatej zvukovej vlny

- vlnová impedancia závisí iba od vlastností prostredia, v ktorom sa vlna šíri;
- na určenie akustickej intenzity stačí poznať jednu zo základných akustických veličín – akustický tlak, alebo akustickú rýchlosť – výhodné pre praktické aplikácie

$$z_v = \frac{p}{v} = c_0 \rho_0 = z_{v0} \quad [kg \, m^{-2} \, s^{-1}]$$

$$I_A = \frac{1}{2} p v \cos \varphi = \frac{1}{2} \frac{p^2}{z_{v0}} = \frac{1}{2} v^2 z_{v0} \quad [W \, m^{-2}]$$

$\cos \varphi = 1$  – ak. tlak a rýchlosť sú vo fáze

# Vlnová rovnice pre zvuk vo sférických súradniciach a jej riešenie pre harmonický rozruch a neohraničený priestor

- Ľubovoľný bod v priestore je v kartézskej sústave vyjadrený súradnicami [x,y,z], vo sférickej sústave súradnicami [r,ϑ,φ] (r = vzdialenosť bodu od počiatku, ϑ, φ = priestorové uhly)
- predpokladáme šírenie zvuku rovnomerne všetkými smermi, takže priestorové uhly zanedbávame
- Budiaci signál je harmonický, t.j.:  $\Phi = \Phi_0 e^{-j\omega t}$

$$\frac{\partial^2 (\Phi r)}{\partial r^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 (\Phi r)}{\partial t^2}$$

$$\Phi(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} + \frac{B}{r} e^{j(\omega t + kr)}$$

Rozbiehavá vlna

Zbiehavá vlna



# Akustický tlak, akustická rýchlosť a vlnová impedancia v poli guľovej zvukovej vlny

- Amplitúda oboch veličín klesá s rastúcou vzdialenosťou od zdroja.
- Medzi akustickým tlakom a akustickou rýchlosťou je fázový posun
- Vlnová impedancia má komplexný charakter (má reálnu aj imaginárnu zložku) a závisí od vlnovej dĺžky a vzdialenosti od zdroja zvuku)

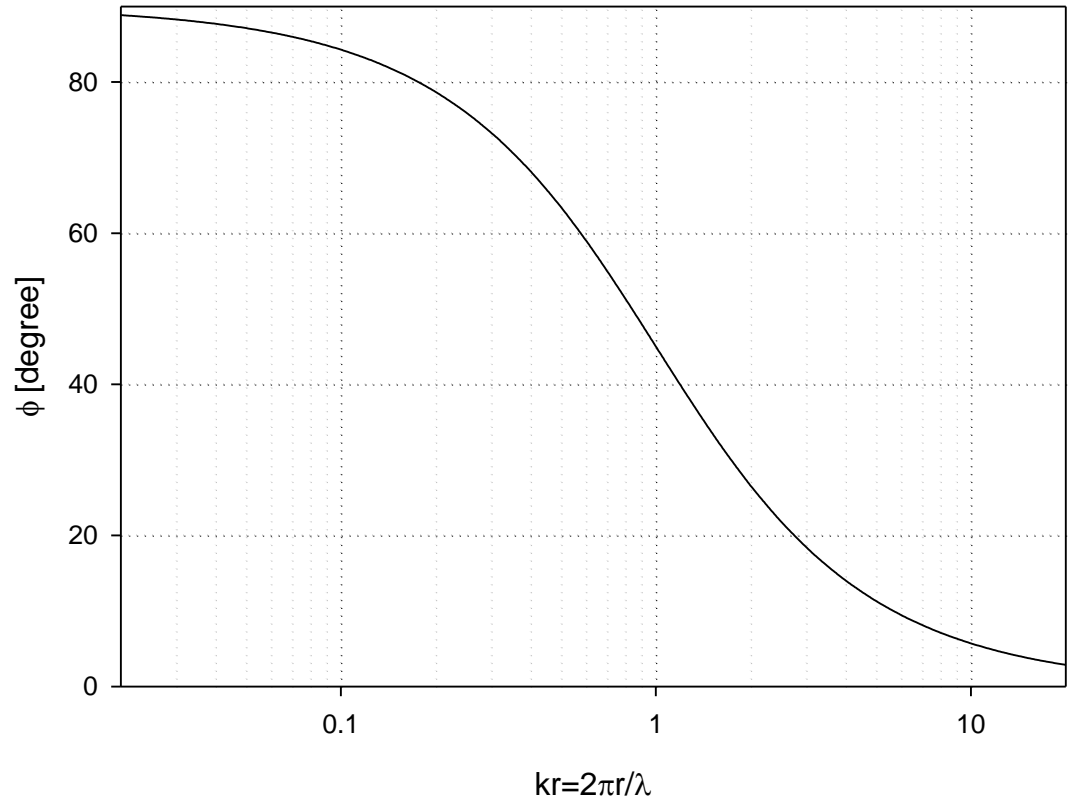
$$p = -j \frac{A}{r} \omega \rho e^{j(\omega t - kr)}$$

$$v = -\frac{A}{r} \left( \frac{1}{r} + jk \right) e^{j(\omega t - kr)}$$

$$z_V = \frac{p}{v} = c_0 \rho_0 \frac{jkr}{1 + jkr}$$

Fázový uhol vlnovej impedancie guľovej zvukovej vlny klesá s rastúcou hodnotou súčinu  $kr$ , t.j.:

- s rastúcou hodnotou vzdialenosti od zdroja ( $r$ )
- s klesajúcou hodnotou vlnovej dĺžky



Napr.  $kr > 10$

bude pre zvukovú vlnu 100Hz

vo vzdialenosti:

$$r > \frac{10}{k} = \frac{10c_0}{2\pi f} = \frac{10 \cdot 344}{2 \cdot \pi \cdot 100} = 5,475[m]$$

bude pre zvukovú vlnu 1000Hz

už vo vzdialenosti:

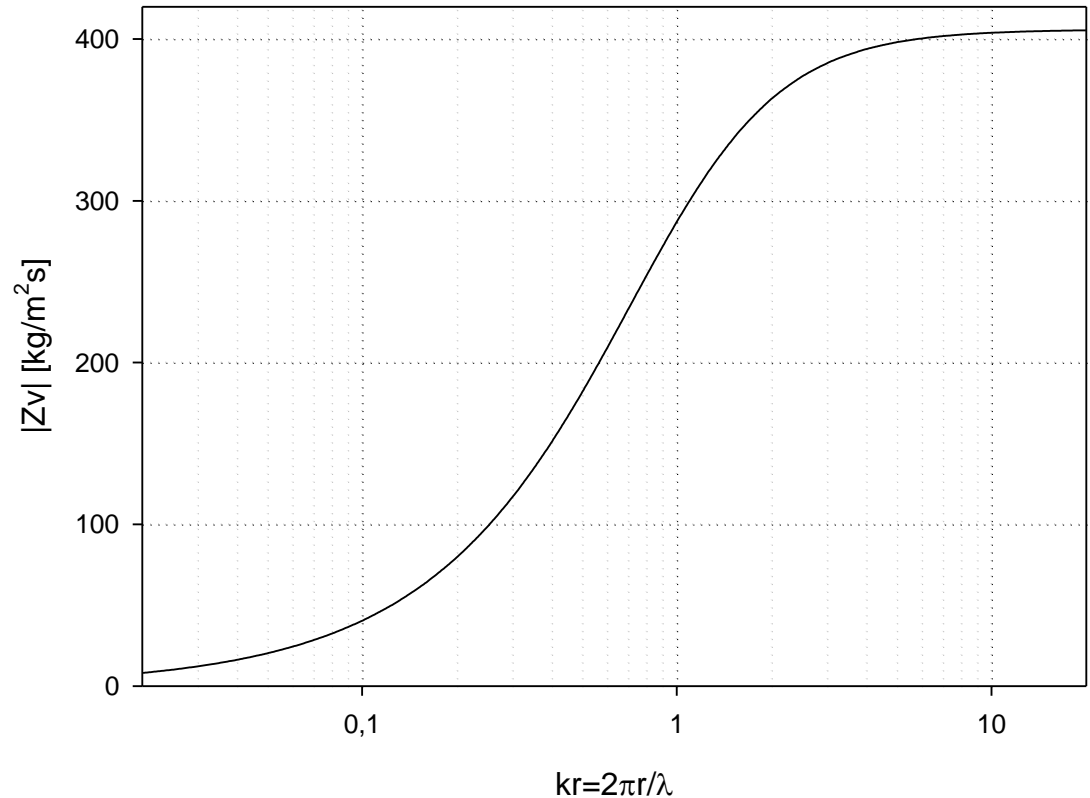
$$r > \frac{10}{k} = \frac{10c_0}{2\pi f} = \frac{10 \cdot 344}{2 \cdot \pi \cdot 1000} = 54,75[cm]$$

$$\varphi = \arctg \frac{r}{k} = \arctg \frac{1}{kr} \Rightarrow \lim_{kr \rightarrow \infty} \varphi(kr) = 0$$

Skutočnosť, že s rastúcou hodnotou súčinu  $kr$  sa fázový uhol limitne blíži k nule a hodnota vlnovej impedancie sa limitne blíži ku konštante  $c_0\rho_0$  znamená, že guľová zvuková vlna sa s rastúcou hodnotou súčinu  $kr$  svojimi vlastnosťami limitne blíži k rovinnej zvukovej vlne.

Znamená to napr., že na meranie akustickej intenzity guľovej vlny môžeme uplatniť jednoduchší postup, aplikovateľný pri rovinnej vlne.

Modul vlnovej impedancie guľovej zvukovej vlny



$$\lim_{kr \rightarrow \infty} z_v = \lim_{kr \rightarrow \infty} c_0 \rho_0 \frac{jkr}{1 + jkr} = c_0 \rho_0 \quad \left[ \text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2} \right]$$

# Blízke a vzdialené pole

- Blízke pole (near field)

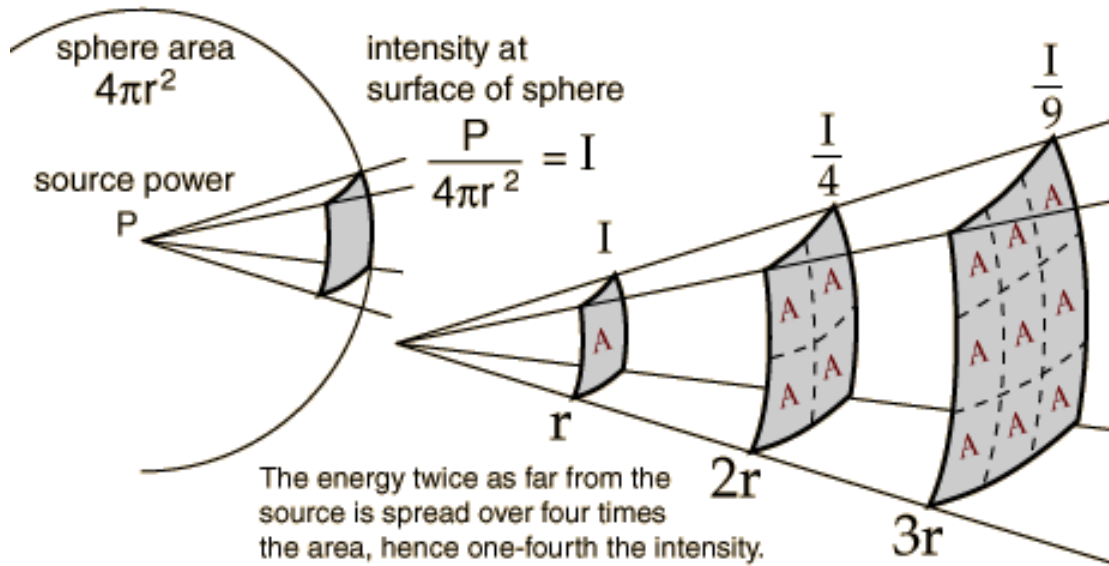
- Je to časť akustického poľa, nachádzajúca sa v blízkosti akustického zdroja (približne do vzdialenosti, kedy platí:  $kr < 1$  t.j.  $2\pi r < \lambda$ ).
- Akustický tlak a akustická rýchlosť v blízkom poli **nie sú** vo fáze.
- Neplatí v ňom jednoduchá relácia medzi akustickým tlakom a vzdialenosťou, t.j. akustický tlak neklesá so štvorcom vzdialenosti (Inverse Square Law)

- Vzdialené pole (far field)

- Je to časť akustického poľa, nachádzajúca sa vo väčších vzdialenostiach od akustického zdroja (približne do vzdialenosti, kedy platí:  $kr > 1$  t.j.  $2\pi r > \lambda$ ).
- Akustický tlak a akustická rýchlosť v blízkom poli **sú** vo fáze, takže zvuková vlna sa môže považovať za **rovinnú**.
- Akustický tlak vo vzdialenom poli klesá so štvorcom vzdialenosti (platí v ňom „Inverse Square Law“).

# Inverse square law

(Zákon inverzného štvorca)

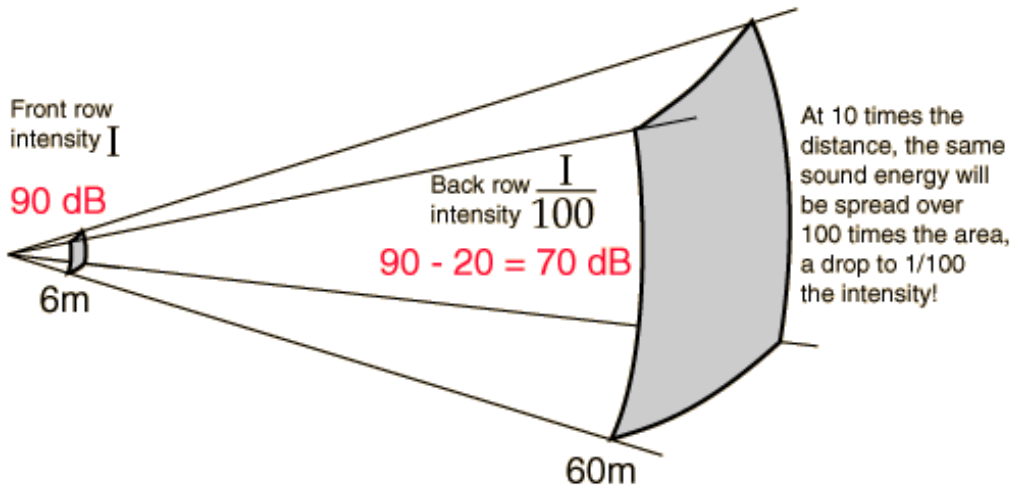


$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{\frac{P_A}{4\pi r_1^2}}{\frac{P_A}{4\pi r_2^2}} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{\frac{(p_{A1})^2}{z_{v0}}}{\frac{(p_{A2})^2}{z_{v0}}} \Rightarrow \frac{p_{A1}}{p_{A2}} = \frac{r_2}{r_1}$$

- Pri konštantnom akustickom výkone zvukového zdroja zvuku a šírení zvuku všetkými smermi akustická intenzita s rastom vzdialenosti klesá.
- Ak predpokladáme rovnomerné všesmerové šírenie zvuku, t.j. guľovú zvukovú vlnu, akustická intenzita guľovej zvukovej vlny sa znižuje úmerne so štvorcem vzdialenosti

# Inverse square law



$$L_{I1} - L_{I2} = 10 \cdot \log \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} = \begin{cases} 20 \text{ dB} & r_2 = 10r_1 \\ 6 \text{ dB} & r_2 = 2r_1 \end{cases}$$

- Desaťnásobné zväčšenie vzdialenosti znamená pokles hladiny akustickej intenzity o 20dB
- Dvojnásobné zväčšenie vzdialenosti znamená pokles hladiny akustickej intenzity o 6dB

# Šírenie zvuku v priestore

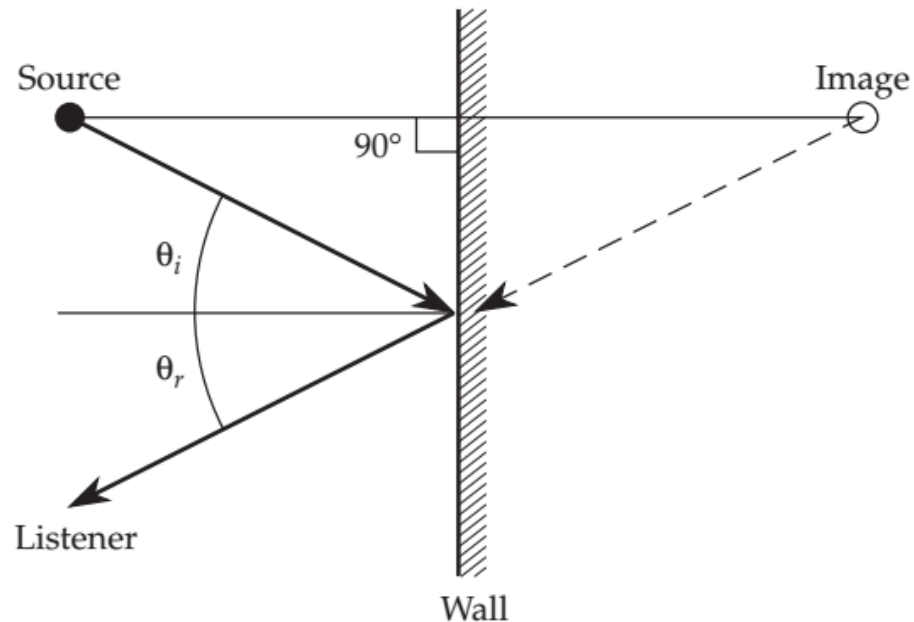
- odraz zvuku (reflection)
- ohyb zvuku (diffraction)
- lom zvuku (refraction)
- rozptyl zvuku (diffusion)
- pohlcovanie zvuku (absorption)

# Odraz zvuku (reflection)

- Odraz od rovinnej steny
  - Uhol odrazu a uhol dopadu zvukového lúča
  - Princíp virtuálneho akustického zdroja
- Odraz od konvexných a konkávných plôch
- Odraz od parabolickej plochy
- Odraz v rohoch stien
- Nárast akustickej energie v okolí odrazu (princíp superpozície)

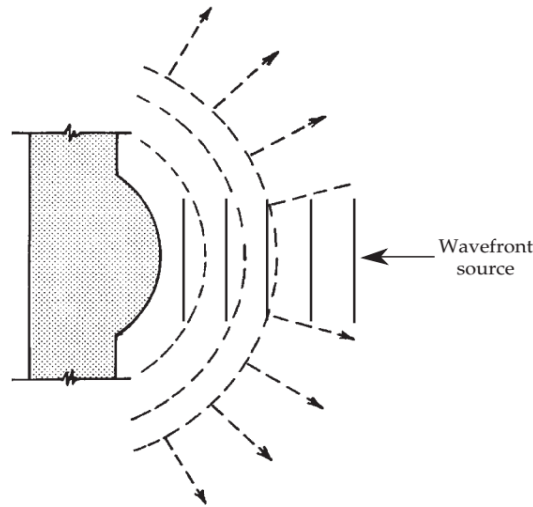


# Odraz zvuku od rovinnej steny

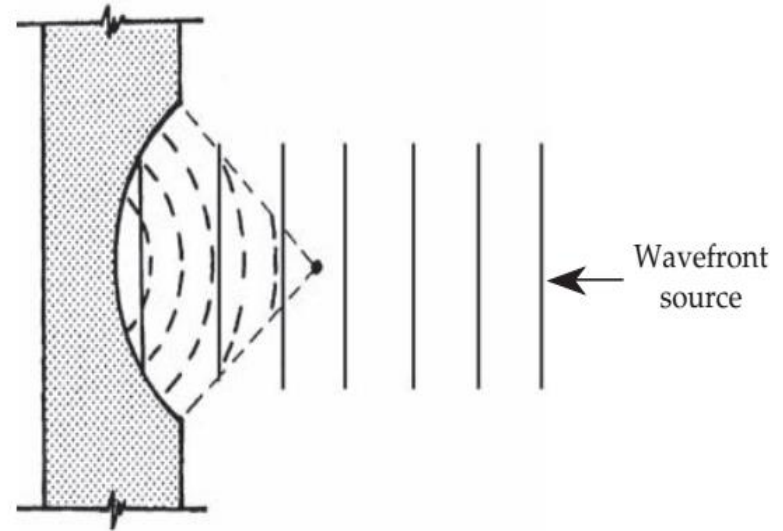


- Zdá sa, ako keby odrazený zvuk prichádzal od virtuálneho zrkadlové zdroja (**virtual image source**).
- Pri takomto odraze uhol dopadu (**angle of incidence**) ( $\theta_i$ ) je **rovný** uhlu odrazu (**angle of reflection**) ( $\theta_r$ ).
- Odrazená vlna je „novou“ guľovou zvukovou vlnou.
- V priestore dochádza k superpozícii priamej a odrazenej zvukovej vlny.

# Odraz zvuku od konvexnej resp. konkávnej plochy



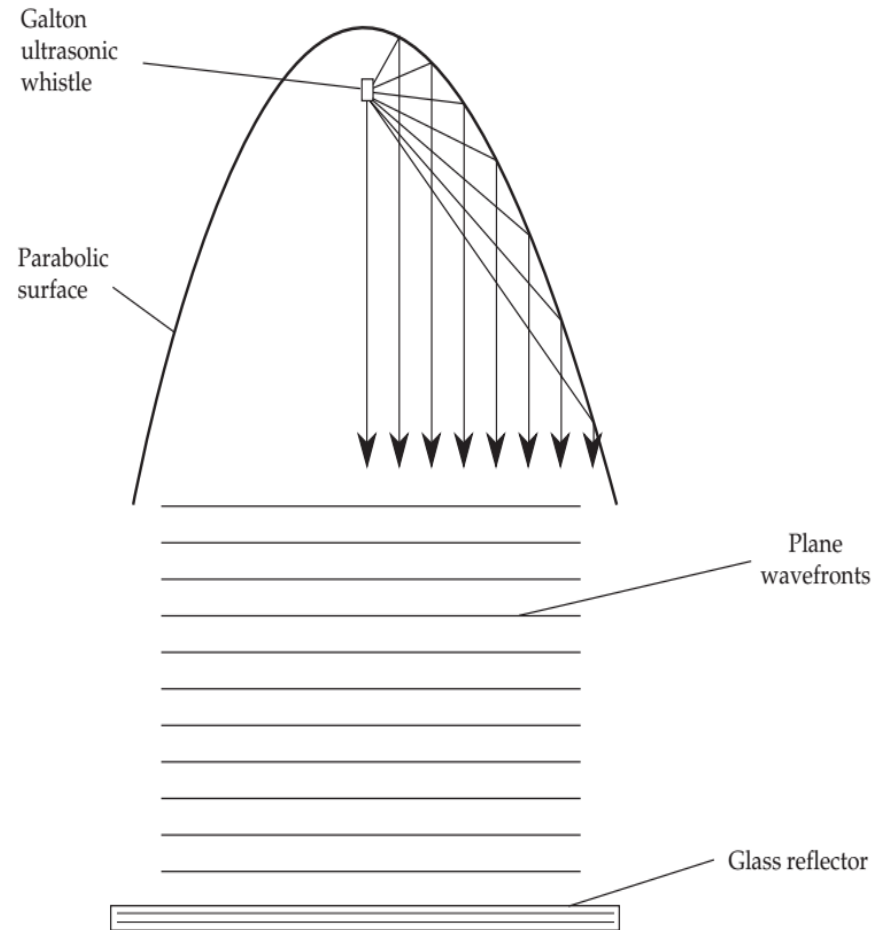
- Rovinná zvuková vlna, dopadajúca na konvexnú plochu sa odrazí v širokom uhle všetkými smermi.
- Platí to za predpokladu, že vlnová dĺžka dopadajúcej vlny je oveľa menšia, než je veľkosť (najväčší lineárny rozmer) konvexnej plochy.



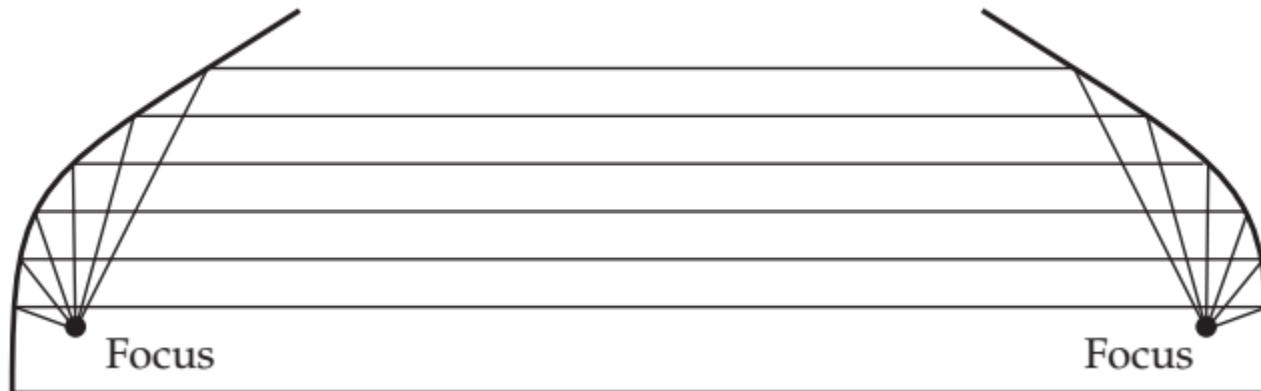
- Ak je (najväčší lineárny) rozmer konkávnej plochy väčší, než vlnová dĺžka dopadajúceho zvukového vlnenia, odrazená zvuková vlna má tendenciu sa koncentrovať do jedného bodu

# Odraz zvuku od parabolickej plochy

- Po odraze rovinatej vlny od parabolickej plochy dochádza ku koncentrácii akustickej energie v ohnisku paraboly.
- Ak akustický zdroj umiestnime do ohnisku paraboly, zvuková vlna sa odrazí do priestoru ako rovinná zvuková vlna.
- V prípade na obrázku je akustickým zdrojom „Galtonova píšťalka“ (Galton whistle) – ultrazvuková píšťalka na psov.



# „Šepkajúca galéria“ (Whispering Gallery)

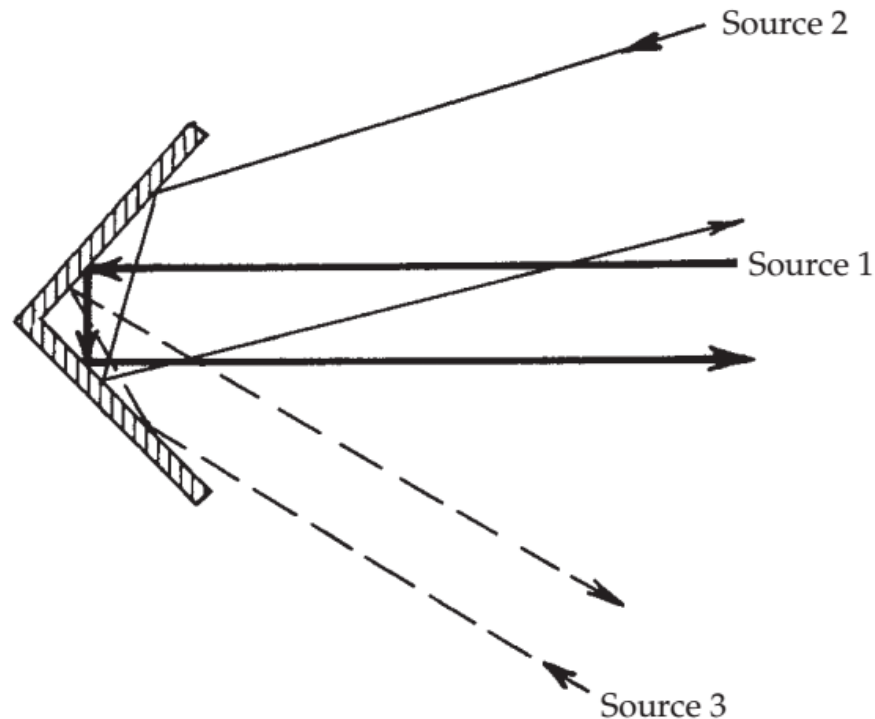


Obrázok naznačuje vznik symetrických bodov v miestnosti s paraboloidne tvarovanými časťami stien a stropu, v ktorých dochádza ku koncentrácii akustickej energie odrazenej rovinatej zvukovej vlny resp. z ktorých sa akustická energia po odrazení od stien a časti stropu odrazí ako rovinná vlna na druhú stranu miestnosti.

Šepkanie človeka v jednom bode tak môže byť zreteľne počuteľné poslucháčom v symetrickom bode na druhej vzdialenej strane miestnosti.

Efekt „šepkajúcej galérie“ možno nájsť napr. v Katedrále sv. Pavla v Londýne, v Bazilike sv. Petra vo Vatikáne, v Nebeskom chráme v Pekingu, v budove Kapitolu vo Washingtone (Statuary Hall), v hale „Grand Central Station“ v New Yorku a pod.

# Rohový reflector

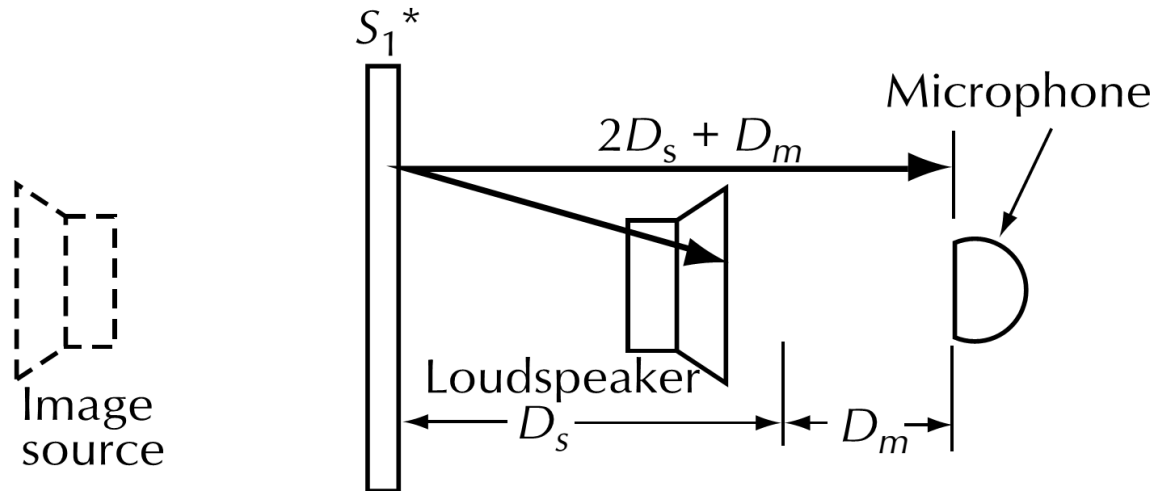


Rohový reflektor odráža zvukovú vlnu naspäť smerom ku zdroju zvuku (môže prichádzať z ľubovoľného smeru).

# Zdvojnásobenie akustického tlaku pri odraze zvukovej vlny

- Akustický tlak na ploche kolmej k dopadajúcej zvukovej vlne je úmerný hustote akustickej energie zvukového vlnenia pred plochou.
- Ak je plocha dokonalým absorbérom, akustický tlak je úmerný hustote akustickej energie dopadajúcej zvukovej vlny.
- Ak je plocha dokonalým reflektorom, akustický tlak je úmerný hustote akustickej energie dopadajúcej aj odrazenej zvukovej vlny
- To znamená, že akustický tlak pred dokonale odrazivou plochou je v porovnaní s dokonale pohltivou plochou dvojnásobný.

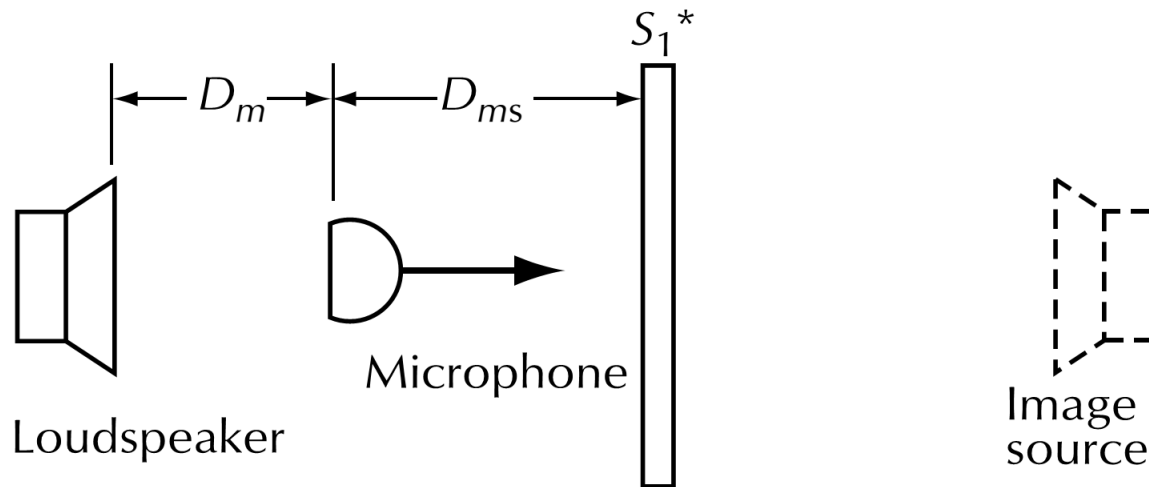
## Výpočet hladiny akustického tlaku pri odraze



Uplatnením pravidla, vyplývajúceho z „Inverse Square Law“ zistíme, že v meracom bode bude hladina akustického tlaku odrazenej akustickej vlny v porovnaní s hladinou akustického tlaku priamej vlny nižšia o:

$$\Delta L_{SPL} = 20 \log \left[ \frac{D_M}{2D_S + D_M} \right]$$

# Výpočet hladiny akustického tlaku pri odraze



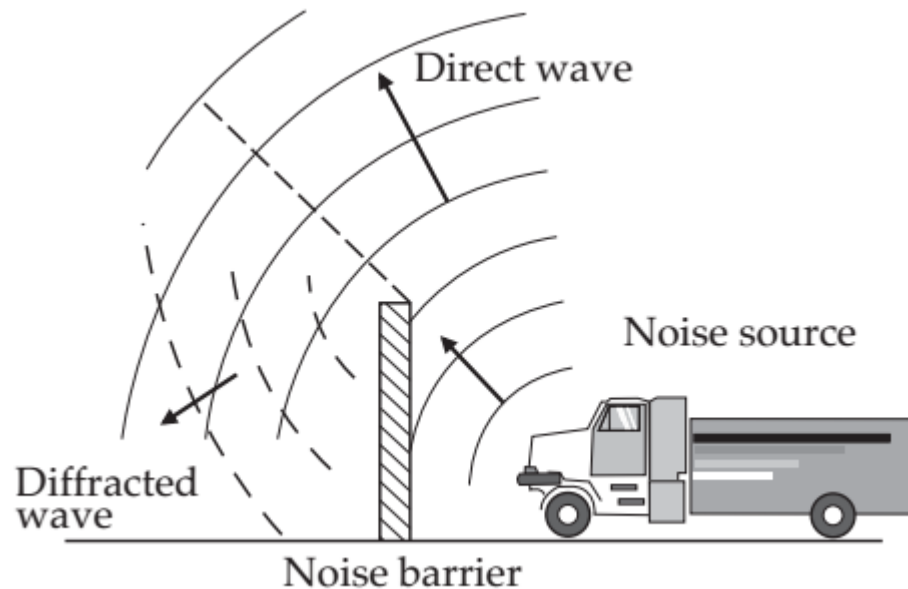
Uplatnením pravidla, vyplývajúceho z „Inverse Square Law“ zistíme, že v meracom bode bude hladina akustického tlaku odrazenej akustickej vlny v porovnaní s hladinou akustického tlaku priamej vlny nižšia o:

$$\Delta L_{SPL} = 20 \log \left[ \frac{D_m}{2D_{ms} + D_m} \right]$$

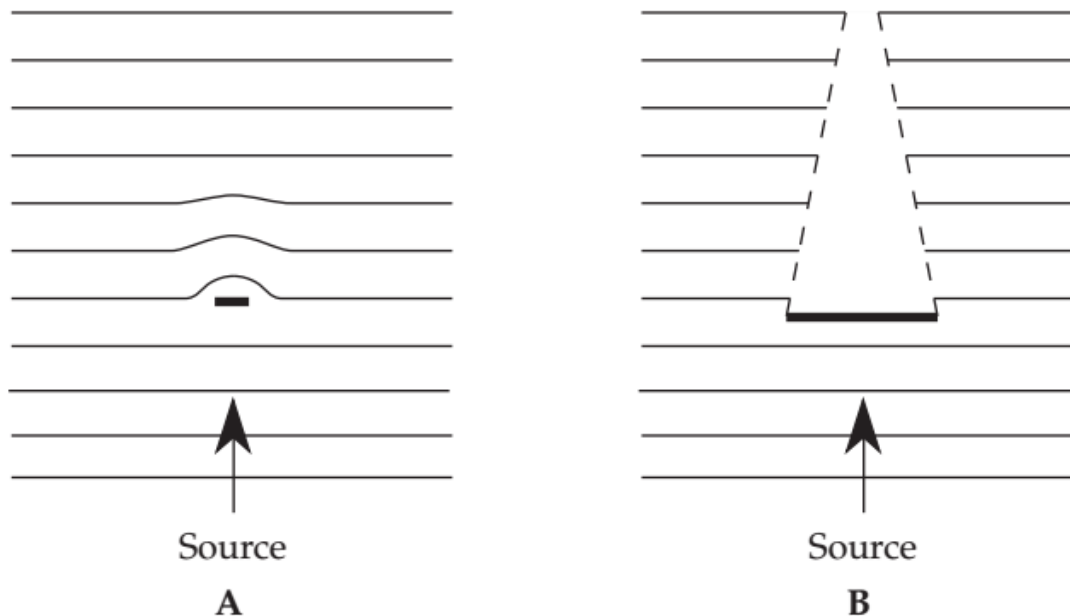


# Ohyb (difrakcia) zvukového vlnenia

- K difrakcii zvukového vlnenia dochádza vtedy, keď zvuková vlna narazí na prekážku.
- V závislosti od pomeru medzi vlnovou dĺžkou a rozmermi prekážky zmení zvuková vlna smer svojho pohybu



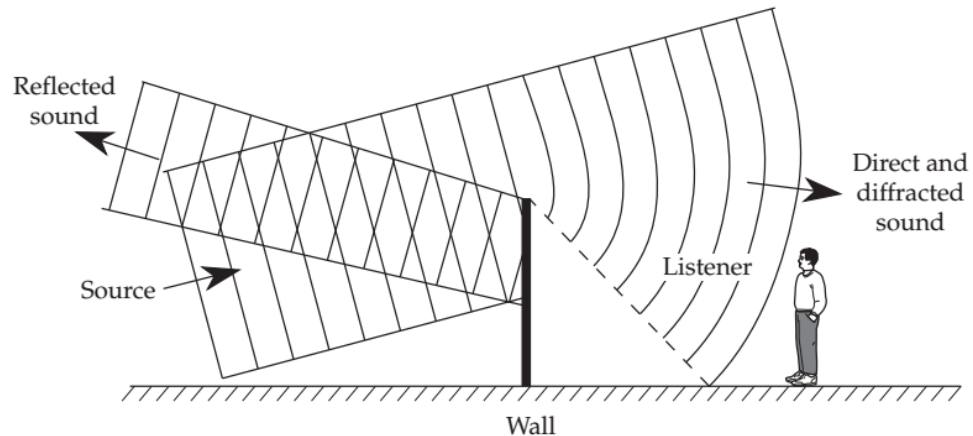
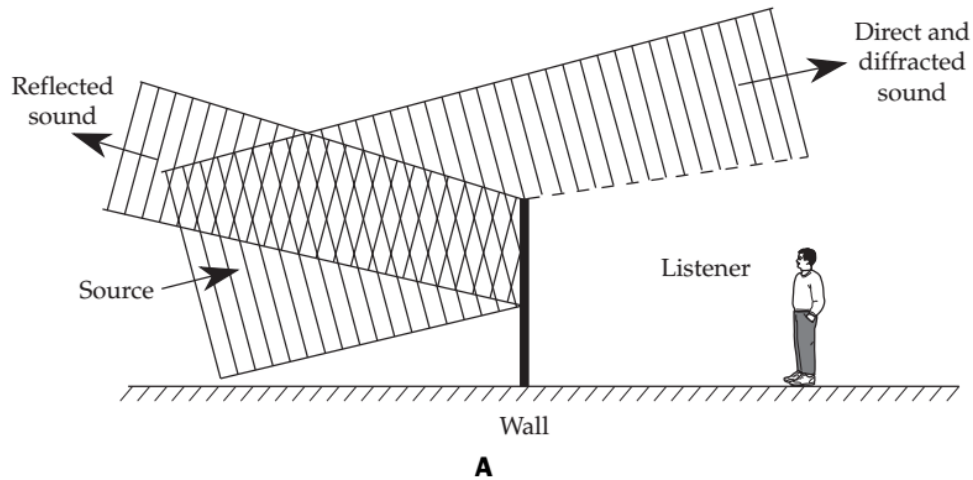
# Difrakcia zvuku okolo prekážky



Difrakcia zvuku závisí od vlnovej dĺžky:

- A. Prekážka je oveľa menšia než vlnová dĺžka zvuku – zvuk prekážku „obíde“ bez toho, aby zmenil smer.
- B. Prekážka je oveľa väčšia než vlnová dĺžka zvuku – za prekážkou vzniká „akustický tieň“ – na hranách prekážky dochádza k ohybu zvukovej vlny, ktorého výsledkom má byť vyplnenie akustického tieňa.

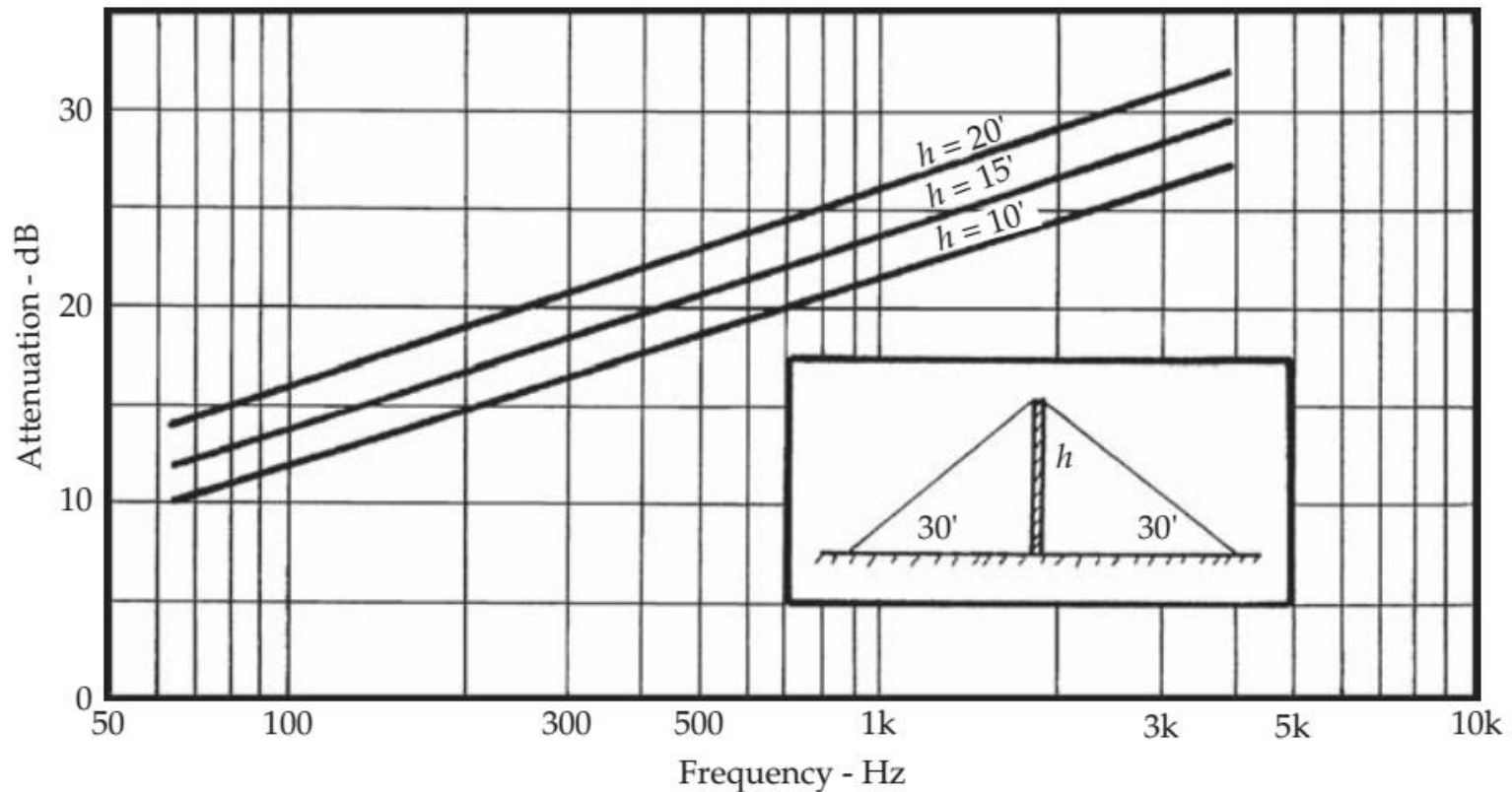
# Difrakcia zvuku okolo zvukovej bariéry



Časť zvuku, dopadajúceho na bariéru bude odrazená a časť zvuku zmení smer:

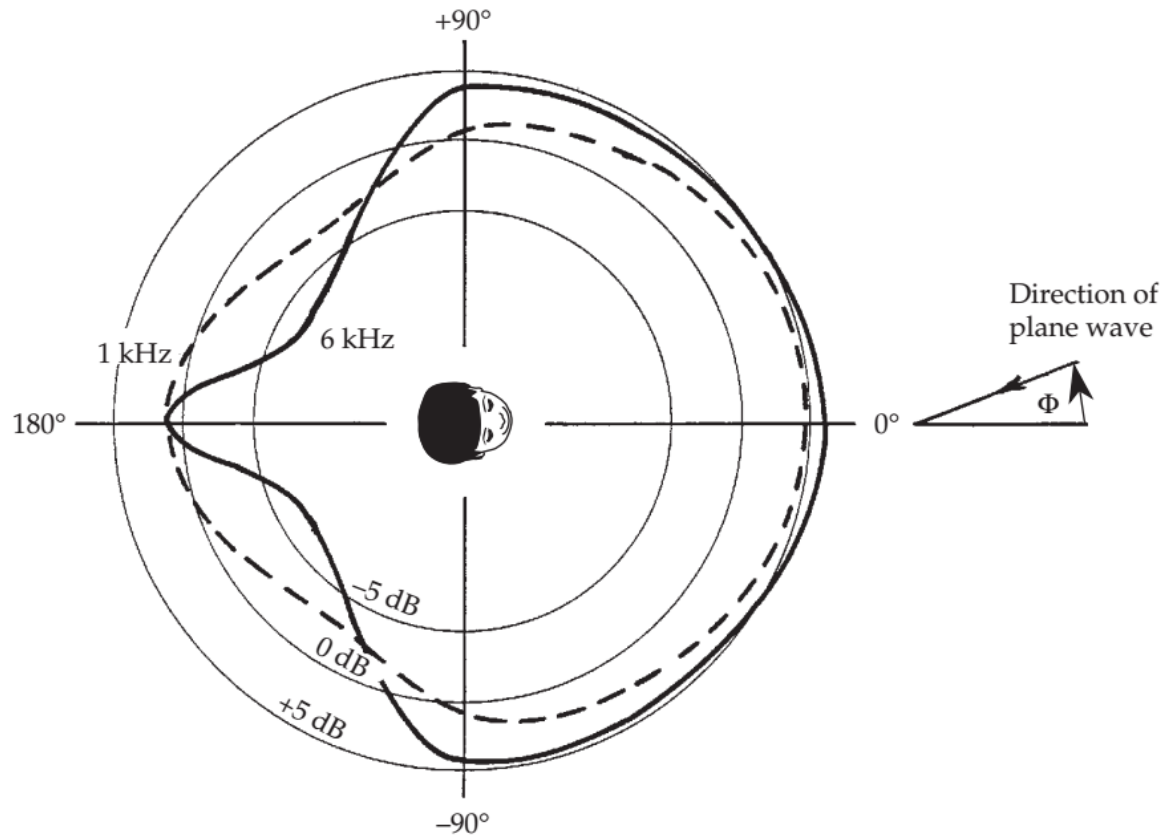
- A. Vysokofrekvenčný zvuk bude bariérou úspešne stlmený, pretože prejde nad bariérou – ohyb zvuku je malý – zvuk nezmení smer – za prekážkou vzniká akustický tieň.
- B. Zvuk nízkych frekvencií bude tlmený v podstatne menšej miere – okraj prekážky pôsobí ako zdroj novej guľovej zvukovej vlny, ktorá sa šíri aj do miest za bariérou.

# Útlm zvuku zvukovou bariérou



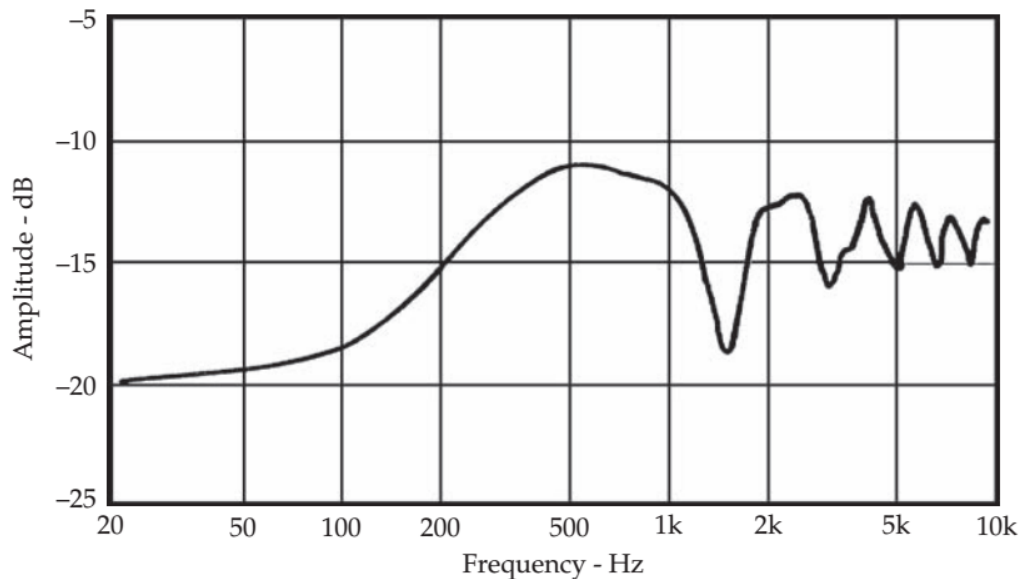
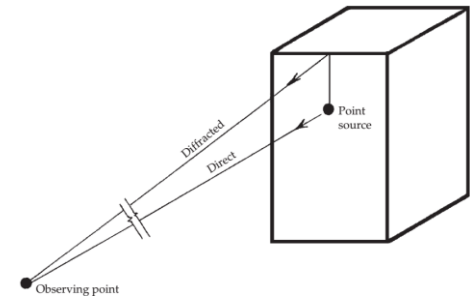
- Estimáciu účinnosti zvukovej bariéry umožňuje napr. nomogram na obrázku.
- Veľkosť útlmu zvuku za bariérou závisí od frekvencie a výšky bariéry.

# Ohyb zvuku v okolí ľudskej hlavy



Diffraction occurs around a solid sphere about the size of a human head. For sound in the 1- to 6-kHz range, sound pressure is generally increased in the front hemisphere and reduced in the rear.

# Ohyb zvuku na ozvučnici



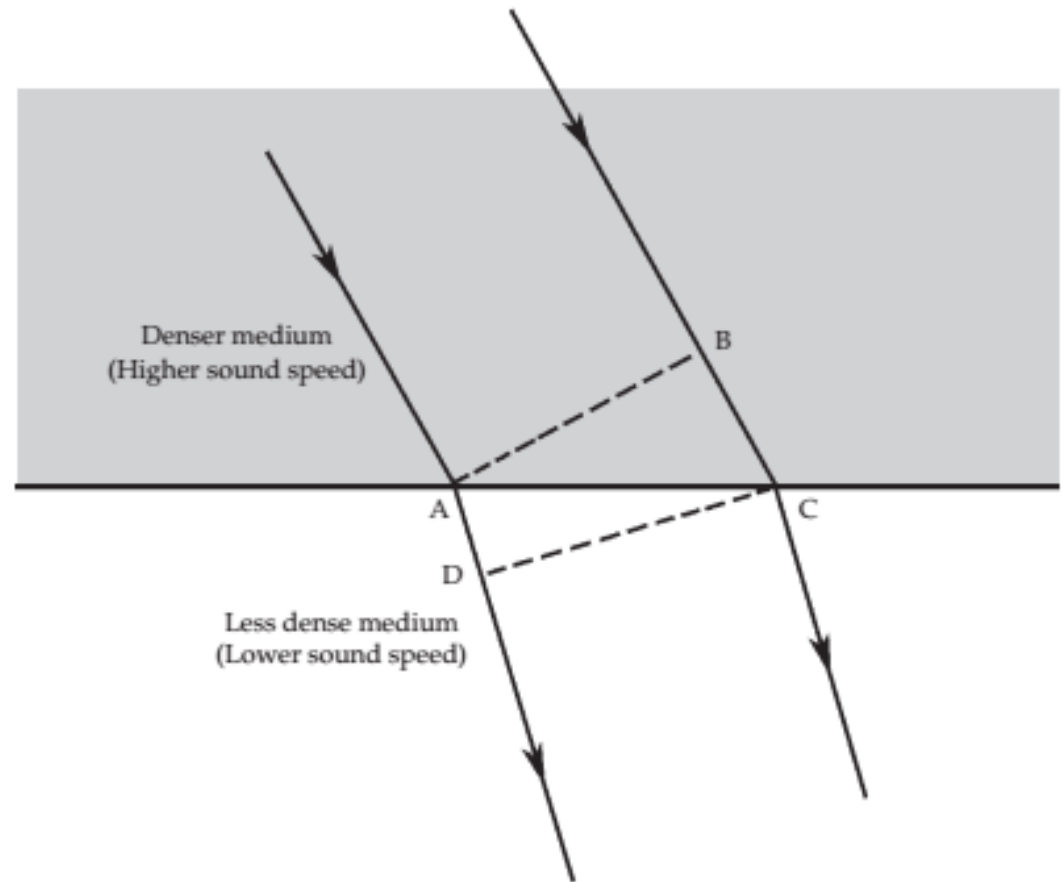
- The calculated effects of loudspeaker edge diffraction on the direct signal in set-up of Fig. There is a significant change in overall frequency response of the system.

# Lom zvuku (refraction)

*Refraction* changes the direction of travel of the sound by differences in the velocity of propagation. *Diffraction* is changing the direction of travel of sound by encountering sharp edges and physical obstructions (chapter 11). Most people find it easy to distinguish between *absorption* and *reflection* of sound, but there is often confusion between *diffraction* and *refraction* (and possibly *diffusion*, the subject of the next chapter). The similarity of the sound of the words might be one cause for this confusion, but the major reason is the perceived greater difficulty of understanding *diffraction*, *refraction*, and *diffusion* compared to *absorption* and *reflection*. Hopefully Chaps. 9, 10, 11, 13, and this chapter will help to equalize and advance understanding of these five important effects.

# Lom zvuku (refraction)

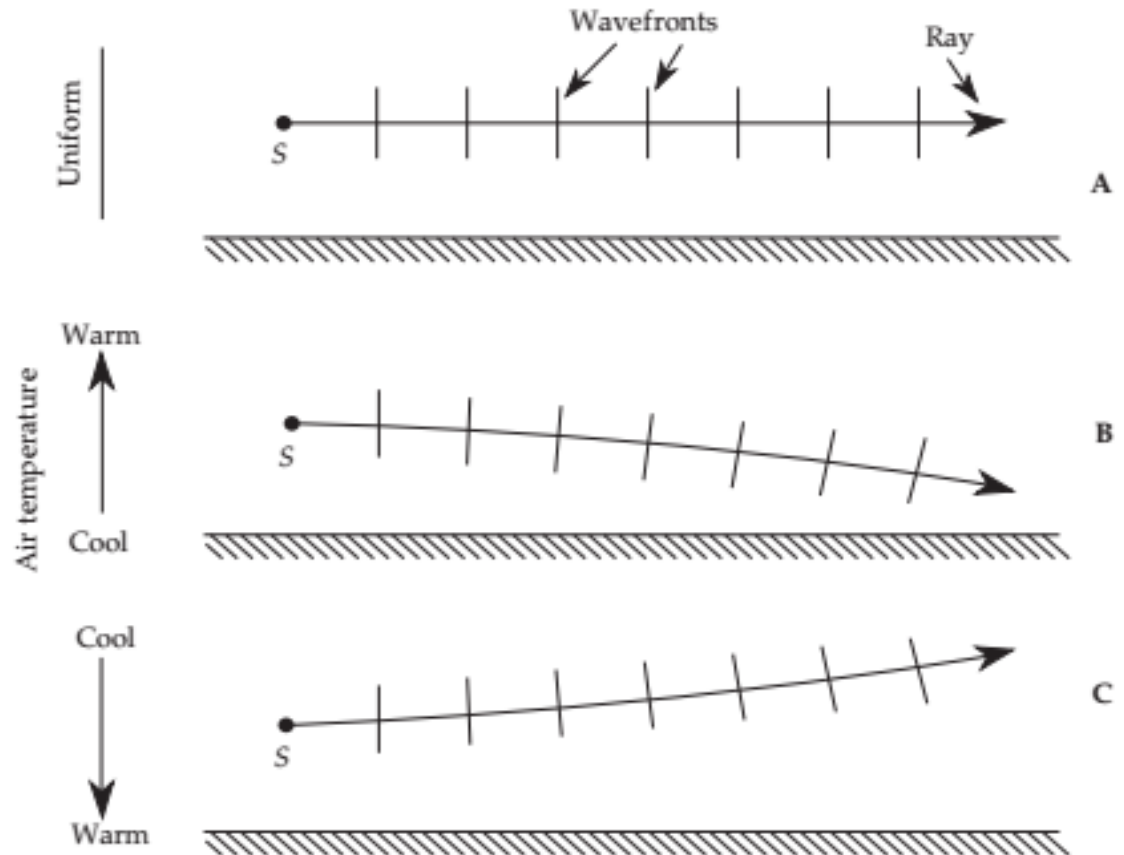
Refracia je zmena smeru zvukovej vlny pri šírení zvuku v prostrediach s nerovnakými rýchlosťami šírenia zvuku.



Medium	Speed of Sound ft/sec	m/sec
Air	1,130	344
Seawater	4,900	1,500
Wood, fir	12,500	3,800
Steel bar	16,600	5,050
Gypsum board	22,300	6,800



# Lom zvuku v atmosfére



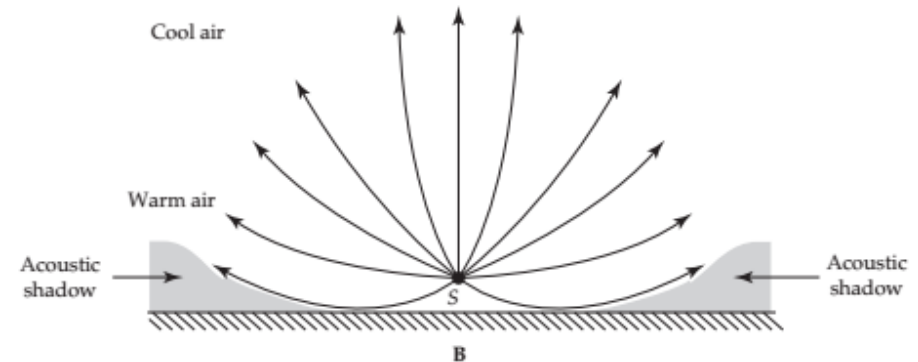
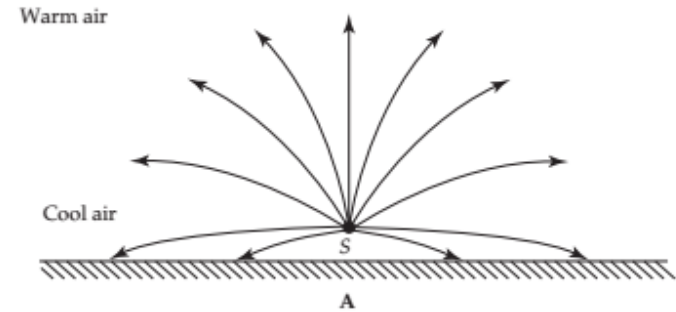
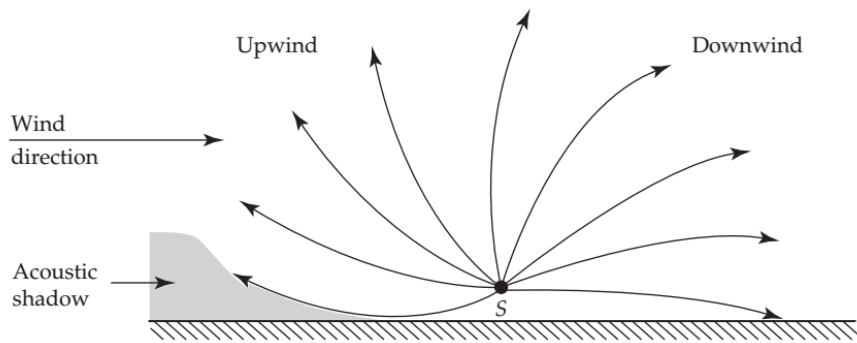
Lámanie zvuku v atmosfére, ktoré je spôsobené existenciou tepelných gradientov:

A. Teplota vzduchu je rovnaká vo všetkých vrstvách atmosféry.

B. Vzduch je pri zemi chladnejší (prízemný mráz).

C. Vzduch je pri zemi teplejší a s rastúcou výškou teplota vzduchu klesá.

# Lom zvuku v atmosféře

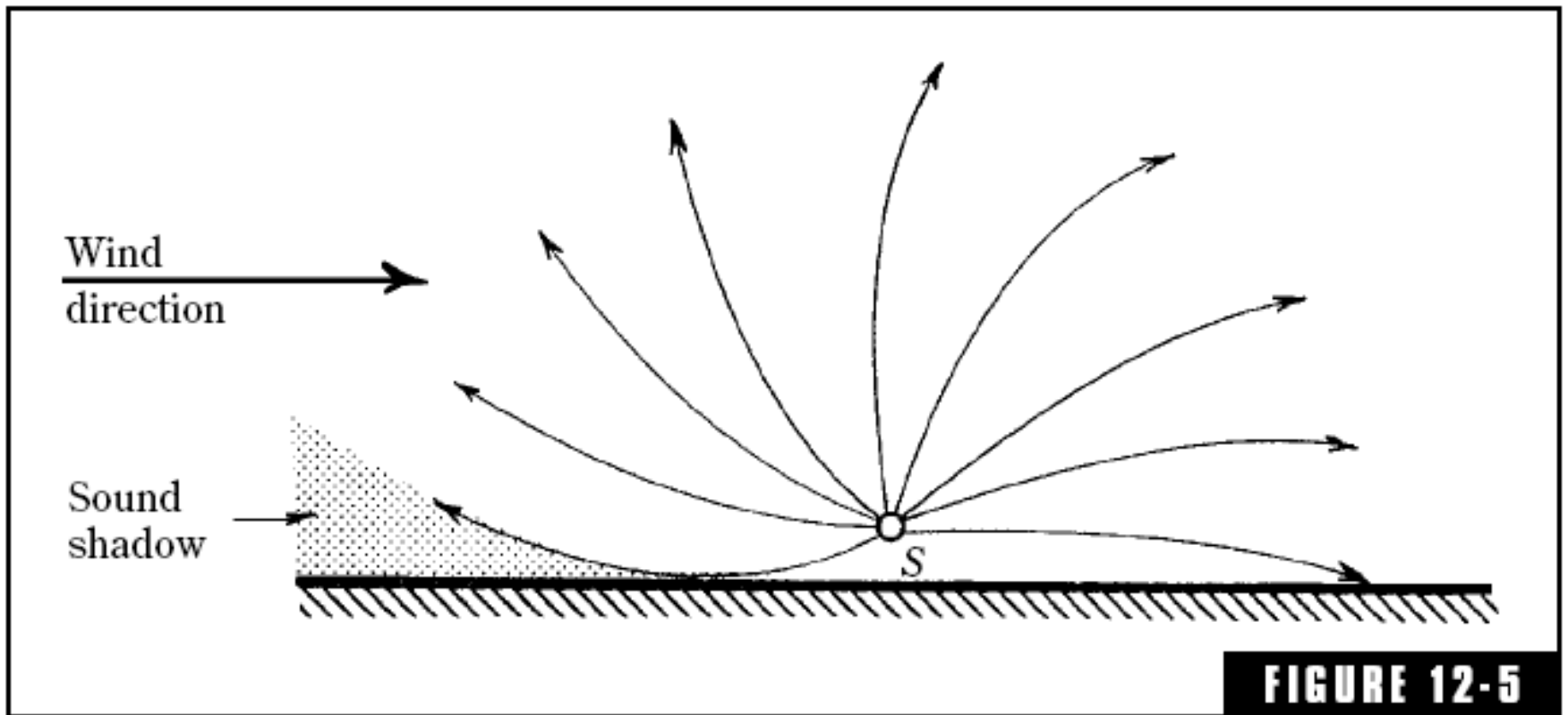


Comprehensive illustration of refraction of sound from source.

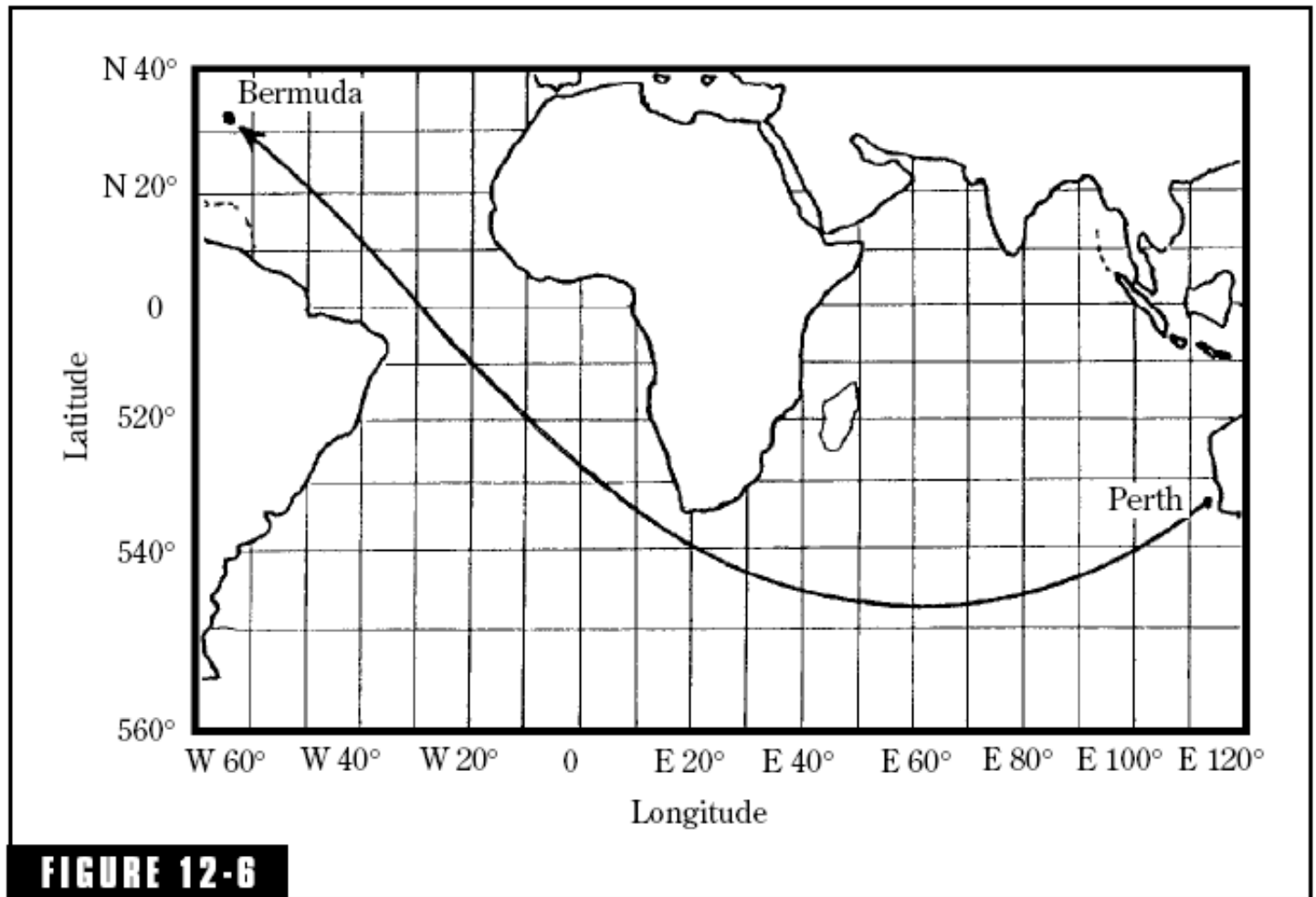
A. Cool air near the ground and warmer air above.

B. Warm air near the ground and cooler air above; note that acoustic shadow areas result from the upward refraction.

C. Wind gradients can affect the propagation of sound. A shadow sound is created upwind while good listening conditions exist downwind.



Wind gradients refract (not a true refraction) sound. A shadow sound is created upwind and good listening conditions downwind.



Refraction of sound in the ocean. A 600-lb charge was detonated near Perth, Australia, and the sound was recorded at Bermuda, over 12,000 miles away. The secret lies in the fact that the sound was confined to a sound channel by refraction that reduced losses. The sound took 3.71 hours to travel almost half way around the world. Such long-distance transmission of sound in the sea is being used to study long-range warming effects of the ocean. (After Heaney et al.<sup>2</sup>)

# Absorpcia zvuku

- Zákon zachovania energie hovorí, že energiu nemožno stvoriť ani zničiť. Energiu však možno premeniť z jednej formy na inú.
- Ak je v priestore nadmerná zvuková energia, nemožno ju eliminovať, môžeme ju však transformovať do inej, „neškodnej“ formy.
- Toto je úlohou zvuk absorbujúcich materiálov.
- Zvukové absorbéry možno rozdeliť do nasledovných troch typov:
  - Porézne absorbéry (porous absorbers),
  - Panelové absorbéry (panel absorbers) a
  - Rezonančné absorbéry (volume or resonance absorbers).
- Porézne absorbéry sú obyčajne najúčinnnejšie pri vyšších frekvenciách, panelové a rezonančné sú najúčinnnejšie pri nižších frekvenciách.

# Absorpčný koeficient

Absorpčné vlastnosti materiálu definuje tzv. absorpčný koeficient, pre ktorý platí:

$$\alpha = \frac{E_A}{E_I}$$

kde  $E_A$  je absorbovaná akustická energia a  $E_I$  celková akustická energia dopadajúceho zvuku (incident sound).

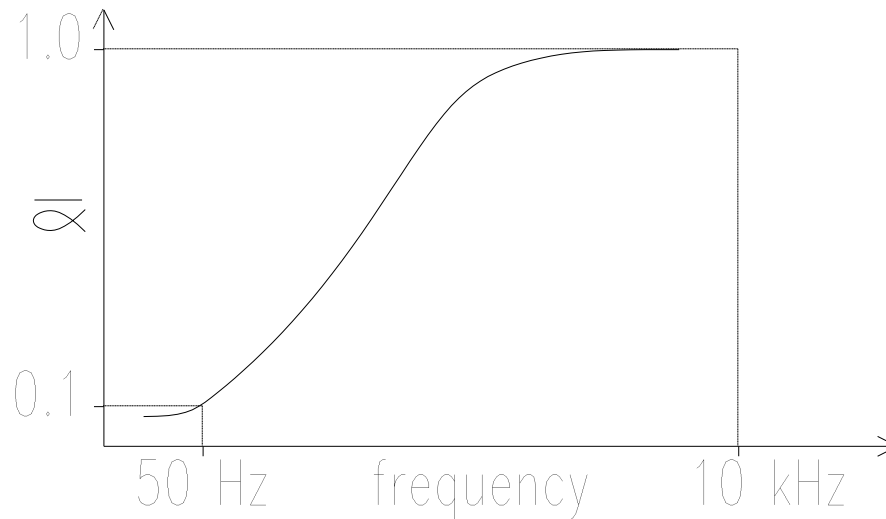
Energia odrazeného zvuku je potom:

$$E_R = (1 - \alpha) \cdot E_I$$

Absorption coefficients vary with the angle at which sound impinges upon the material.

# Absorpčný koeficient

Je funkciou frekvencie a uhla, pod ktorým zvuk dopadá na absorbujúcu plochu.



# Výpočet absorpcie

The sound absorption  $A$  provided by a particular area of material is obtained by:

$$A = S \cdot \alpha$$

where  $A$  = absorption units, sabins or metric sabins

$S$  = surface area, sq ft or sq m

$\alpha$  = absorption coefficient

When calculating a room's total absorption, all the materials in the room, according to their area, will contribute to the total absorption:

$$\Sigma A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 + \dots$$

Where  $S_1, S_2, S_3 \dots$  = surface areas, sq ft or sq m

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$  = respective absorption coefficients

The average absorption coefficient can be calculated by dividing the total absorption by the total surface area:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Sigma A}{\Sigma S}$$



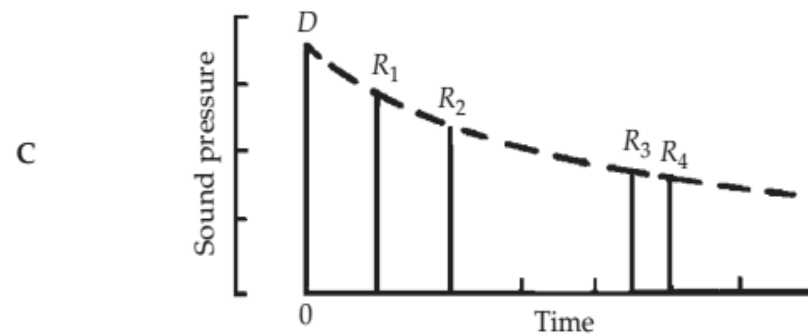
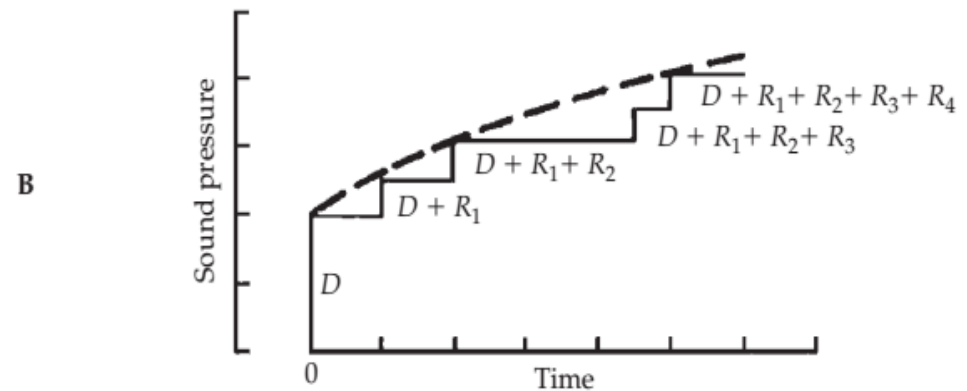
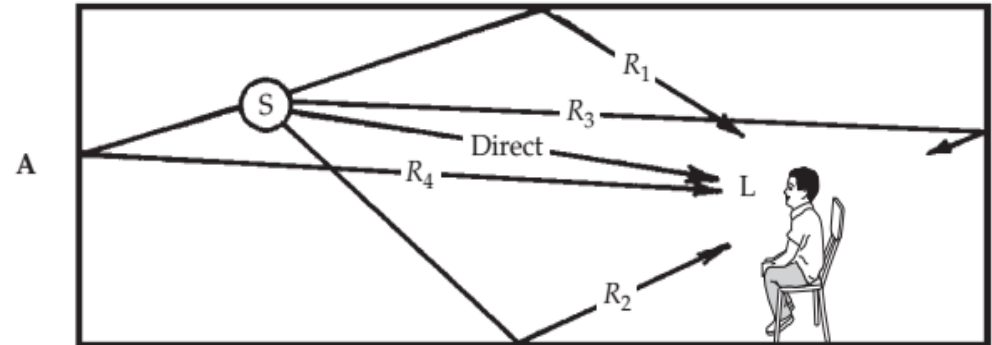
# Doba dozvuku (reverberation time)

- When a loudspeaker is turned on, it emits noise in a room that quickly grows to a certain level. This level is the steady-state or equilibrium point at which the sound energy radiated from the loudspeaker is enough to overcome losses in the air and at the room boundaries.
- When the loudspeaker is turned off, it takes a finite length of time for the sound level in the room to decay to inaudibility.
- This aftereffect of the sound in a room, after the excitation signal has been removed, is reverberation and it has an important bearing on the acoustic quality of the room.

# Dozvuk (Reverberation)

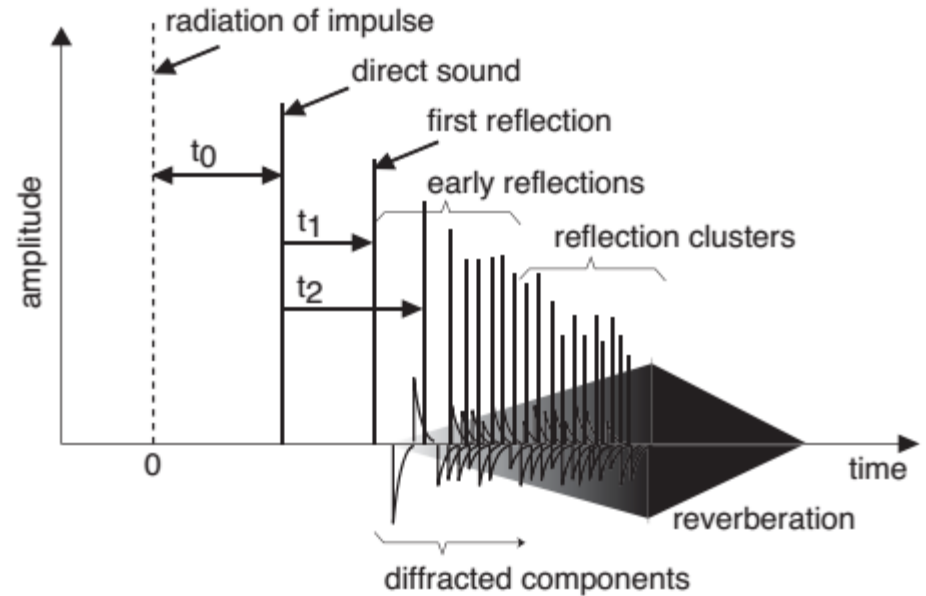
Nárast a pokles zvukovej energie v miestnosti:

- A. V čase  $t=0$  prichádza k poslucháčovi (L) ako prvý priamy zvuk od zdroja. Odrazené zvuky prichádzajú neskôr.
- B. Hladina akustického tlaku v mieste L postupne rastie.
- C. Po vypnutí zdroja zvuku hladina akustického tlaku exponenciálne klesá.

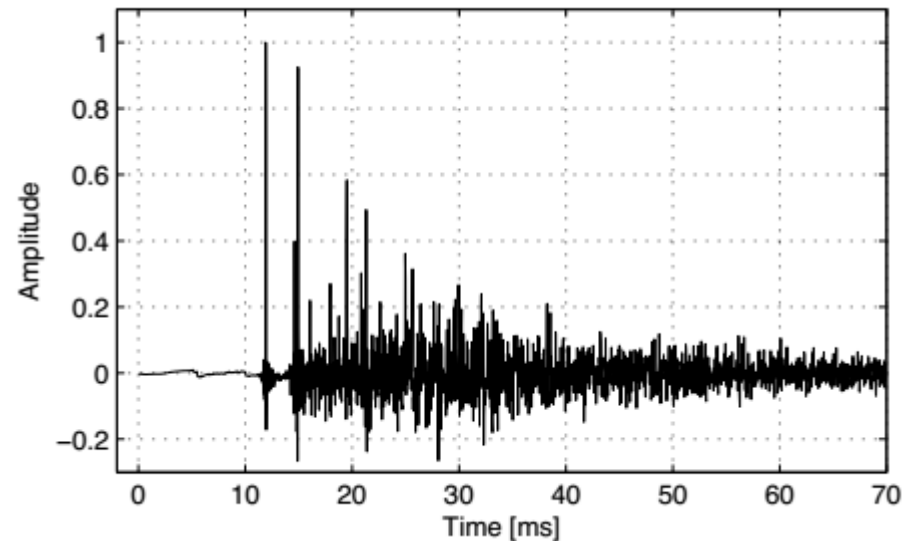


# Impulzová odpoveď miestnosti

Teoretická odpoveď na ideálny impulz



Reálne zmeraná impulzová odpoveď posluchárne. Zdrojom bol „laser-inducec spark source“.

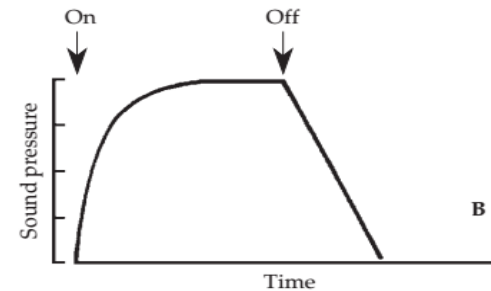
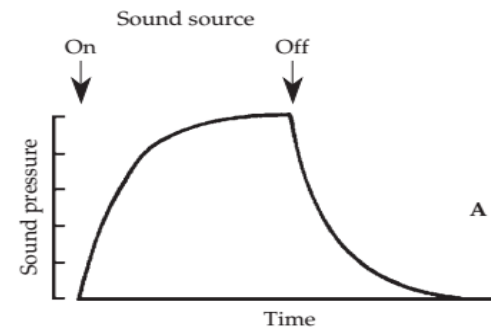


# Doba dozvuku

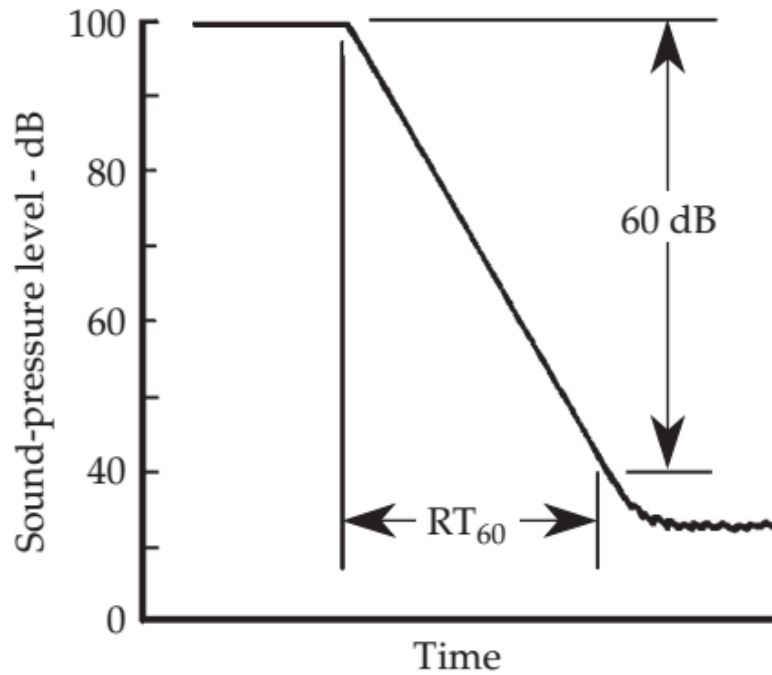
- Doba dozvuku (RT, Reverberation Time) je miera rýchlosti poklesu zvukovej energie.
- Je definovaná ako čas, počas ktorého dôjde v miestnosti k poklesu intenzity zvuku o 60 dB z pôvodnej.
- Takto definovaná doba dozvuku sa označuje ako  $RT_{60}$ .

Ideálny nárast a pokles zvukovej energie v miestnosti:

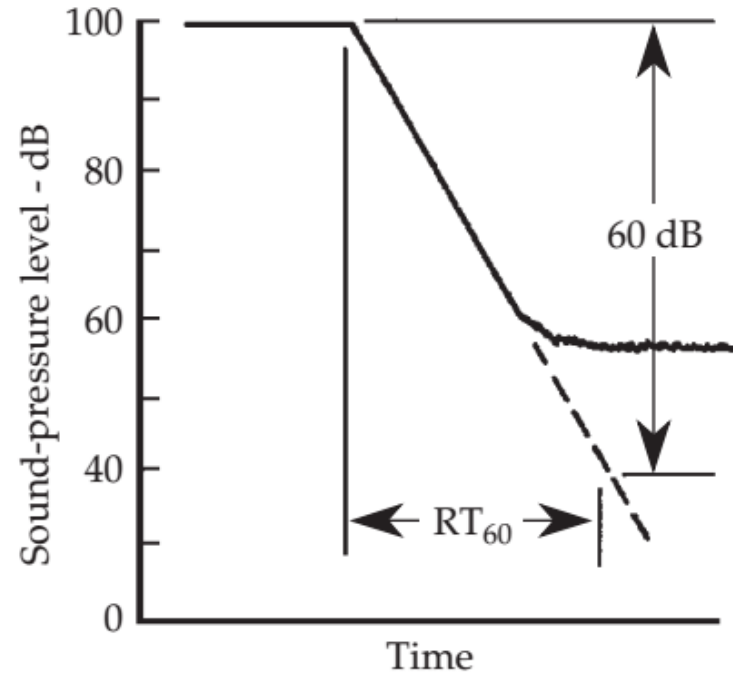
- A. Lineárnej škály na vertikálnej osi (akustický tlak).
- B. Logaritmická škála na vertikálnej osi (hladina akustického tlaku v dB).



# Meranie doby dozvuku



A



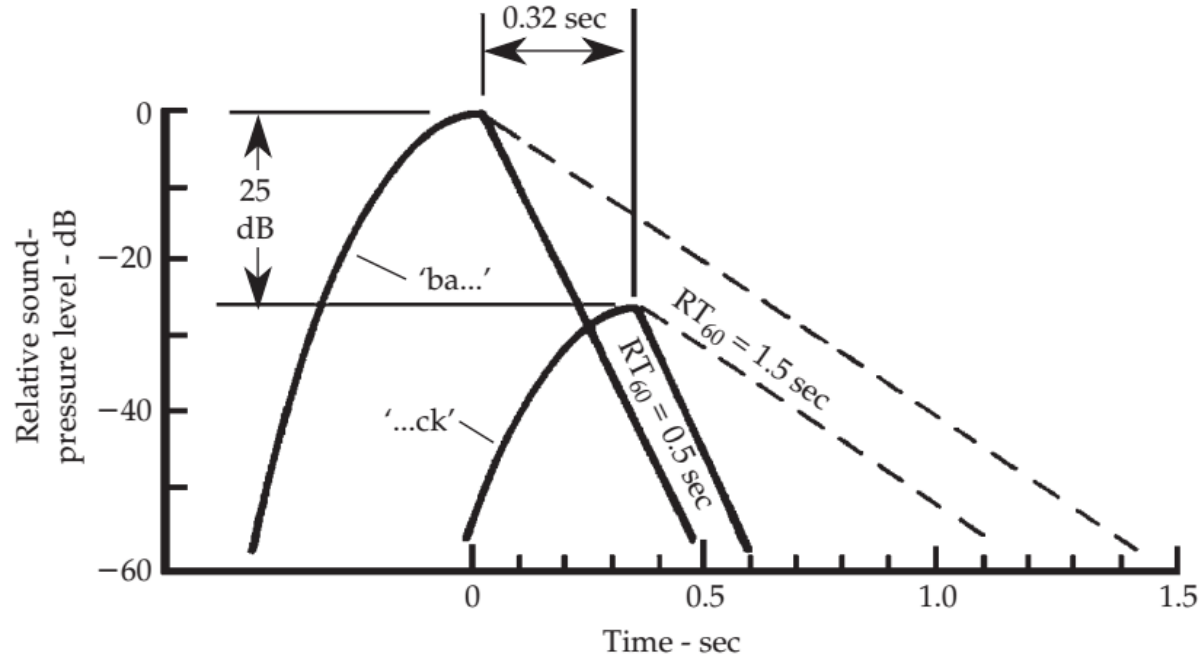
B

The length of the decay depends on the strength of the source, and the noise level.

A. Rarely do practical circumstances allow a full 60-dB decay.

B. The slope of the limited decay is extrapolated to determine the reverberation time.

# Vplyv dozvuku na zrozumiteľnosť reči

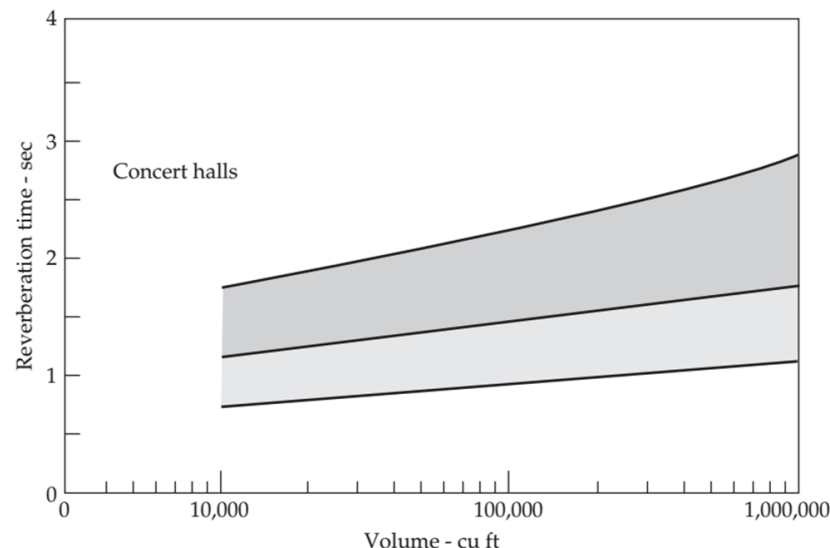
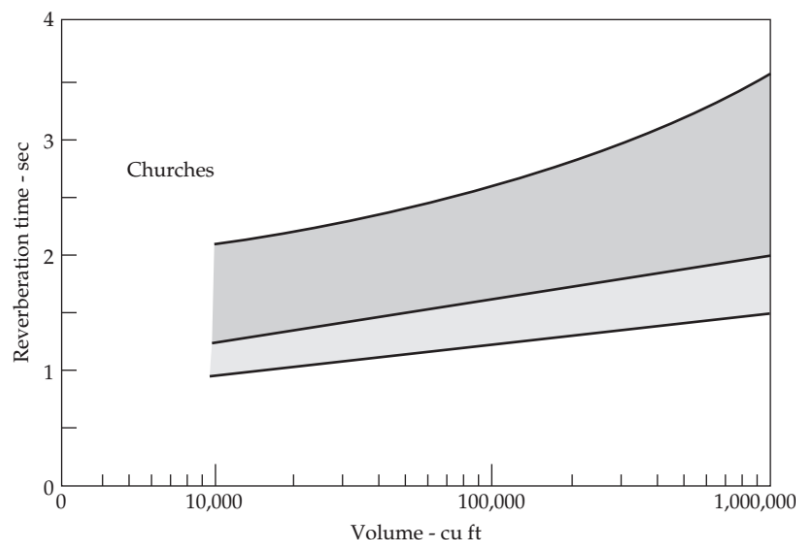


- An illustration of the effects of reverberation on the intelligibility of speech.
- Understanding the word “back” depends on apprehending the later, lower level consonant “. . . ck,” which can be masked by reverberation if the reverberation time is too long.

# Vplyv dozvuku na hudbu

- The effect of hall resonance or reverberation on music is intuitively grasped but is more difficult to quantify.
- For example, a reverberation time that seems suitable for one type of music may be unsuitable for another type of music.
- In any case, the optimal reverberation time for music is both variable and subjective.
- This subject has received much attention from scientists as well as musicians.
- Suffice it to say that the reverberation decay of a music hall is an important factor among many.

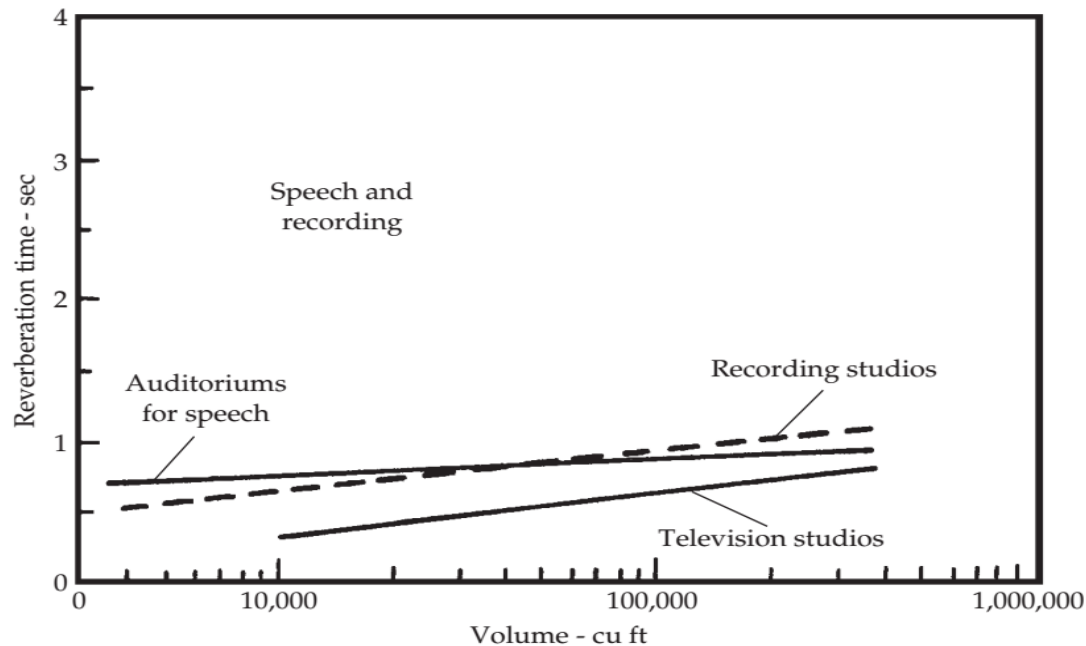
# Optimálna doba dozvuku



- Optimálne doby dozvuku pre kostoly.
- V hornej časti sú doby dozvuku, ktoré sú vhodnejšie pre dómy a katedrály, v ktorých sú realizované najmä liturgie (spev, hudba)
- V dolnej časti sú doby dozvuku, odporúčané pre menšie kostoly, v ktorých prebiehajú aj kázne (reč).
- Vo väčšine prípadov je nutný kompromis.

- Optimálne doby dozvuku pre koncertné sály.
- V hornej časti sú doby dozvuku, vhodné pre symfonický orchester.
- V dolnej časti – opery a komorná hudba





## Optimálna doba dozvuku pre auditóriá a zvukové štúdiá

- Spaces designed for speech and music recording require shorter reverberation times.

# Výpočet doby dozvuku

Sabine's reverberation equation, published in 1900, was developed in a strictly empirical fashion.

He observed that reverberation time depends on room volume, and absorption.

In particular, he devised the following relationship:

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{A} [s; m^3, \text{metric sabin}]$$

$$RT_{60} = 0,049 \frac{V}{A} [s; ft^3, \text{sabin}]$$

Where:  $RT_{60}$  = reverberation time, sec

$V$  = volume of room, m<sup>3</sup>

$A$  = total absorption of room, metric sabins

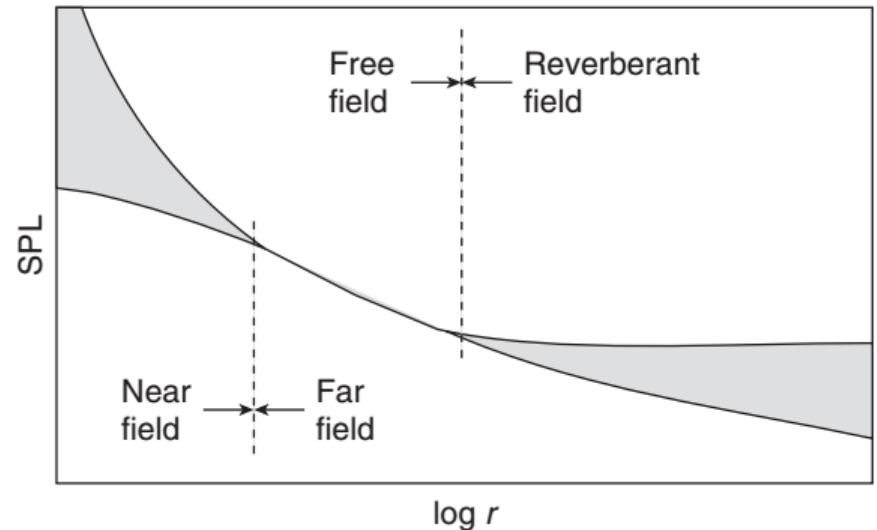
Rovnica dáva nepresné výsledky, ak ide o miestnosti s vysokou mierou absorpcie zvuku:

- Norris-Eyring Equation
- Fitzroy Equation

# Kritická vzdialenosť

- V miestnosti s dozvukom je to vzdialenosť od zdroja zvuku, pri ktorej je intenzita zvuku priamo od zdroja rovnaká, ako intenzita dozvuku (t.j. intenzita odrazeného zvuku)
- Platí:

$$d_c \approx 0,057 \sqrt{\frac{\gamma \cdot V}{RT_{60}}} \text{ [metrická sústava]}$$



- Poslucháč, nachádzajúci sa do kritickej vzdialenosti, sa nachádza v tzv. voľnom akustickom poli, v ktorom dokáže bez problémov identifikovať smer prichádzajúceho zvuku
- Poslucháč, nachádzajúci sa za kritickou vzdialenosťou, sa nachádza v tzv. dozvukovom akustickom poli, v ktorom nedokáže zistiť odkiaľ zvuk prichádza

Size 23.3 × 16 × 10 ft  
 Treatment None  
 Floor Concrete  
 Walls Gypsum board, 1/2", on frame construction  
 Ceiling Ditto  
 Volume (23.3) (16) (10) = 3,728 cu ft

Material	S sq ft	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz	
		<i>a</i>	<i>Sa</i>	<i>a</i>	<i>Sa</i>	<i>a</i>	<i>Sa</i>	<i>a</i>	<i>Sa</i>	<i>a</i>	<i>Sa</i>	<i>a</i>	<i>Sa</i>
Concrete gypsum board	373	0.01	3.7	0.01	3.7	0.015	5.6	0.02	7.5	0.02	7.5	0.02	7.5
	1,159	0.29	336.1	0.10	115.9	0.05	58.0	0.04	46.4	0.07	81.1	0.09	104.3
Total sabins		339.8		119.6		63.6		53.9		88.6		111.8	
Reverberation time (seconds)		0.54		1.53		2.87		3.39		2.06		1.63	

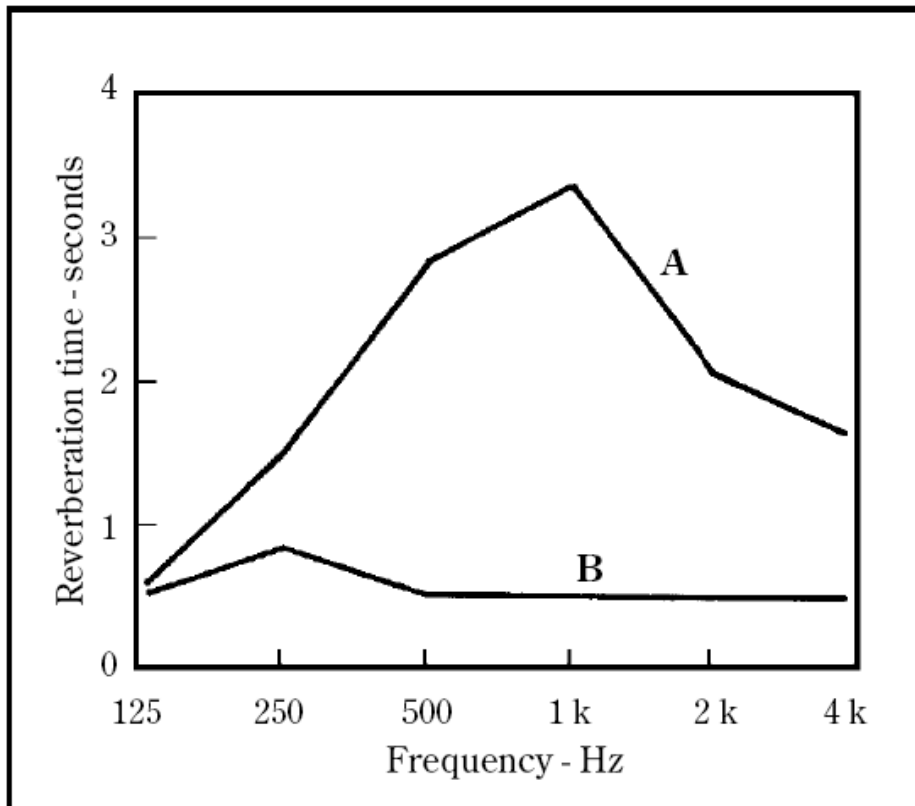
*a* = absorption coefficient for that material  
 and for that frequency (See Appendix)  
*Sa* = *S* times *a*, absorption units, sabins

$$RT60 = \frac{(0.049)(3728)}{Sa} = \frac{182.7}{Sa}$$

Example: For 125 Hz,  $RT60 = \frac{182.7}{339.8} = 0.54$  second

**FIGURE 7-22**

Room conditions and calculations for Example 1.



**FIGURE 7-23**

The calculated reverberation characteristics of a 23.3 × 16 × 10 ft room: (A) the “as found,” untreated condition of Example 1, (B) treated condition of Example 2.

**Reverberation Calculation:  
Example 2**

The goal now is to correct the reverberation of curve A of Fig. 7-23. It is evident that much absorption is needed at midband frequencies, a modest amount at higher frequencies, and very little at lower frequencies. The need is for a material having an absorption characteristic shaped more or less like the reverberation curve A. Skipping the laborious thumbing through of handbooks, 3/4-in acoustical tile seems to have the right shape. Giving no thought at this point to how it is to be distributed, what area of this tile is required to correct for Fig. 7-23A?

Tento príklad ilustruje použité Sabineovej rovnice. Rozmery akusticky neupravenej miestnosti je  $23.3 \times 16 \times 10$  ft. Miestnosť má betónové steny a podlahu a trámový strop je pokrytý 1/2-palcovým sadrokartónom. As a

simplification, the door and a window will be neglected as having minor effect.

Figure 11-21 shows the untreated condition. The concrete floor area of 373 ft<sup>2</sup> and the

gypsum board area of 1,159 ft<sup>2</sup> are entered in the table. The appropriate absorption coefficients  $\alpha$  are entered from the table in the appendix for each material and for the six

frequencies. Multiplying the concrete floor area of  $S = 373$  ft<sup>2</sup> by the coefficient  $\alpha = 0.01$

gives a floor absorption of 3.7 sabins. This is entered under  $S\alpha$  for 125 and 250 Hz. The

absorption units (sabins) are then figured for both materials and for each frequency. The

total number of sabins at each frequency is obtained by adding that of the concrete floor

to that of the gypsum board. The reverberation time for each frequency is obtained by

dividing  $0.049 V = 182.7$  by the total absorption for each frequency.

To visualize the variation of reverberation time with frequency, the values are plotted

in Fig. 11-22A. The peak reverberation time of 3.39 seconds at 1 kHz is excessive and

would yield poor sound conditions. Two persons separated 10 ft would have difficulty

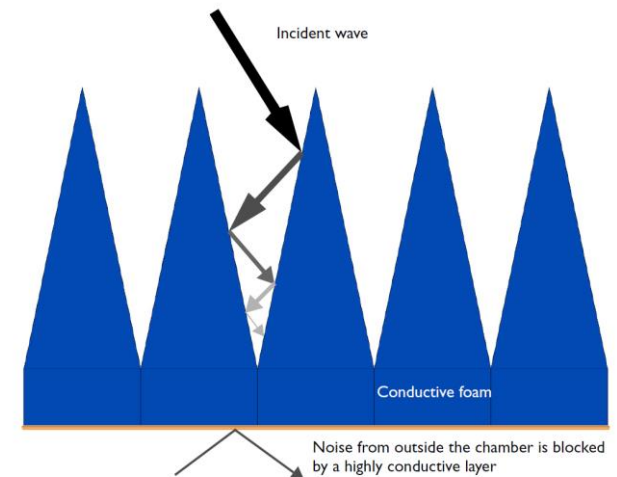
understanding each other as the reverberation of one word masks the next word.

		Size	23.3 × 16 × 10 ft											
		Treatment	None											
		Floor	Concrete											
		Walls/ceiling	Gypsum board, 1/2", on frame construction											
		Volume	(23.3)(16)(10) = 3,728 cu ft											
Material	S sq ft	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		
		$\alpha$	$S\alpha$	$\alpha$	$S\alpha$	$\alpha$	$S\alpha$	$\alpha$	$S\alpha$	$\alpha$	$S\alpha$	$\alpha$	$S\alpha$	
Concrete	373	0.01	3.7	0.01	3.7	0.015	5.6	0.02	7.5	0.02	7.5	0.02	7.5	
Gypsum board	1,159	0.29	336.1	0.10	115.9	0.05	58.0	0.04	46.4	0.07	81.1	0.09	104.3	
Total absorption (sabins)		339.8		119.6		63.6		53.9		88.6		111.8		
Reverberation time (seconds)		0.54		1.53		2.87		3.39		2.06		1.63		
<p><math>S</math> = area of material  <math>\alpha</math> = absorption coefficient for that material and for that frequency  <math>A = \sum S\alpha</math> absorption units, sabins</p> $RT_{60} = \frac{(0.049)(3728)}{A} = \frac{182.7}{A}$ <p>Example: For 125 Hz, <math>RT_{60} = \frac{182.7}{339.8} = 0.54</math> second</p>														

# Bezdozvuková komora

(Anechoic chamber)

- Anechoická („an-echoic“ znamená „bez echa“) komora je zatvorený priestor, ktorý je navrhnutý tak, aby bol dokonale izolovaný od externých zdrojov zvuku a zároveň aby v ňom nedochádzalo ku vzniku akustických odrazov od stien komory.
- Použitie anechoických komôr:
  - Meranie charakteristík akustických prijímačov a vysielateľov (mikrofónov, reproduktorov, ...).
  - Meranie charakteristík priemyselných zdrojov hluku a šumu (od fénov až po lietadlá).
- Jedným z parametrov anechoických komôr je „šumová hladina“:
  - Bežné hodnoty sú okolo 10 - 20 dB
  - V roku 2005 bola najnižšia nameraná hladina šumu -9,4 dB
  - Od roku 2015 drží rekord anechoická komora firmy Microsoft -20,6 dB

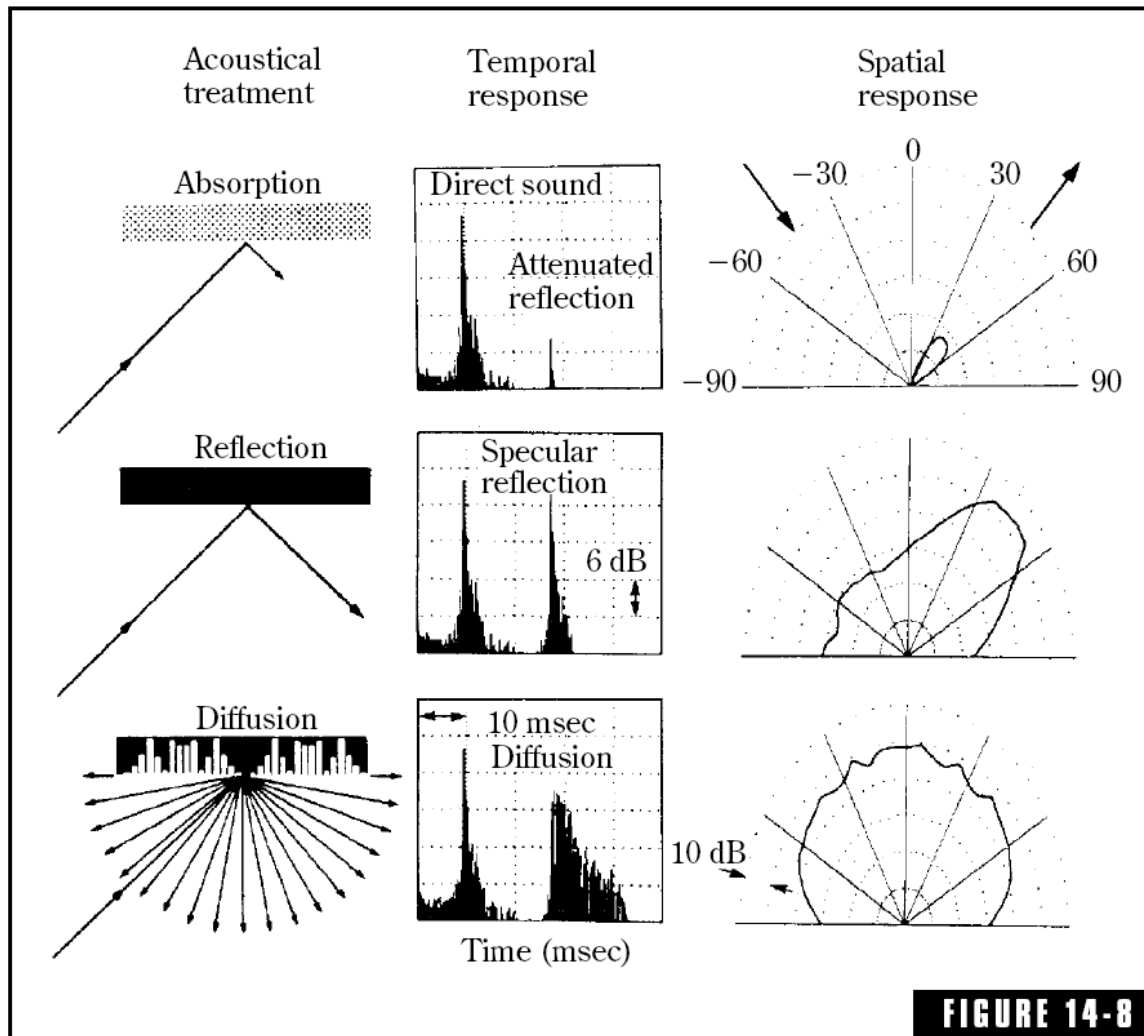


# Difúzia (rozptyl) zvuku

The goal of most room designs is to obtain sound energy across the audible frequency range that is uniformly distributed throughout the room.

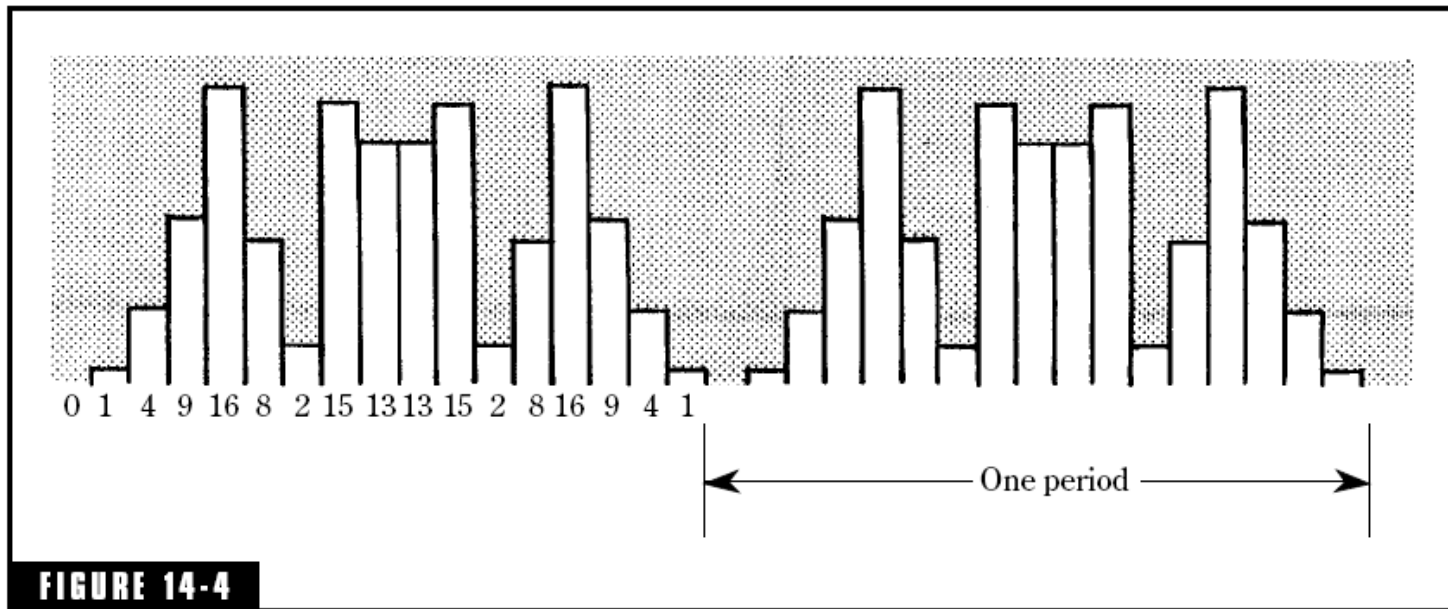
This is unattainable, but diffusion greatly assists in the effort.





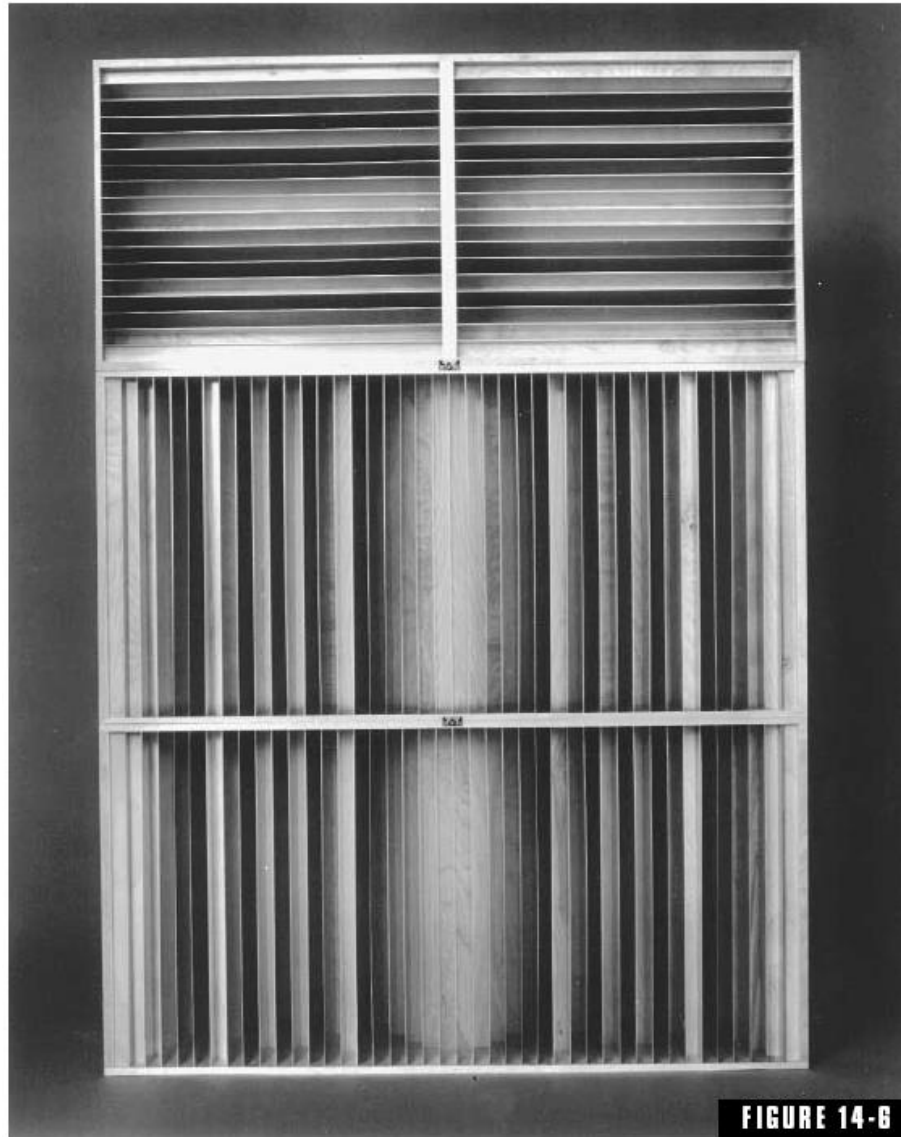
A comparison of the three physical principles of absorption, reflection, and diffusion. Peter D'Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc. and the Audio Engineering Society.

# The Schroeder Diffusor



**FIGURE 14-4**

A typical quadratic-residue diffusor based upon the prime number 17 column of Fig 14-3. The depths of the wells are proportional to the sequence of numbers in the prime-17 column. Two periods are shown illustrating how adjacent periods are fitted together.



**FIGURE 14-6**

A cluster of commercial quadratic-residue diffusers. Below are two QRD-4311™ diffusing modules with a single QRD-1911™ mounted above. The hemidisc of diffusion for the lower unit is horizontal, that of the upper unit is vertical. Peter D'Antonio, RPG Diffusor System, Inc. and the Audio Engineering Society, Inc.

# Akustické polia

## **Voľné pole (Free Field)**

Akustické pole je voľné, ak je homogénne, neohraničené a ak ho neovplyvňujú iné zdroje zvuku. Vo voľnom poli sa zvuková energia šíri jedným smerom – tok energie je jednosmerný. V praxi sa za voľné pole považuje aj taký akustický priestor, v ktorom majú vyššie uvedené obmedzenia malý vplyv. Za voľné pole môžeme napr. považovať priestor v bezdozvukovej komore (anechoic chamber) – voľné pole je umelo vytvorené stlmením odrazov.

## **Difúzne / dozvukové pole (Diffuse / Reverberant Field)**

Difúzne (dozvukové) pole je pole, v ktorom priemerná hodnota akustického tlaku, meraná na definovanom časovom intervale je konštantná v celom poli a tok akustickej energie je náhodný a rovnako pravdepodobný v ľubovoľnom smere. Dozvukové pole môže vzniknúť napr. v uzavretom priestore bez akustickej absorpcie.

## **Polo/semi-dozvukové pole (Semi-reverberant Field)**

Je to pole, v ktorom je časť akustickej energie absorbovaná a časť je odrazená do priestoru. Akustická energia prúdi vo viacerých smeroch. Väčšina akustickej energie priestoru má pôvod v difúznom poli, zároveň však existujú v ňom komponenty poľa, ktoré majú rozpoznateľný smer šírenia energie od zdroja zvuku. Semidozvukové pole je typickým typom zvukového poľa, vyskytujúcim sa vo väčšine zatvorených priestoroch.

## **Tlakové pole (Pressure Field)**

V tlakovom poli je okamžitá hodnota akustického tlaku homogénna v celom priestore. V tlakovom poli sa zvuková vlna nešíri – nemá žiaden smer. Tlakové pole vzniká v dutinách, ktorých maximálny rozmer je menší ako štvrtina vlnovej dĺžky zvuku, pretože tlakové pole je pomerne ľahko opakovateľné, používa sa napr. na kalibrovanie mikrofónov.

## **Ambientné šumové pole (Ambient Noise Field)**

Ambientné (t.j. okolité, všadeprítomné, v pozadí) šumové pole tvoria zvukové zdroje, ktoré neprispievajú The ambient noise field is composed of those sound sources not contributing to the desired LD (i.e., active sources).

