

# ZVUK

- „naizmjenične promjene fizičkog stanja neke elastične sredine koje nastaju na mjestu izvora zvuka i prenose se na okolnu sredinu”
- **fizičko stanje?** (pomjeraj, brzina, ubrzanje, pritisak, gustina, ....)
- **uzrok zvuka?** Vibracije nekog tijela, koje zatim izazivaju oscilacije čestica vazduha, a ovo oscilovanje se prenosi dalje u vidu ZVUČNIH TALASA

## KARAKTERISTIKE ZVUKA

- ◆  $\nu$  [Hz] ;  $T = \nu^{-1}$  ;  $\lambda = \frac{c}{\nu} = c \cdot T$  ;  $c$  – brzina zvuka
- ◆ pomjeraj čestica vazduha  $s = A \sin(\omega t + \varphi)$
- ◆ brzina zvuka za gasove  $c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p}{\rho}}$  ,  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  , pri normalnim uslovima  $c = 331 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$
- ◆ brzina zavisi od temperature:  
 $c_t = 331 + 0,6 \cdot t \text{ [}^\circ\text{C]}$

## ZVUČNO POLJE

- ♦ prostor u kojem se prostire zvuk
- ♦ **sferni i ravni** talasi
- ♦ akustička brzina (ne mješati sa  $c$ !) – je brzina čestica pri oscilovanju  $v = \frac{ds}{dt}$
- ♦ **zvučni ili akustički pritisak** (često u [ $\mu\text{b}$ ])
- ♦ **omov zakon u akustici** – akustička impendanca

=specif.akust.otpornosti:  $\frac{p}{v} = \rho \cdot c$  (\*)

## INTENZITET I SNAGA ZVUČNOG IZVORA

- ♦ **Intenzitet:**  $J = p \cdot v \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

iz (\*) i gornje def.  $\rightarrow \boxed{J = \frac{p^2}{\rho \cdot c}}$ , vrijedi za sve tipove zvučnih talasa!

- ♦ **Akustička snaga** – za sferni talas, na površi

sфере je  $P_a = 4\pi r^2 \cdot J = \frac{4\pi r^2 p^2}{\rho \cdot c}$ , a odavde je

pritisak  $p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P_a \rho \cdot c}{4\pi}} \propto \frac{1}{r}$

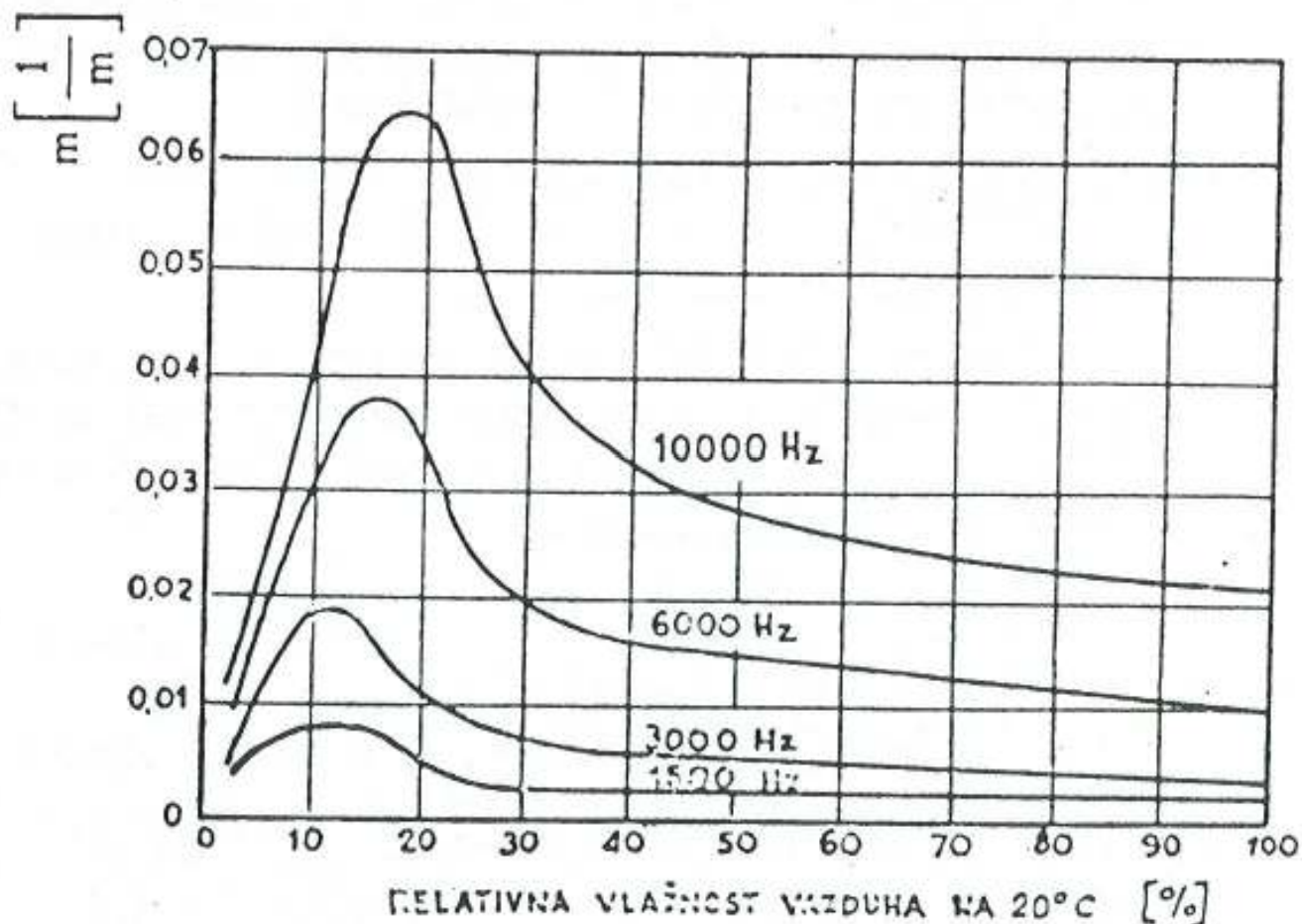
# SLABLJENJE ZVUKA KROZ VAZDUH

## Zašto zvuk slabi?

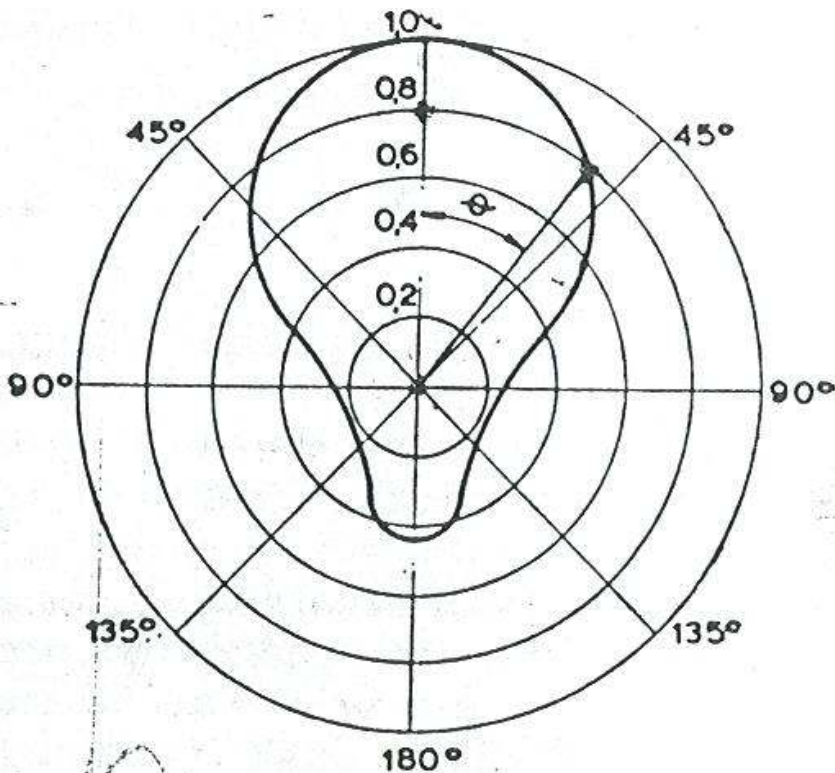
1. Zvučni talas se širi,  $p \propto \frac{1}{r}$ , zvuk slabi...
2. Čestice vazduha gube energiju trenjem...

$$J = J_0 e^{-mx}$$

- ◆ Konstanta slabljenja  $m$  zavisi od **vlažnosti**, **temperature** vazduha i **frekvencije** zvuka!



# USMJERENI ZVUČNI IZVORI



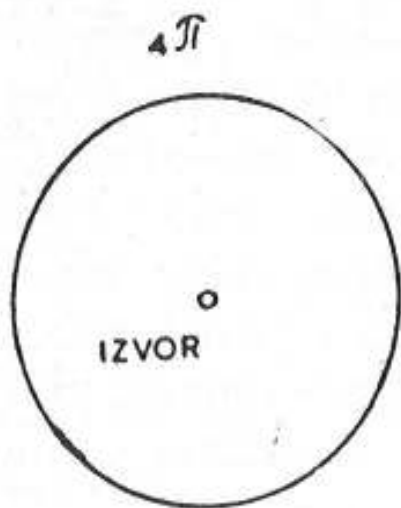
$$\frac{P_\theta}{P_0} = \Gamma(\theta)$$

**Snaga:**  $P_a = \oint_S J dS$  ,

$$\Rightarrow P_a = \sum_{\text{lopta}} J_i S_i = \frac{4\pi r^2 J_0}{\gamma}$$

$\gamma$  – stepen usmjerenosti.

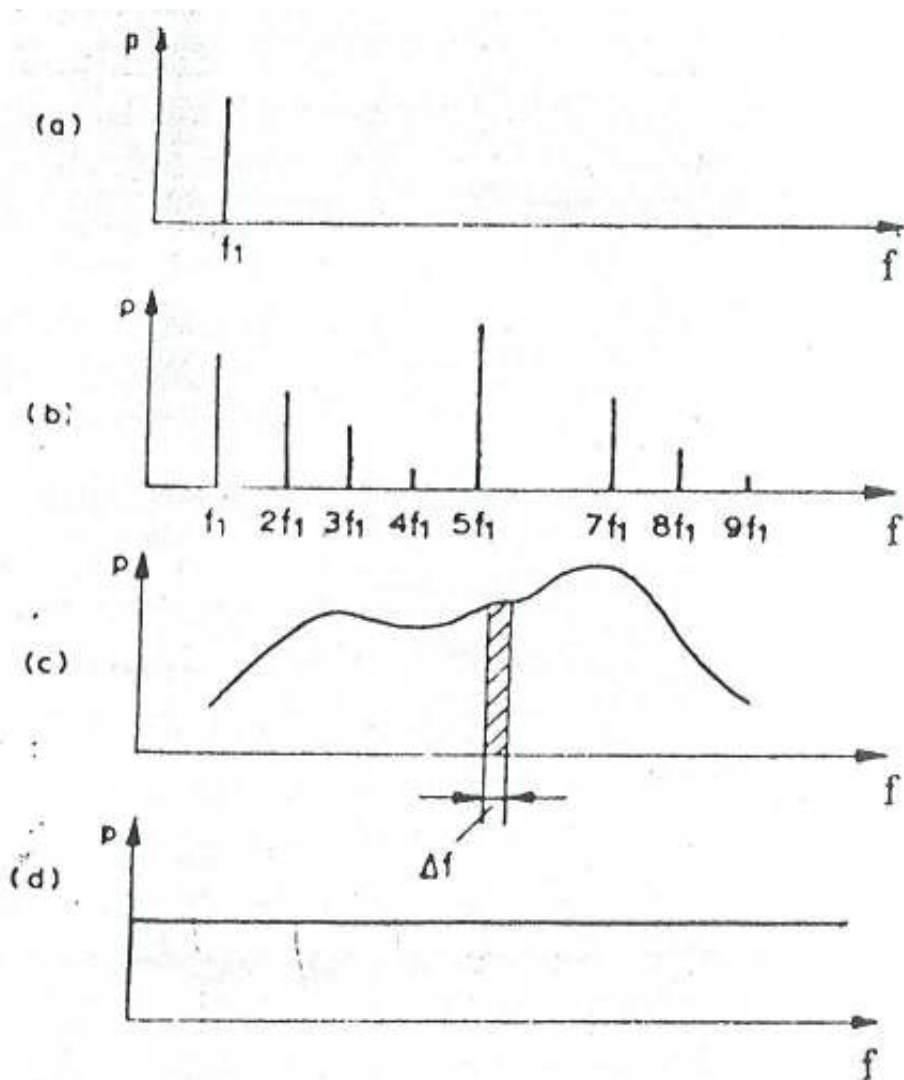
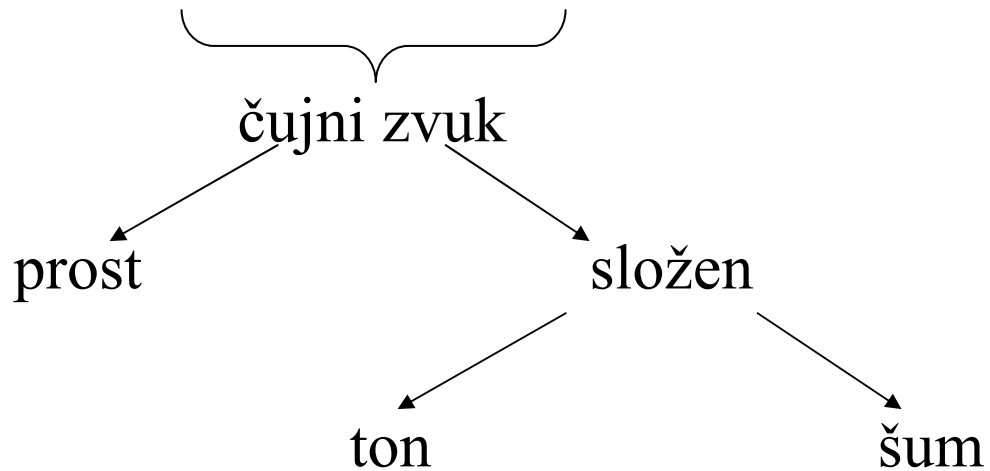
**Intenzitet:**  $J_0 = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} = \frac{P_a}{\Omega r^2}$  , gdje je  $\Omega = \frac{4\pi}{\gamma}$



Oдавде се може закључити да се може произвести звук истог интензитета и са мањом акустичком snagom, само треба smanjiti prostorni ugao zračenja  $\Omega$ .

# FIZIOLOŠKA AKUSTIKA

infrazvuk.....20 Hz.....20000 Hz.....ultrazvuk



- ◆ Ljudsko uho je osjetljivo na promjenu pritiska

$$p = \hat{p} \sin(2\pi\nu t + \varphi)$$

- ◆ Visina tona

- Skala je podjeljena na tonove i poutonove

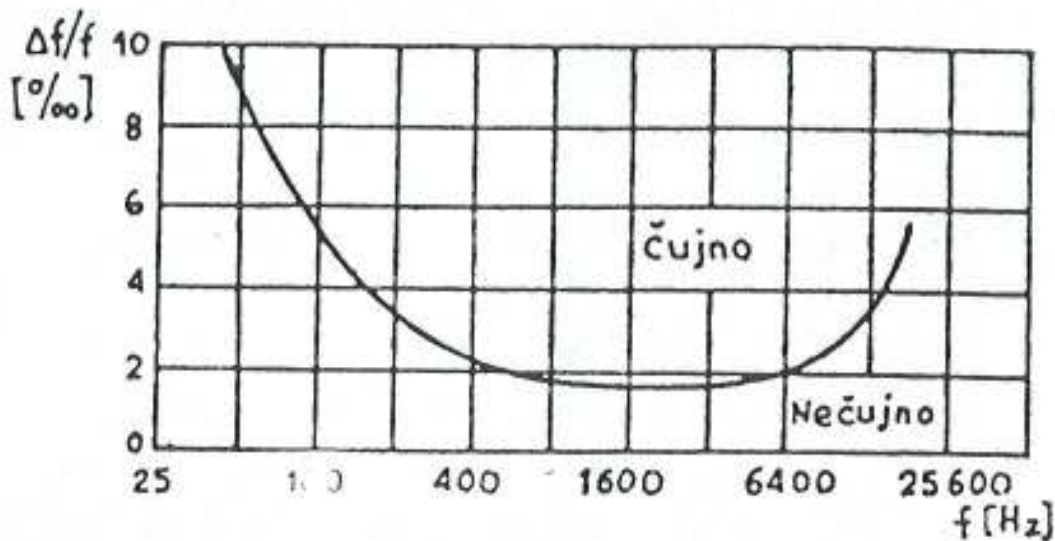
- Odnos frekvencija: 1:2 → oktava

2:3 → kvinta

3:4 → terca...itd

čujno područje = 10 oktava ( $20 \cdot 2^{10} \approx 20.000$ )

- Uho jako osjetljivo u opsegu 400 – 7000 Hz

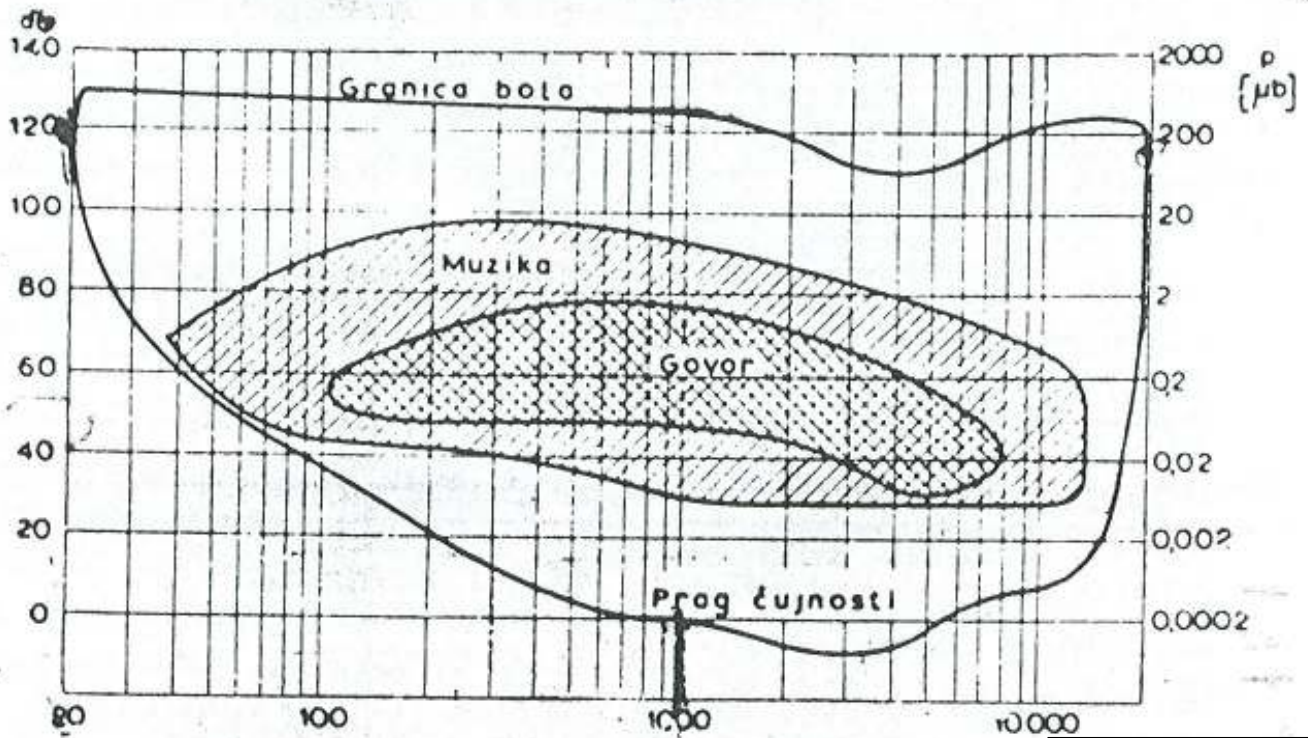


- ◆ Jačina zvuka

○ Zavisi od veličine zvučnog pritiska

$$L[\text{dB}] = 20 \log \frac{p_1}{p_2}$$

prag čujnosti  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} [\text{Pa}]$



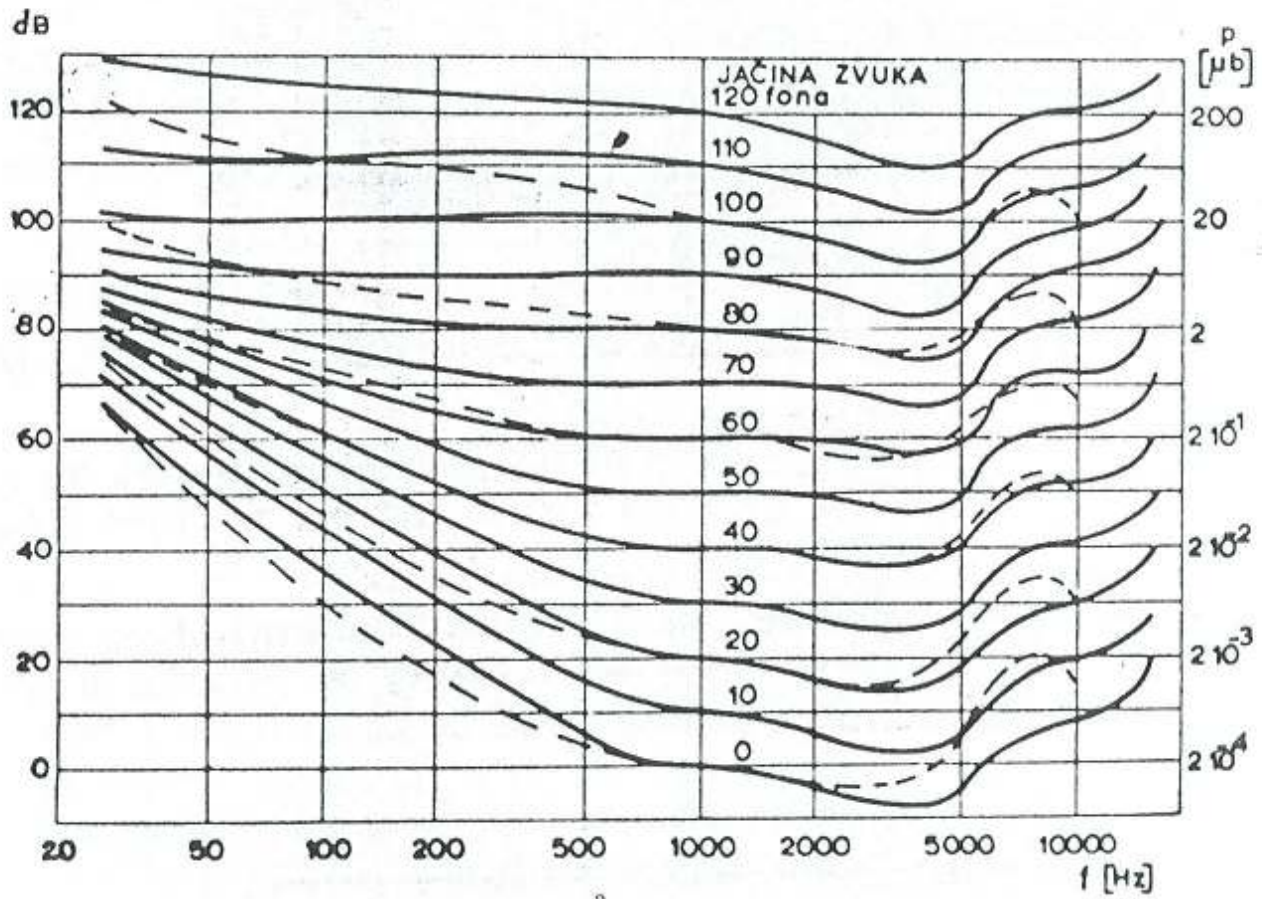
Kako je  $J = \frac{p^2}{\rho \cdot c}$ , onda  $L = 20 \log \frac{\sqrt{\rho c J_1^{1/2}}}{\sqrt{\rho c J_2^{1/2}}} \Rightarrow L = 10 \log \frac{J_1}{J_2}$ ,

prag čujnosti:  $J_0 = \frac{p_0^2}{\rho c} = 10^{-12} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

- ♦ Ljudsko uho ne čuje jednako dva zvuka istog intenziteta, a različitih frekvencija.

$$\Lambda[\text{fon}] = 20 \log \frac{p}{p_0}, \text{ za } \nu = 1000 \text{ Hz.}$$

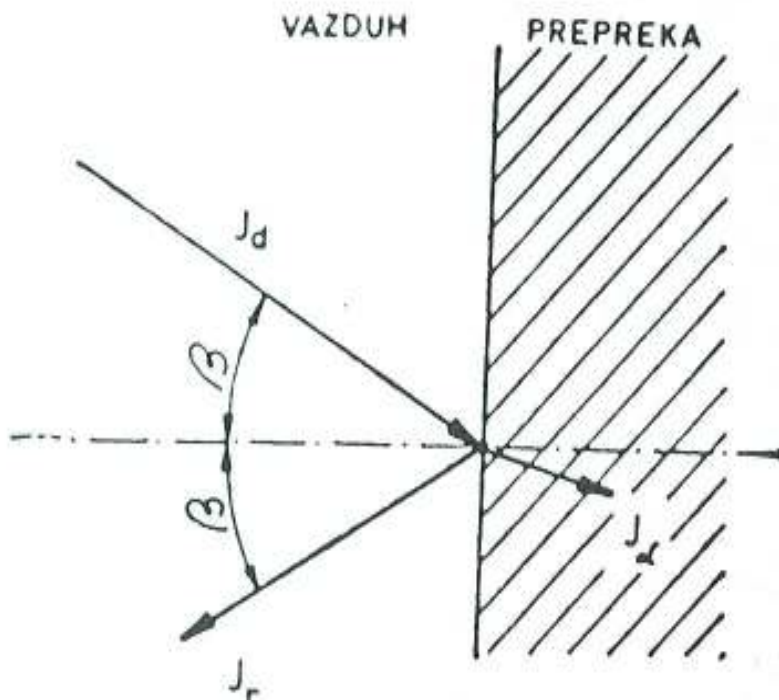
Izofonske linije (određ.exp, Fletcher i Munson)



120 fona	Avionski motor na 3m
100 fona	Motocikl bez prigušivača
80 fona	Teretni auto
60 fona	Usisivač, pisaća mašina
50 fona	Normalan razgovor
40 fona	Prigušen razgovor, tiha muzika
30 fona	Gledalište u pozorištu tokom predstave
20 fona	Mirna bašta izvan grada
10 fona	Šum lišća pri najslabijem vjetru

# ZVUČNI TALASI U PROSTORIJAMA

## KOEFICIJENT APSORPCIJE



$$P_d = P_r + P_a,$$

koeficijent apsorpcije

$$\alpha = \frac{P_a}{P_d}$$

- ♦  $\alpha=0$  potpuna refleksija – idealno krut materijal
- ♦  $\alpha=1$  talas potpuno apsorbovan – «otvoren prozor»

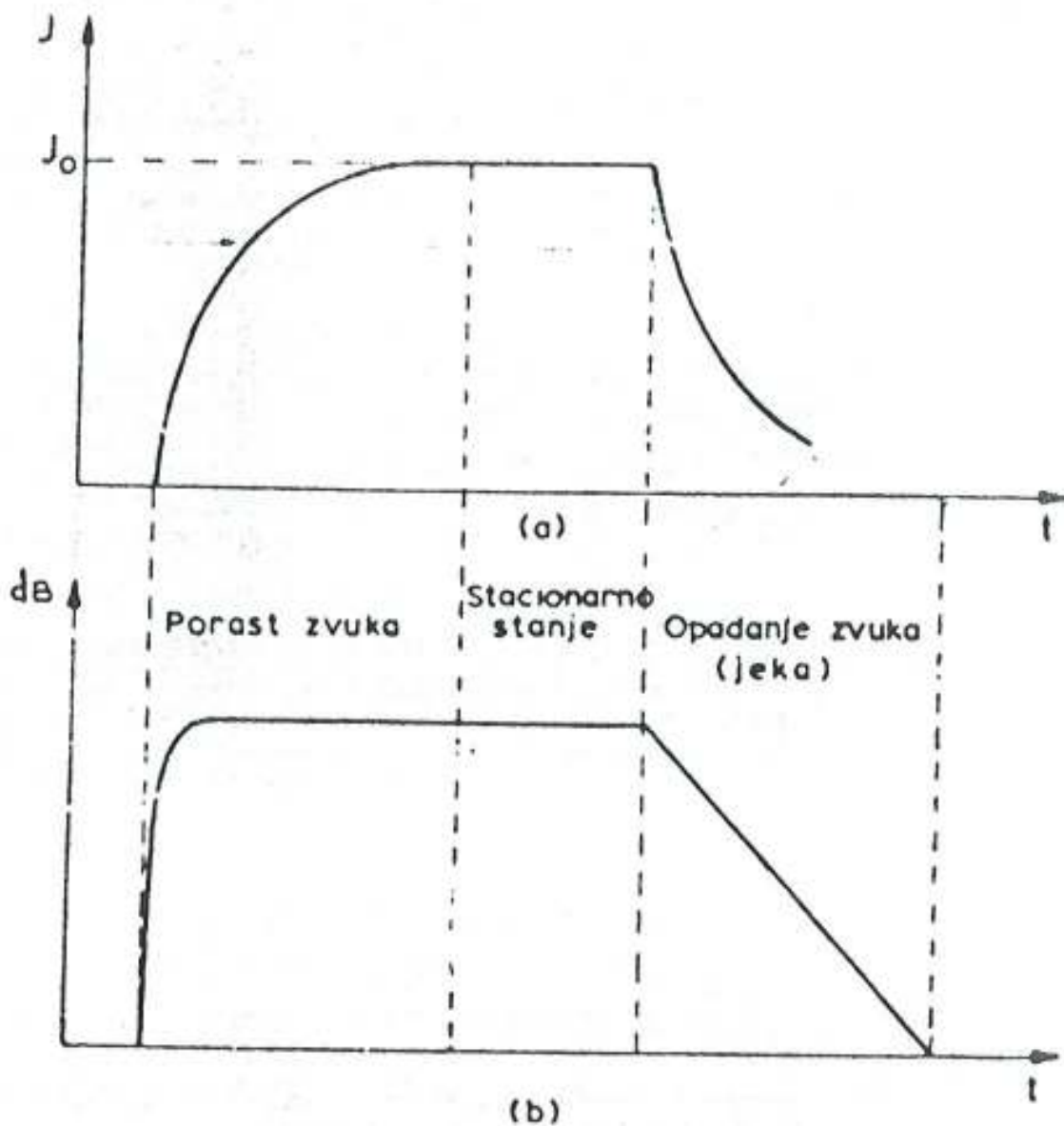
Apsorpcija:  $A = \alpha \cdot S \quad [\text{m}^2]$

Apsorpcija prostorije:  $A = \sum \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots = \sum A_i \quad [\text{m}^2]$

# PORAST I OPADANJE INTENZITETA ZVUKA U PROSTORIJI

$$J = J_0(1 - e^{-bt}) \text{ – porast int.zvuka } b = \frac{A \cdot c}{4V} ; J_0 = \frac{4P_a}{A} (*)$$

$$J = J_0 e^{-bt} \text{ – opadanje int.zvuka}$$



## VRIJEME REVERBERACIJE (JEKE)

- ◆ To je po definiciji ono vrijeme za koje zvučna energija opadne na milionti dio prvobitne vrijednosti, tj za 60 dB.

$$10^{-6} J_0 = J_0 e^{-b \cdot T} \Rightarrow 6 \ln 10 = b \cdot T = \frac{A \cdot c}{4V} \cdot T$$

$$T = \frac{0,16 V}{A} \quad [\text{s}]$$

- ◆ Za više frekvencije mora se uračunati i apsorpcija zvuka od strane vazduha:

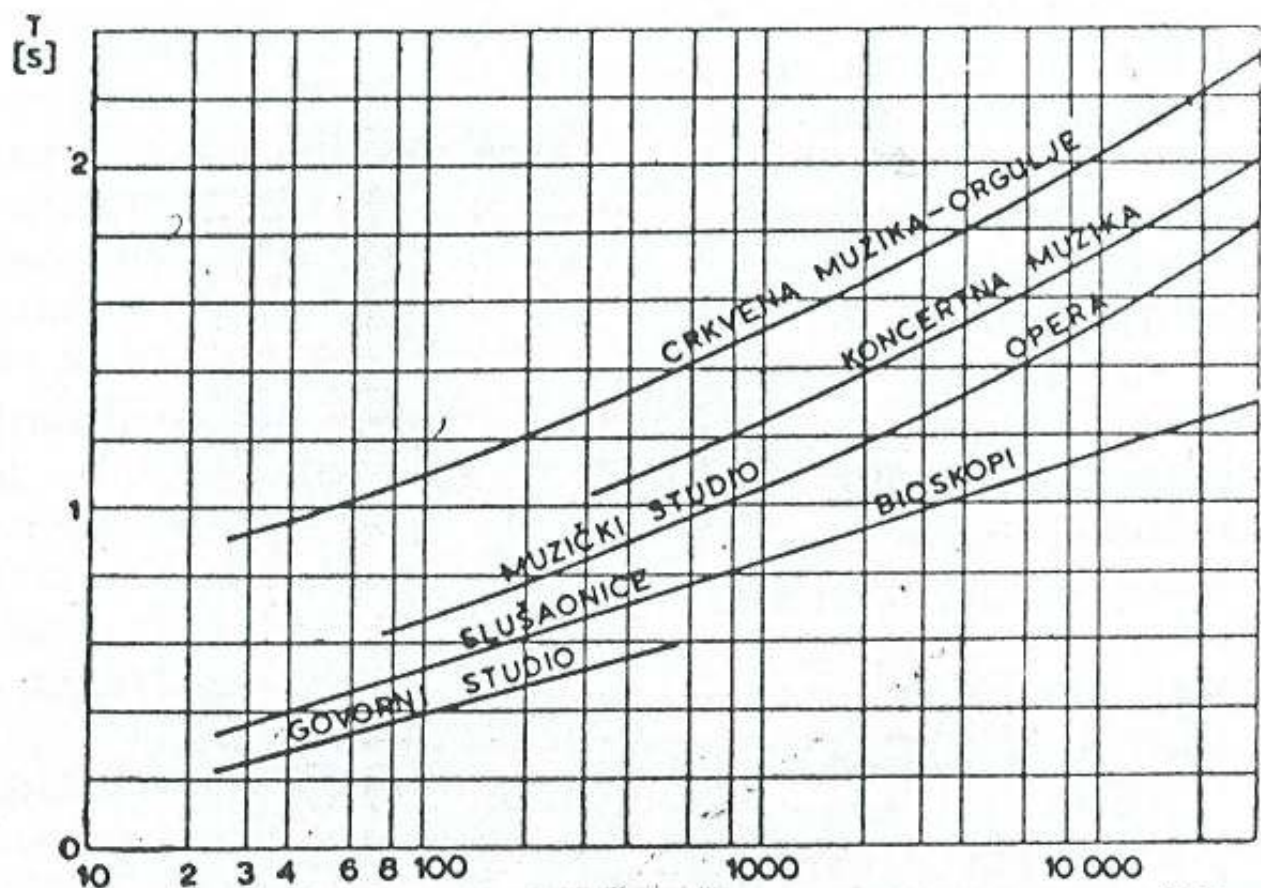
$$T = \frac{0,16 V}{A + 4 m \cdot V} \quad [\text{s}]$$

- ◆ Intenzitet zvuka prema (\*) je tada:

$$J_0 = \frac{4P_a}{A} = \frac{4P_a}{\frac{0,16 V}{T}} = \frac{25P_a \cdot T}{V} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Vidi se da će intenzitet zvuka izvora akust.snage  $P_a$  biti veći ukoliko je prostorija manja, a  $T$  veće!

# OZVUČAVANJE PROSTORIJA



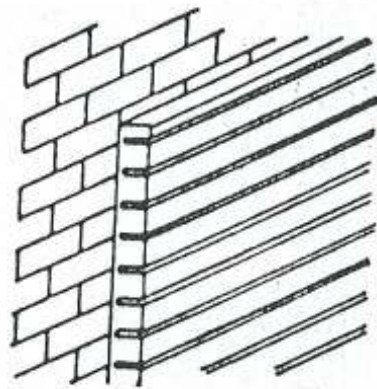
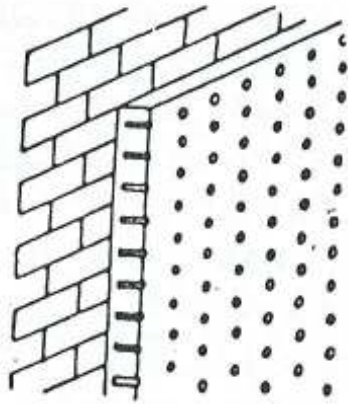
- ◆ Cilj je nadomjestiti ili dopuniti prirodni zvučni izvor
- ◆ **Akustičnost** – ocjena je ipak subjektivna, ali neki objektivni parametri su:
  - Pogodno vrijeme reverberacije
  - Dobra difuznost
  - Povoljan odnos direktnog i indirektnog zvuka
  - Dovoljna izolacija od spoljnje buke

- ◆ Veliko  $T$  je dobro  $\left( J_0 = \frac{25P_a \cdot T}{V} \right)$ , ali se razumljivost tada smanjuje, tonovi se slijevaju jedan u drugi
- ◆ Malo  $T$  dovodi do efekta «gluve sobe»
- ◆ Slušanje zvuka u «gluvoj sobi» dobija se efekat «otvorenog prozora»
- ◆ Veliko  $T$  se smanjuje oblaganjem apsorpcionim materijalima (u stanovima je već unošenje namještaja dovoljno)

## APSORPCIONI MATERIJALI

### Porozni materijali

- ◆ Apsorbuju više frekvencije: tekstili, staklena i mineralna vuna, pluto, fazer-ploče, sunder....
- ◆ Efikasnost raste i na nižim frekvencijama, ako se poveća debljina ili ako se sloj postavi na nekom rastojanju od zida
- ◆ **Industrijski-akustičke ploče** koje se zaštićuju sa tankim **perforisanim pločama**



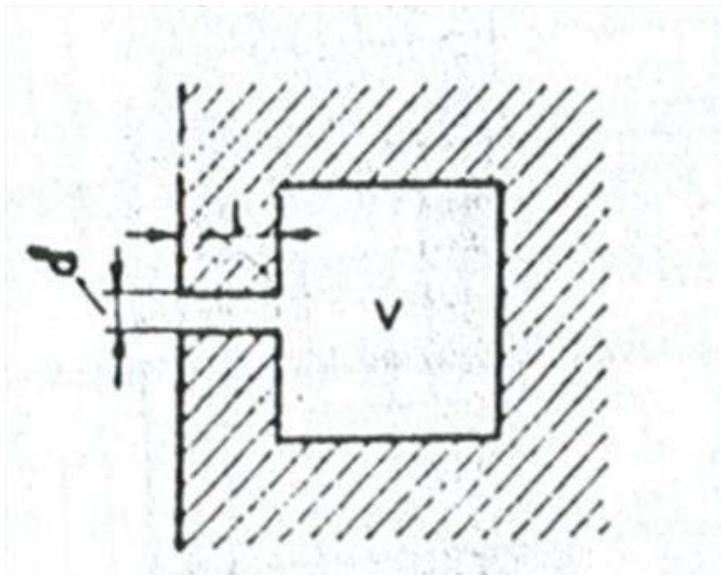
Sl. 11.4 — Akustička ploča

$$\left( v' = 8.000 \frac{d}{a^2} \right),$$

$d$  – prečnik rupa,  
 $a$  – rastojanje između središta rupa (sve u [cm])

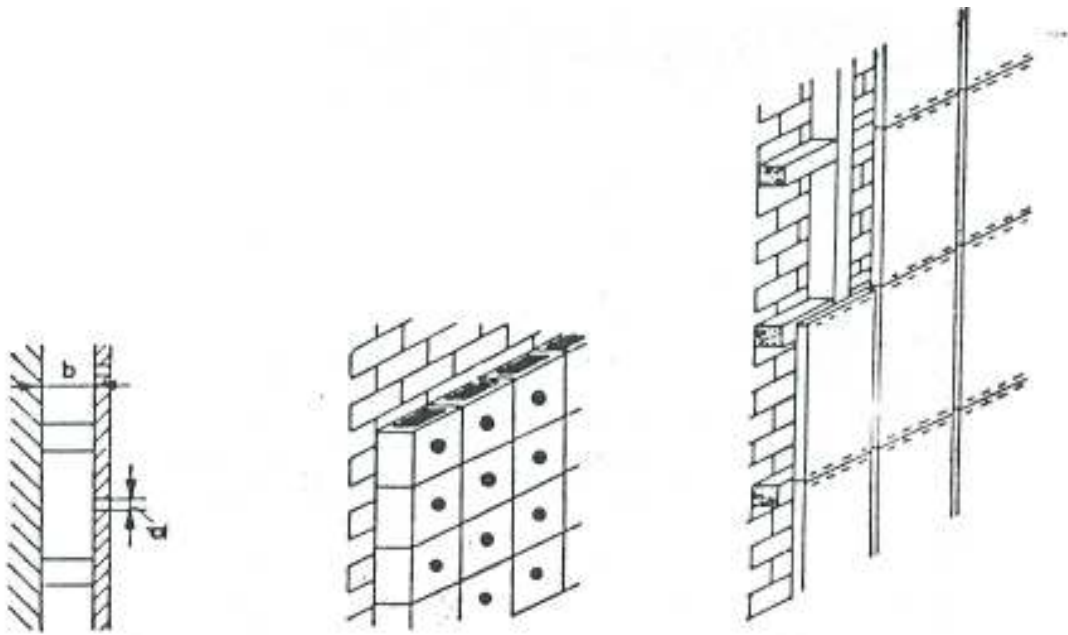
ili lakim membranama  $\left( v' = \frac{100}{M} \right)$ ,  
 $M$  – površinska masa [kg/m<sup>2</sup>].

## Akustički rezonatori



◆ Rezonanca:

$$v_0 = \frac{5000d}{\sqrt{V(l + 0,8d)}}$$



- ◆ Rezonanca:  $v_0 = 550 \sqrt{\frac{\sigma}{b(l + 0,8d)}}$ ,  $\sigma$  – perforacija [%]
- ◆ Apsorpcija za niže i srednje frekvencije

## Mehanički rezonatori

- ◆ Apsorpcija nižih frekvencija

- ◆ Rezonanca:  $v_0 = \frac{600}{\sqrt{Mb}}$  ;

$M$  – površ.masa,  $b$  – rastojanje ploče od zida

- ◆ Drvo (lesonit, šperploča), plastične mase

# DIFUZNOST PROSTORIJE

- ◆ **direktan i reflektovan** zvuk
- ◆ reflektovan zvuk ne smije biti favorizovan – mora podjednako ispunjavati prostor – difuznost
- ◆ faktori koji utiču na difuznost:
  - raspored apsorpcije materijala (što nepravilniji)
  - oblici površina zidova – razbijanje zvuka
  - oblik i veličina prostorije
    - mali prostori – efekat «bačve»
    - veliki prostori – pojava jeke, smanjena difuznost, miješanje zvuka – iskustvo govori da se jeka javlja za udaljenosti zid-izvor zvuka >11m

## Odnos direktnog i reflektovanog zvuka

- ◆ istovremenost prijema i direktnog i reflektovanog zvuka

- ◆ direktni zvuk slabi sa rastojanjem,  $J = \frac{P_a}{4\pi r^2}$ .

On NOSI informaciju.

- ◆ reflektovan zvuk je praktično svud jednak,

$$J_0 = \frac{4P_a}{A} = \frac{25P_a \cdot T}{V},$$

- ◆ na udaljenim mjestima zvuk se sastoji uglavnom od  $J_0$  (pozorište sa zidovima od ogledala!)
- ◆ ispitivanja kažu da reflektovani ne bi smio biti veći od direktnog više od 12 dB.
- ◆ Korišćenje tavanica: kvazi-direktan zvuk
- ◆ PRAVILO: ako slušaoci dobro vide izvor zvuka, njihova mjesta su dobro akustički postavljena

## IZOLACIJA OD SPOLJAŠNJE BUKE

- ◆ pravilno locirati slušaoce
- ◆ odrediti nivu unutrašnje buke i shodno tome i zaštitu
- ◆ buka u prostoriju ulazi n 3 načina:
  1. kroz otvore (bolje 100 otvora  $1\text{cm}^2$ , nego 1 otvor  $100\text{cm}^2$ ); oblaganje otvora, savijanje u koljeno....
  2. preko zidova koji vibriraju – efekat membrane; povećati površinsku masu zida; praviti dvostruke pregrade sa vazдушnim prostorom od bar 10 cm (dvostruka vrata, prozori...)...
  3. kroz građevinske konstrukcije – gotovo svi materijali u građevini kruti i dobri prenosnici zvuka. Zbog toga treba **praviti prekide** gdje je god moguće («ploveći podovi», «viseće tavanice»...).