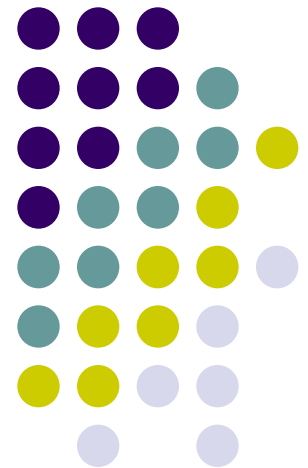
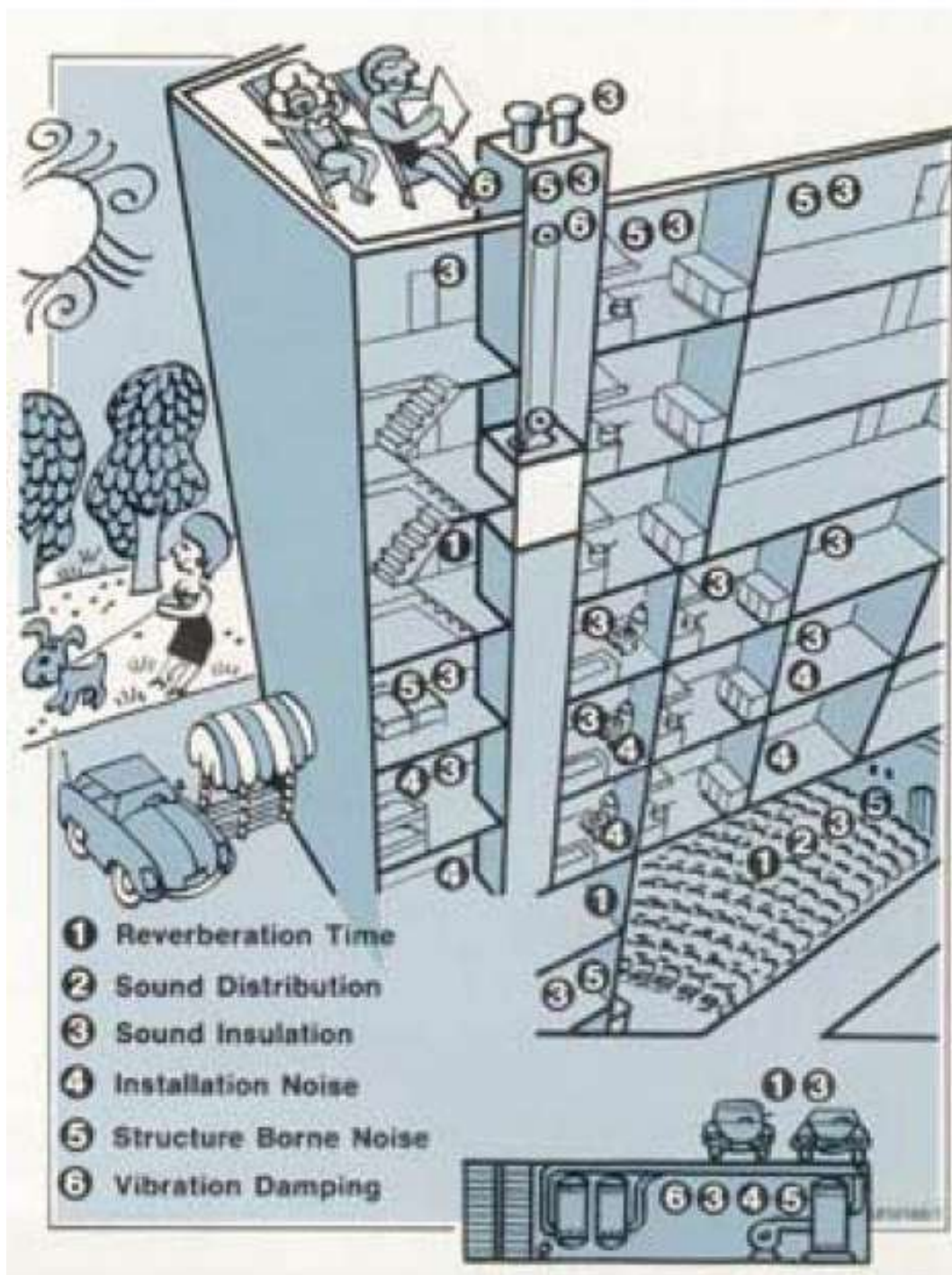


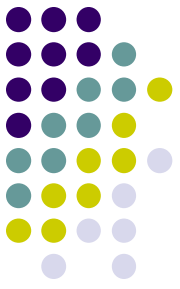
Buka i vibracije

8. Zvuk u zatvorenom prostoru

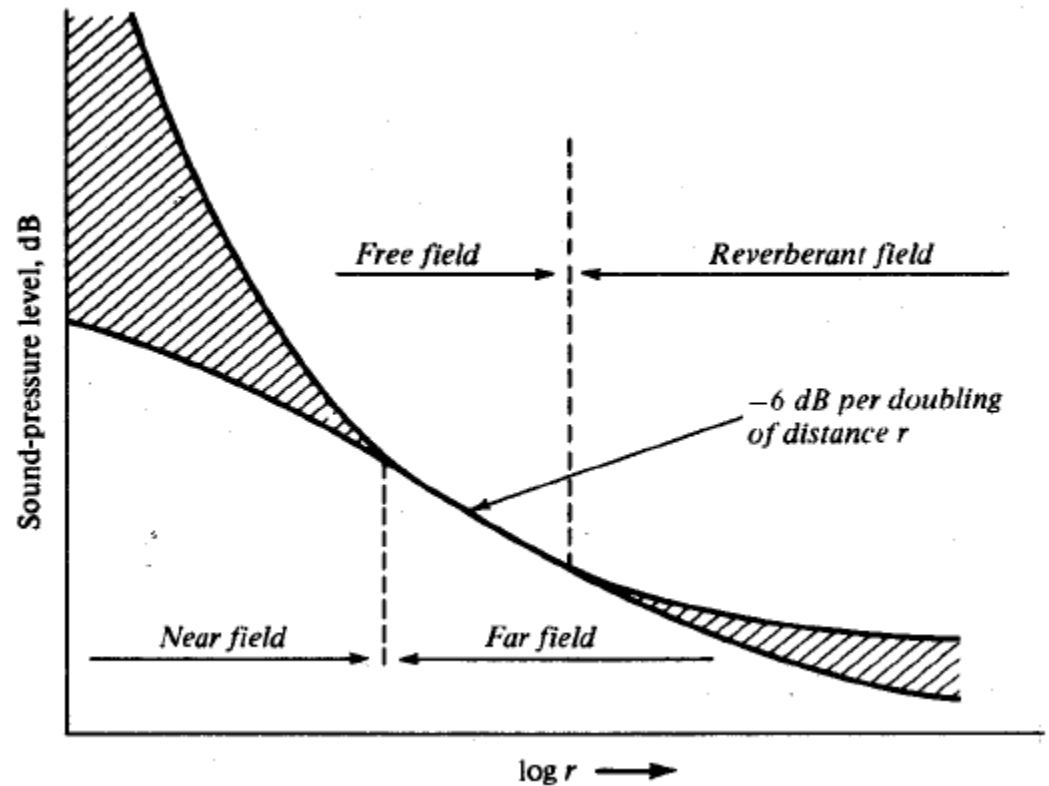


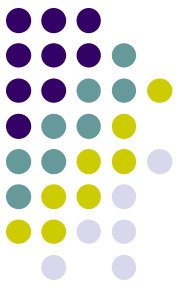
Akustika u zgradama: Što bi trebalo mjeriti?





- zvučna polja:
 - blisko polje
 - daleko polje
 - slobodno polje
 - odječno polje
 - difuzno polje



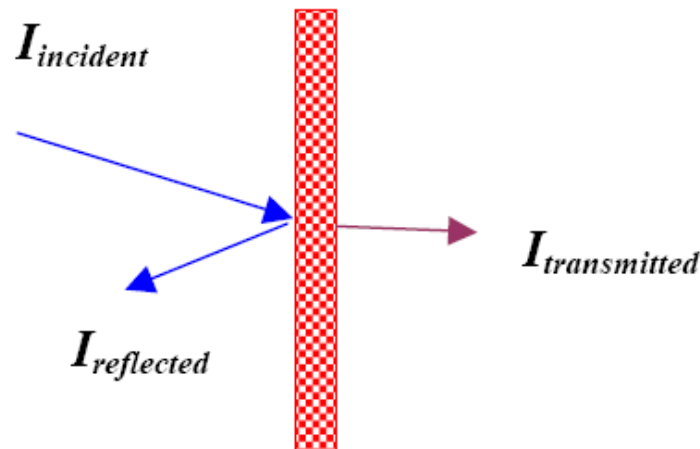


Apsorpcija zvuka

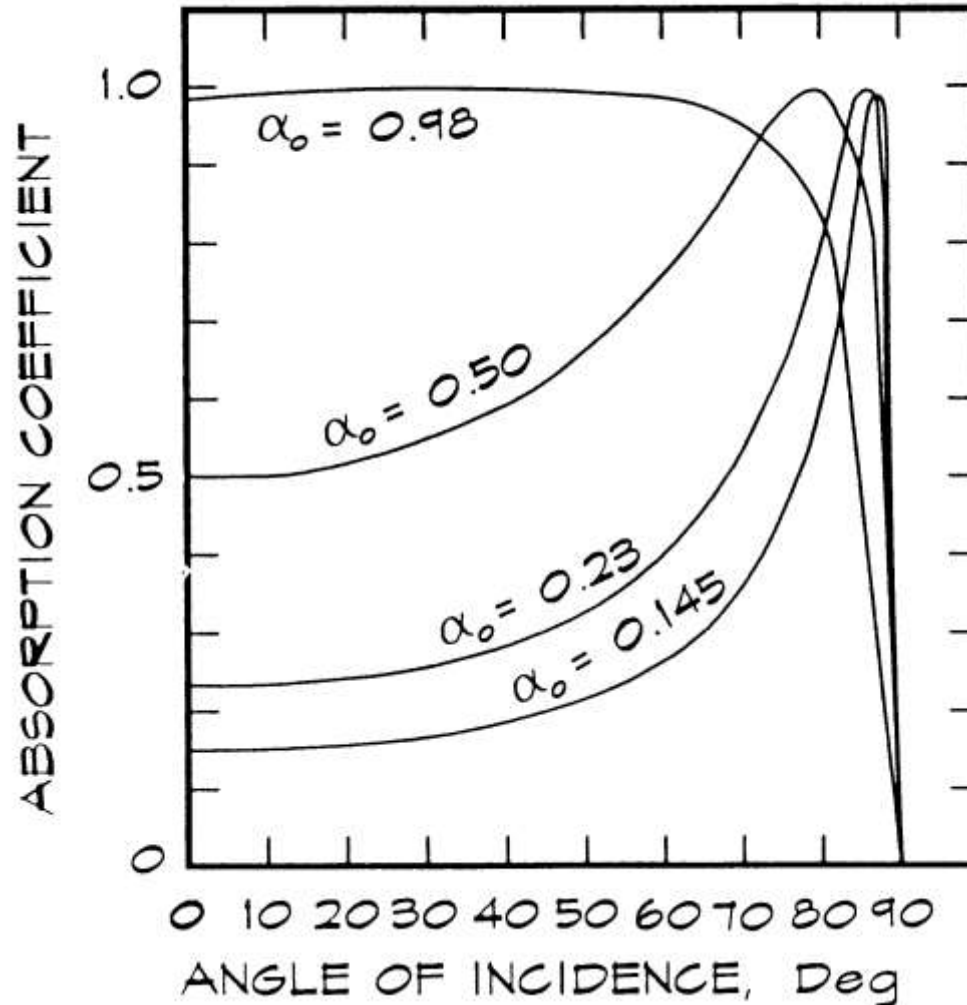
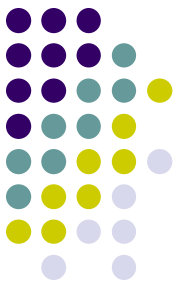
- kad zvuk naiđe na prepreku (zid), dio se reflektira, a dio apsorbira (odnosno prođe kroz prepreku)
- definira se koeficijent apsorpcije, $0 \leq \alpha \leq 1$

$$\alpha = \frac{I_{\text{apsorbirano}}}{I_{\text{upadno}}} = \frac{I_{\text{upadno}} - I_{\text{reflektirano}}}{I_{\text{upadno}}}$$

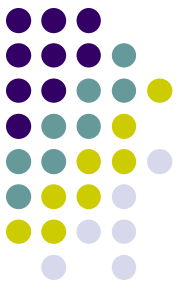
- α je funkcija materijala, frekvencije i kuta upada



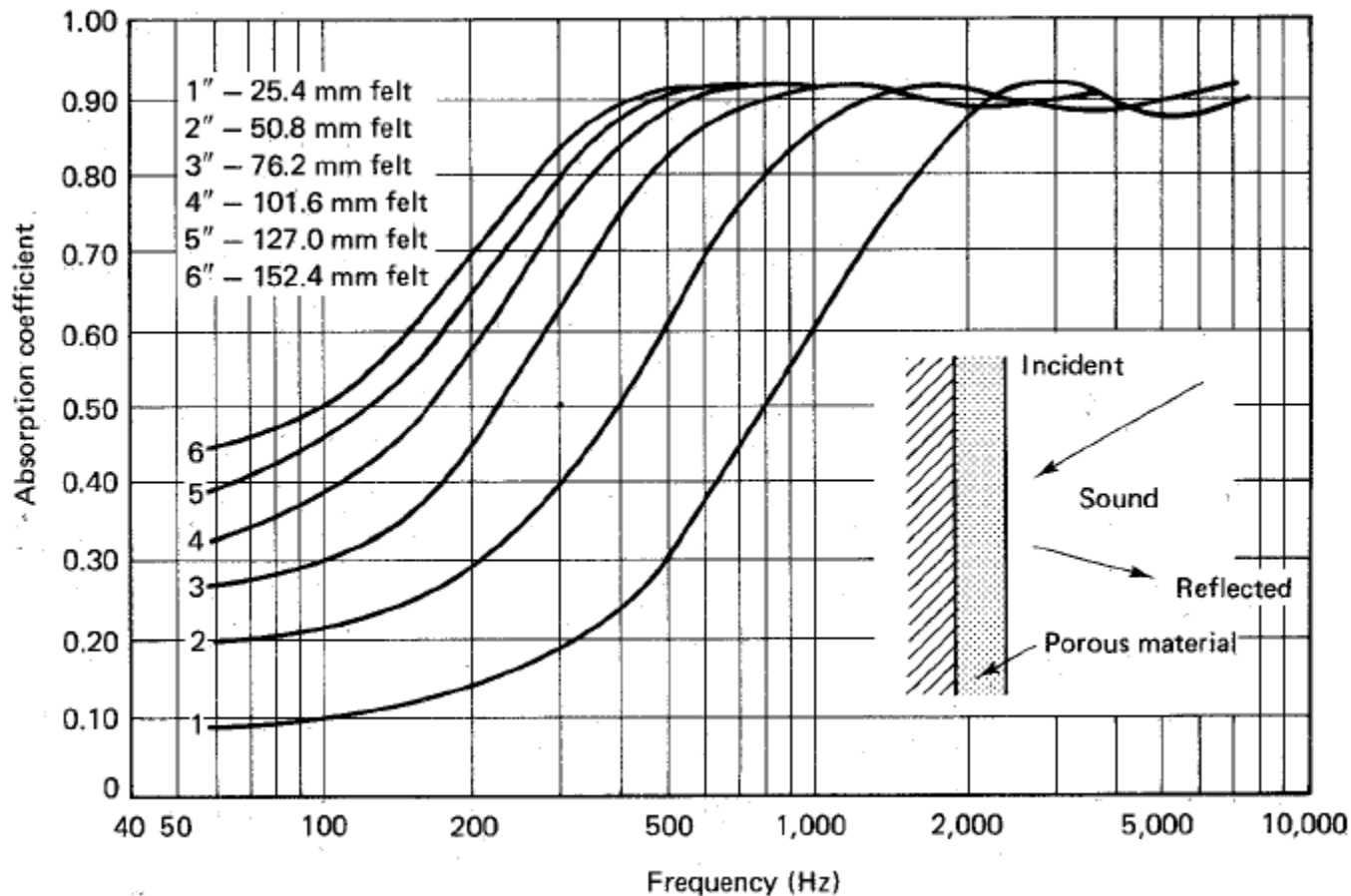
Ovisnost koeficijenta apsorpcije o kutu upada zvuka



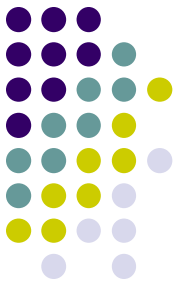
Apsorberi - porozni



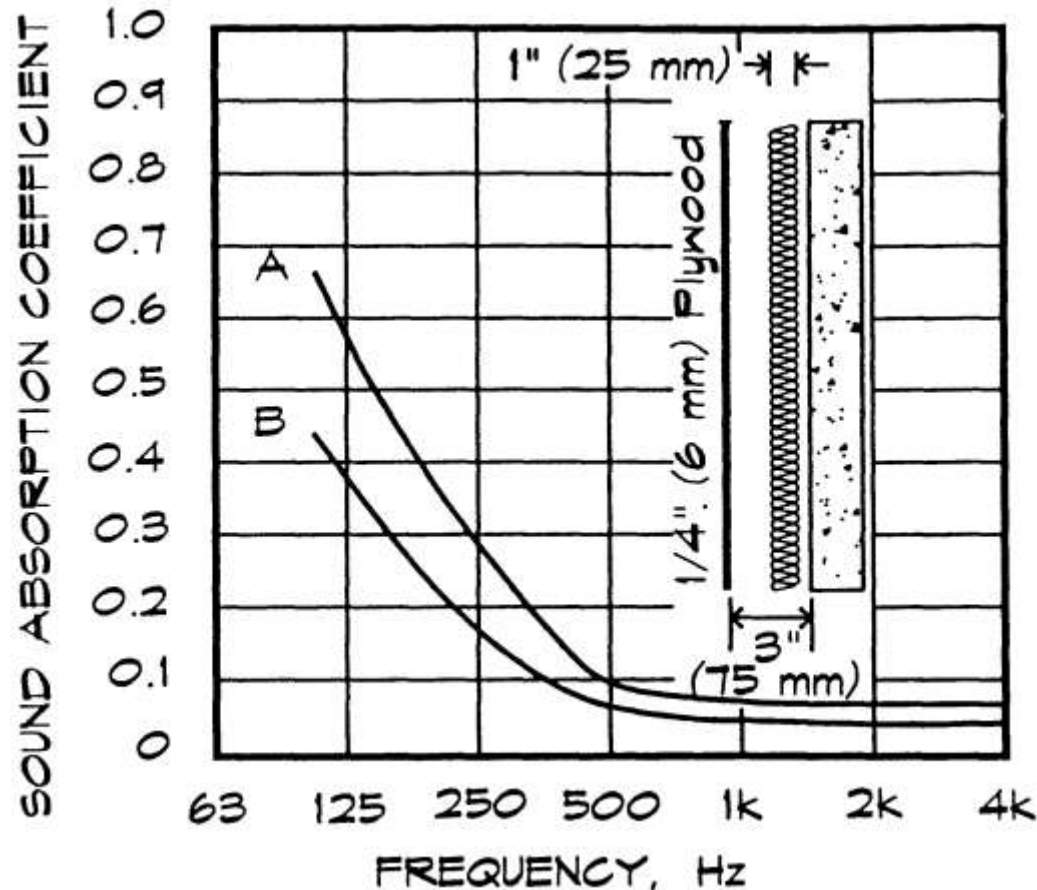
- primjer filca različnih debljina



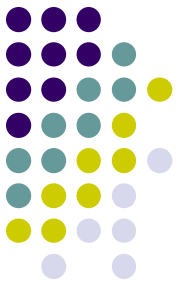
Apsorberi – membranski



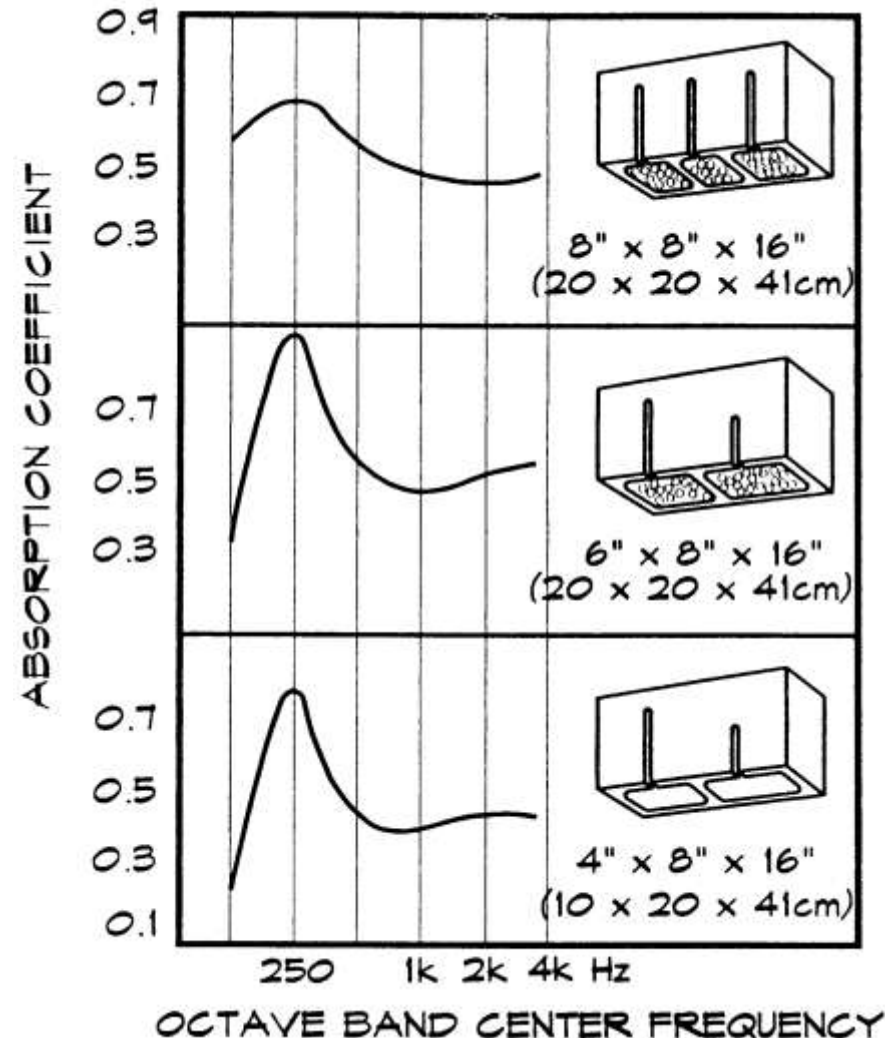
- primjer ploče od iverice ispred tvrde plohe: A - dodatak mineralne vune, B – bez min. vune



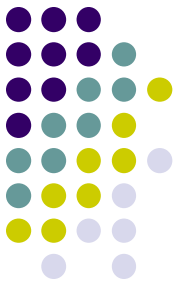
Apsorberi – rezonatorski



- primjer Helmholtzovog rezonatora u obliku građevnog betonskog bloka ispunjenog mineralnom vunom



NRC (Noise Reduction Coefficient)

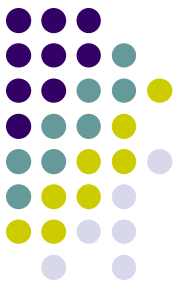


- skalar koji opisuje “upojnost” zvuka nekog materijala na najvažnijim oktavnim frekvencijama za komunikaciju:

$$NRC = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) / 4$$

Brick, unpainted	.00 - .05
Concrete (smooth), unpainted	.00 - .20
Fiberglass, 1" Semi-rigid	.50 - .75
Glass	.05 - .10
Plaster	.05
Polyurethane Foam (1" thick, open cell, reticulated)	.30
Seating (occupied)	.80 - .85

Načini mjerenja koeficijenta apsorpcije

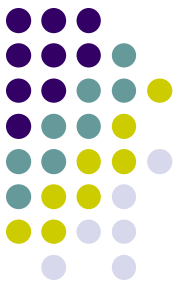


- u ječnoj komori – mjeri se promjena vremena odjeka uslijed unošenja određene površine materijala koeficijenta apsorpcije α

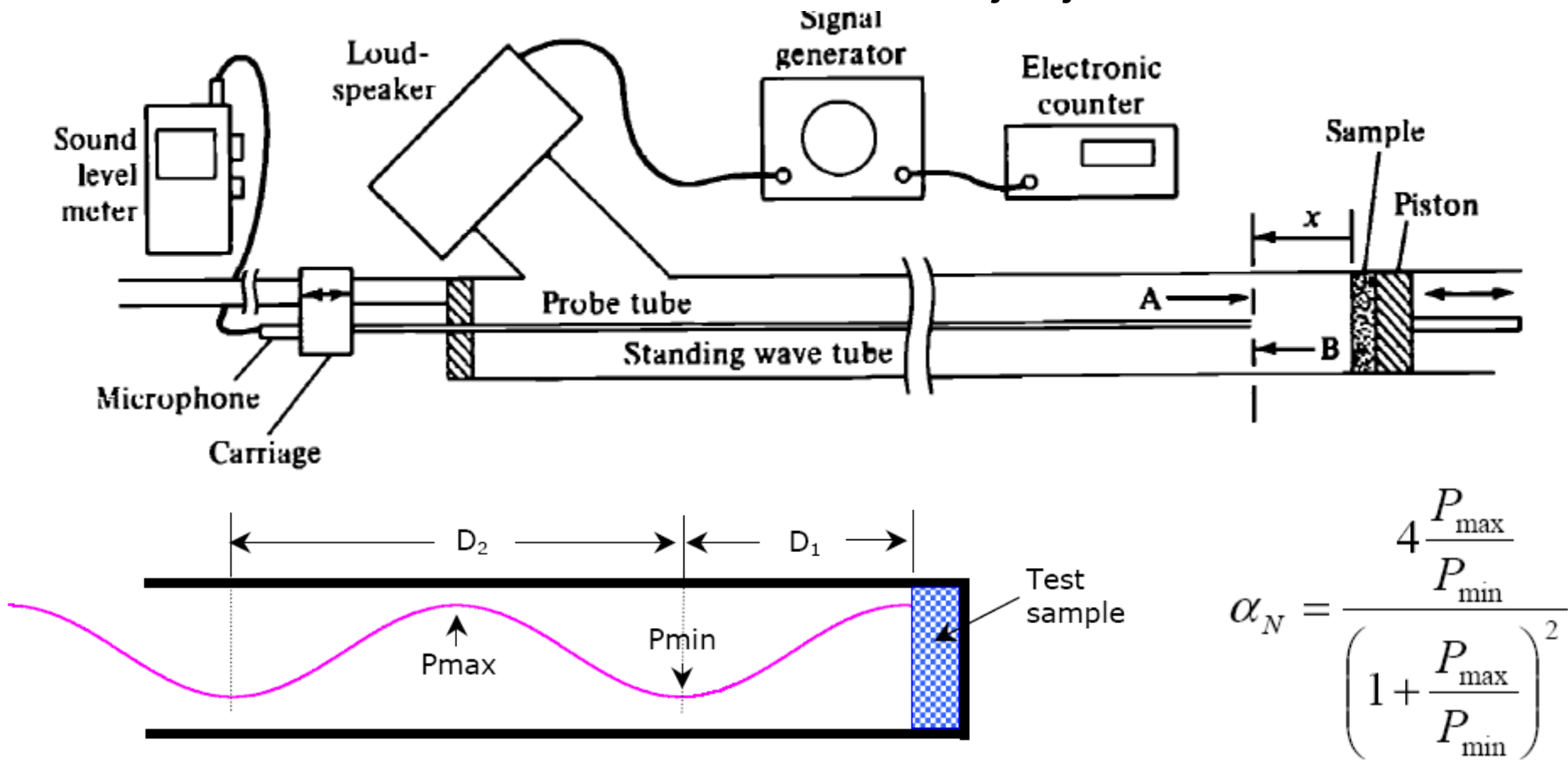
$$\alpha = \frac{0,16V}{S} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_p} \right)$$

- α – koeficijent apsorpcije uzorka
S – površina uzorka mjerenog materijala
V – volumen ječne komore
 T_u – vrijeme odjeka s uzorkom
 T_p – vrijeme odjeka prazne komore

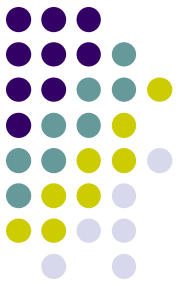
Načini mjerenja koeficijenta apsorpcije



- na malim uzorcima u Kundtovoj cijevi



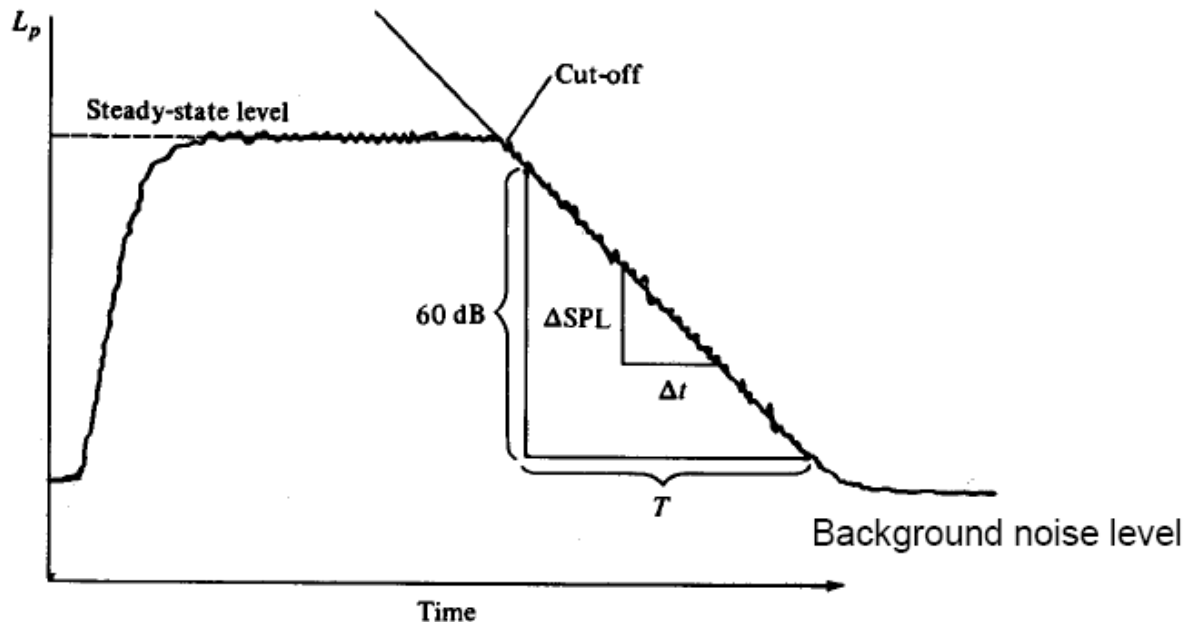
Utjecaj apsorpcije na vrijeme odjeka u prostori



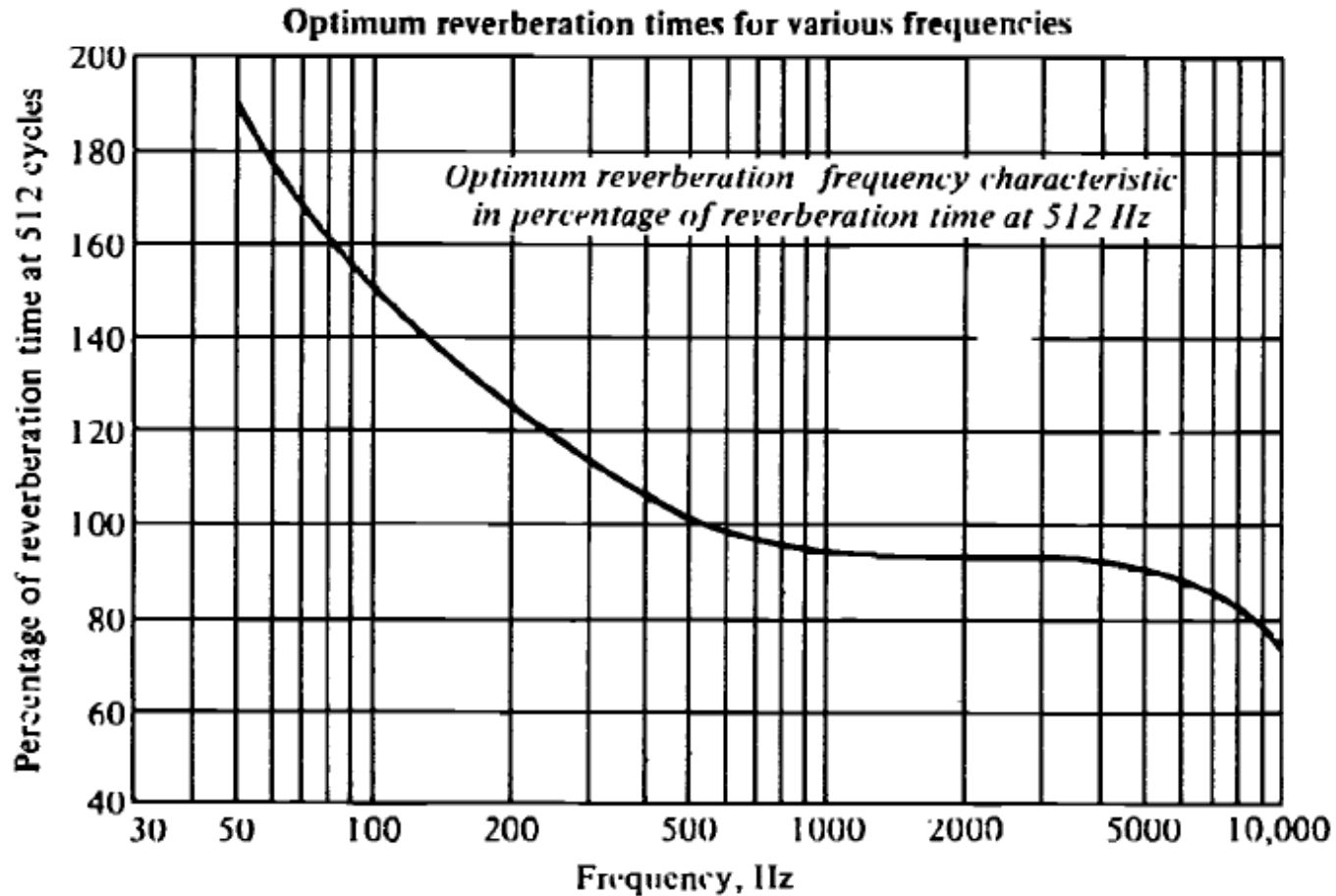
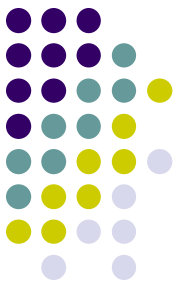
- Sabineova formula za vrijeme odjeka (T_{60})

- V – volumen prostorije
- A – ekviv. aps. površina
- S_i – površina i-te plohe
- α_i – koef. aps. i-te plohe

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i} = 0,161 \frac{V}{A}$$

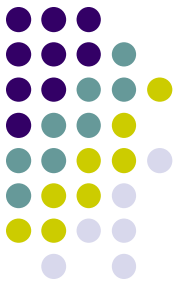


Odnos optimalnih vremena odjeka po frekvencijama



NR (Noise Reduction)

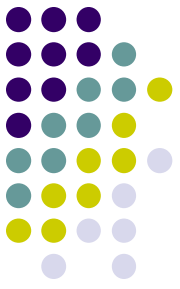
Smanjenje buke zbog aps.



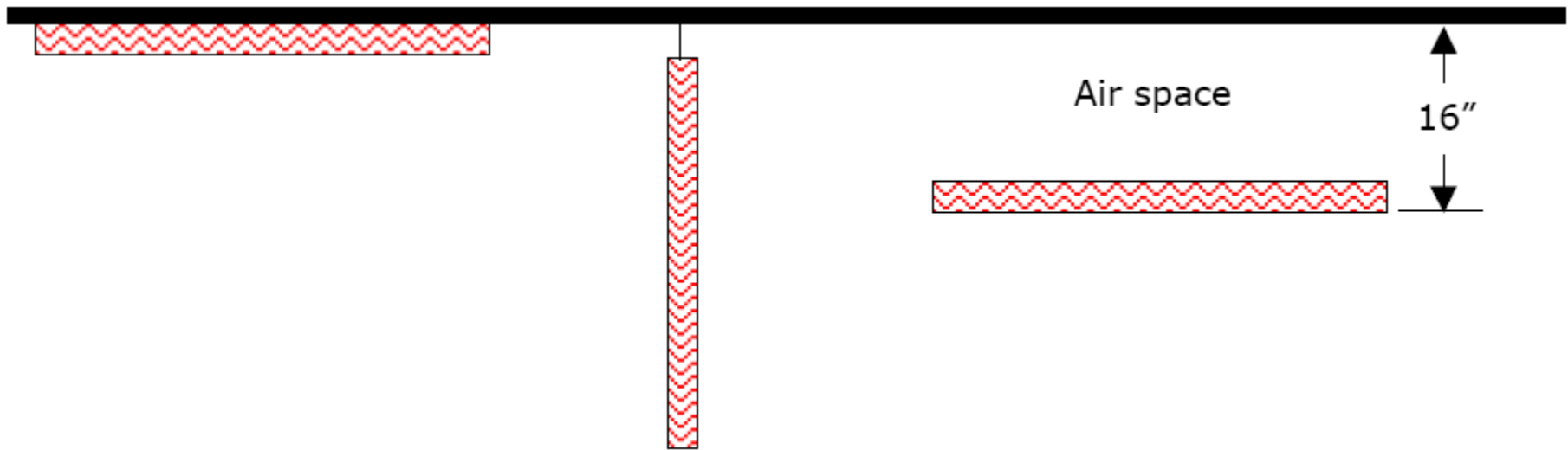
- za smanjenje buke unutar prostorije od 6 dB, potrebno je povećanje srednjeg koeficijenta apsorpcije 4 puta!

$$NR = L_{p1} - L_{p2} = 10 \log \frac{S_2 \overline{\alpha_2}}{S_1 \overline{\alpha_1}}$$

Efikasnost apsorbera u ovisnosti o položaju

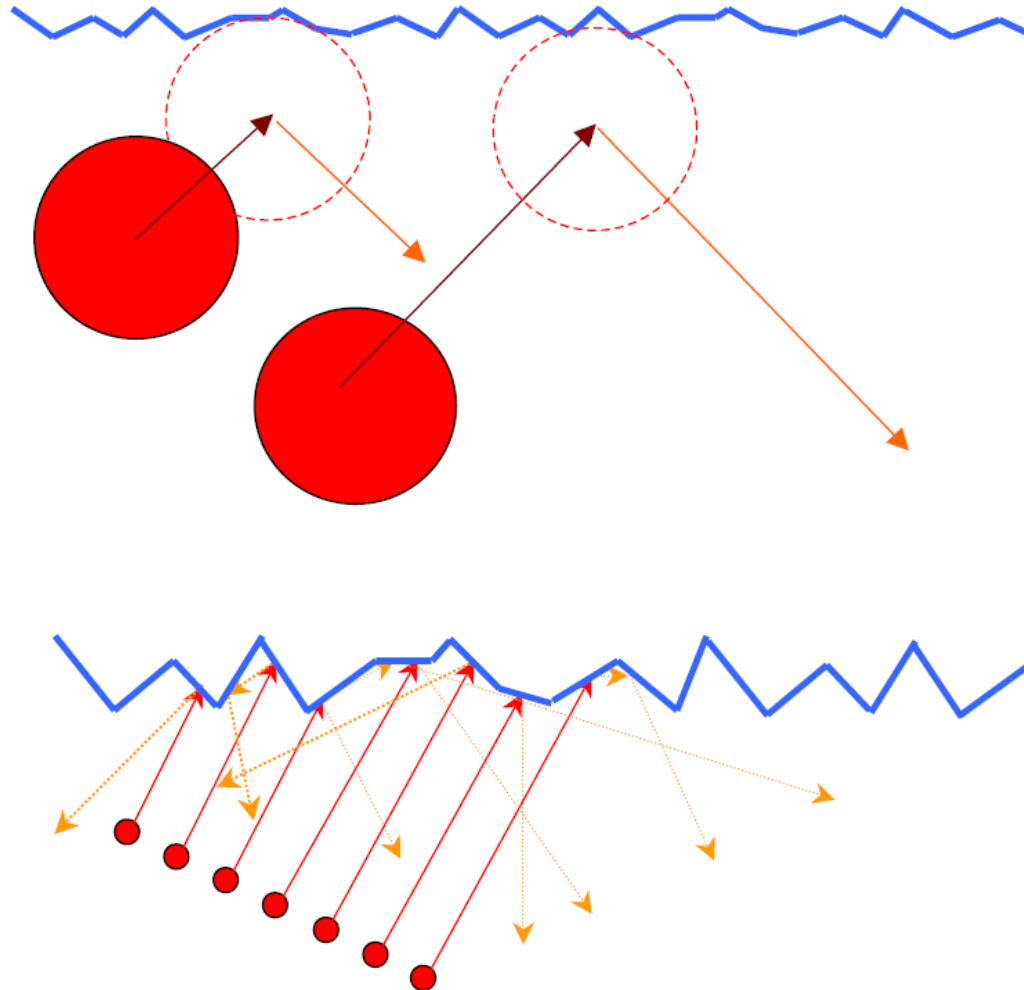
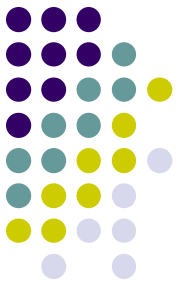


- apsorpcija u tablici u Sabinima



Mounting Configuration	Frequency - Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hanging baffle	4.3	6.6	9.8	13.3	13.6	10.8
Hard mounted on rigid wall (#4 mount)	1.5	3.5	6.2	7.4	6.5	6.2
16" air space (#7 mount)	7.2	6.4	6.0	7.2	6.2	3.6

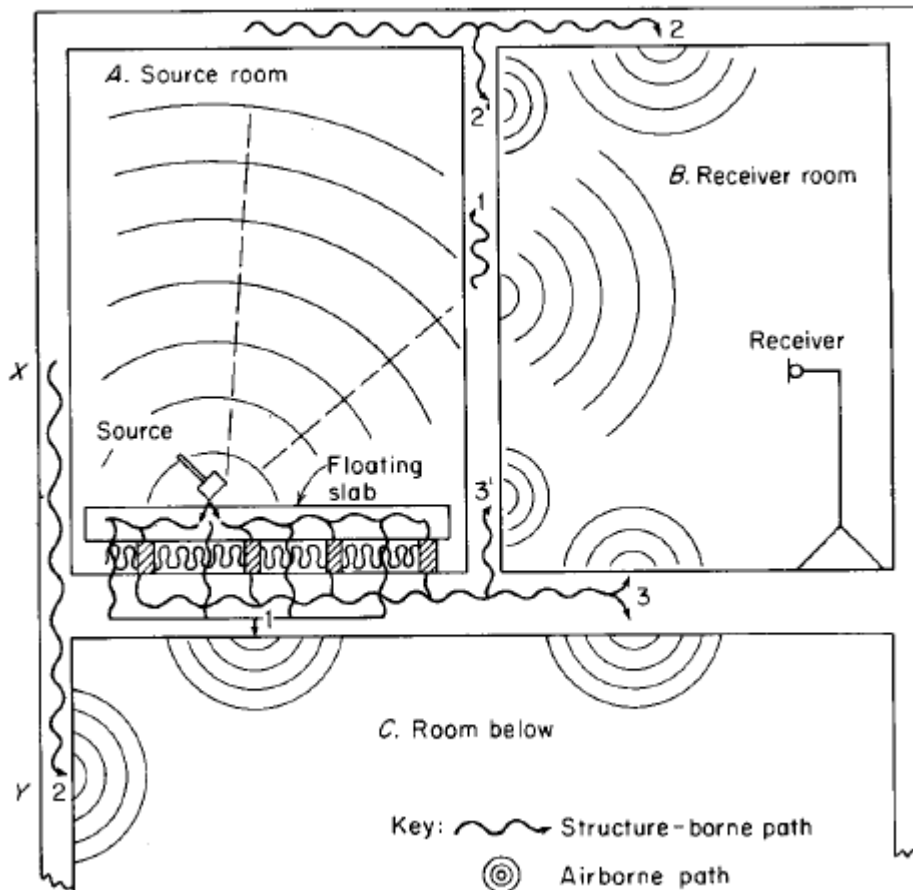
Ovisnost difuznosti o valnoj duljini i dimenziji difuzora

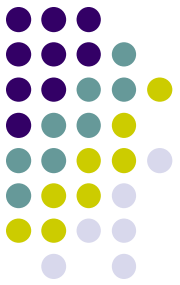


Transmisija (prolazak) zvuka kroz strukture



- strukturni i uzdužni zvuk



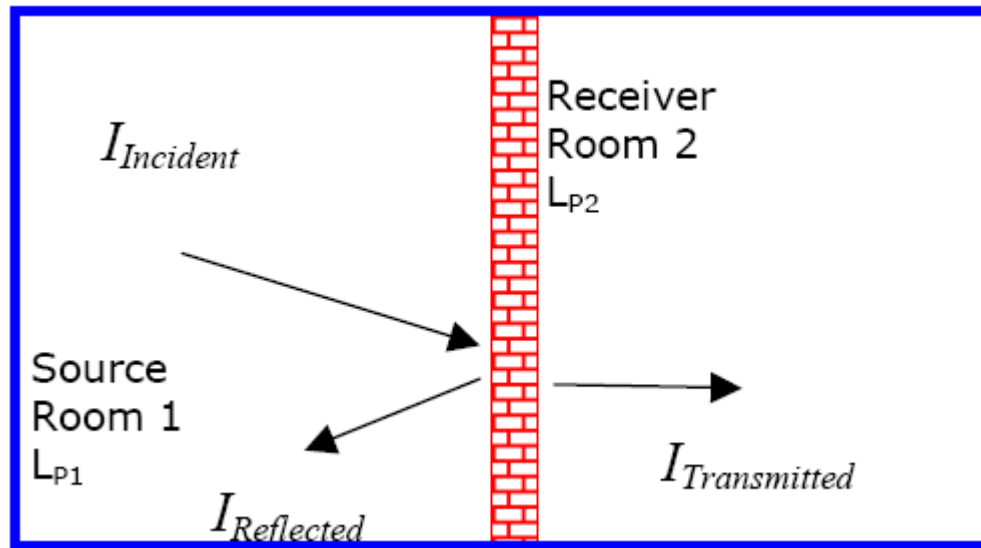


Prolaz zvuka

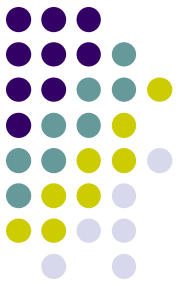
- koeficijent transmisije

$$\tau = \frac{I_{\text{prolazno}}}{I_{\text{upadno}}}$$

- τ je funkcija materijala, frekvencije i kuta upada



STL (Sound Transmission Loss)



- logaritamski odnos upadne i prolazne (transmitirane) energije:

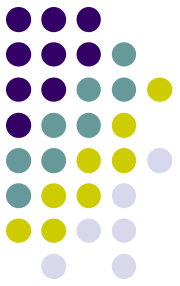
$$STL = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

- usporedba koeficijenata α i τ :

Material	Absorption α	Transmission τ
Concrete Cinder Block (painted)	.07 very low	.0001 (STL=40) high
2" Fiberglass	.90 high	~1.0 very low

Sound Reduction Index, R

Indeks zvučne izolacije



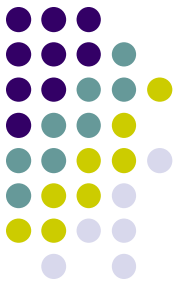
- normirana jedinica koja vrijedi u RH
- identično kao i STL

$$R = 10 \log \frac{W_I}{W_T}$$

- W_I – zvučna snaga koja upada na zid
 W_T – zvučna snaga koja prolazi kroz zid
 R – indeks zvučne izolacije, dB

NR (Noise Reduction)

Smanjenje buke zbog izolacije

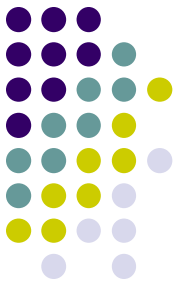


- smanjenje buke uslijed postavljanja neke prepreke između mjesta izvora buke i prijemnog mjesta:

$$NR = L_{p1} - L_{p2}$$

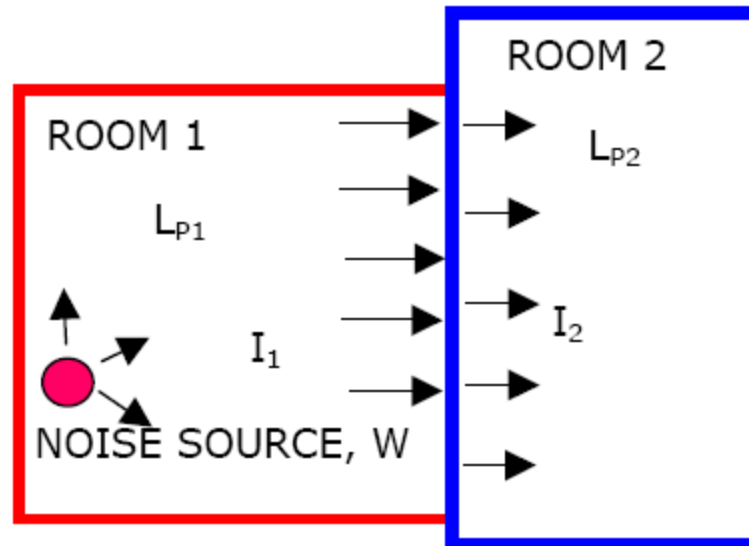
- tako se definira i IL (Insertion Loss) – promjena u razini s i bez barijere

Izračun STL za jednostavne zidove



- uvjet: u obje prostorije je difuzno zvučno polje, S_W je zajednička površina između obje prostorije, A_2 je ekvivalentna apsorpcijska površina

$$STL = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \frac{S_W}{A_2}$$

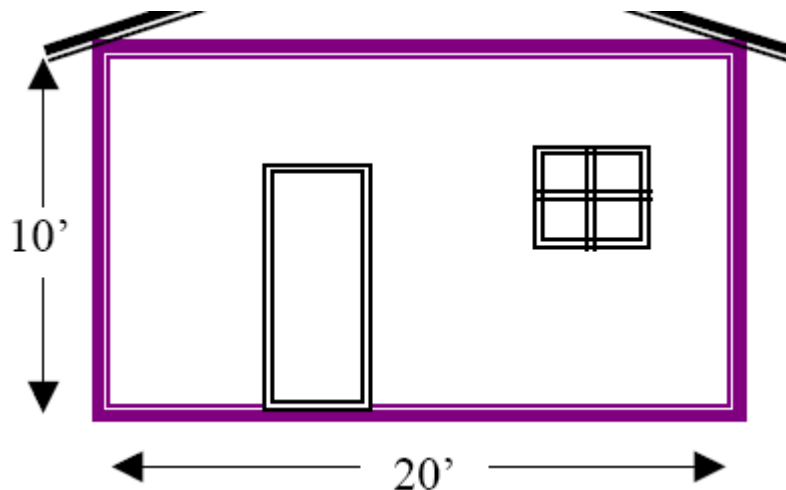


Izračun STL za kompozitne zidove



- zid koji se sastoji od više elemenata različitih koeficijenata transmisije:

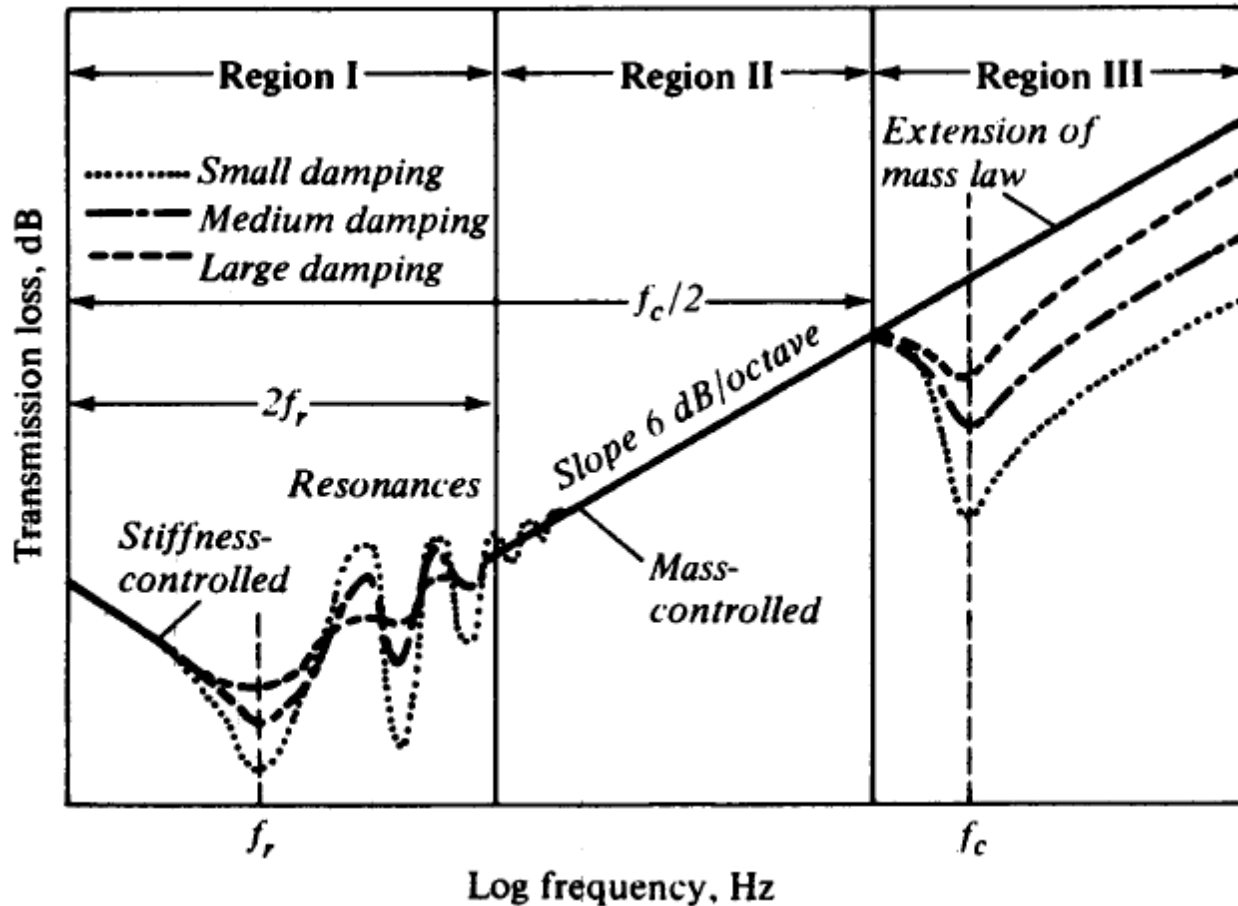
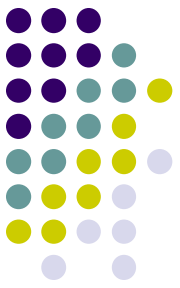
$$\tau_{kompozitni} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$



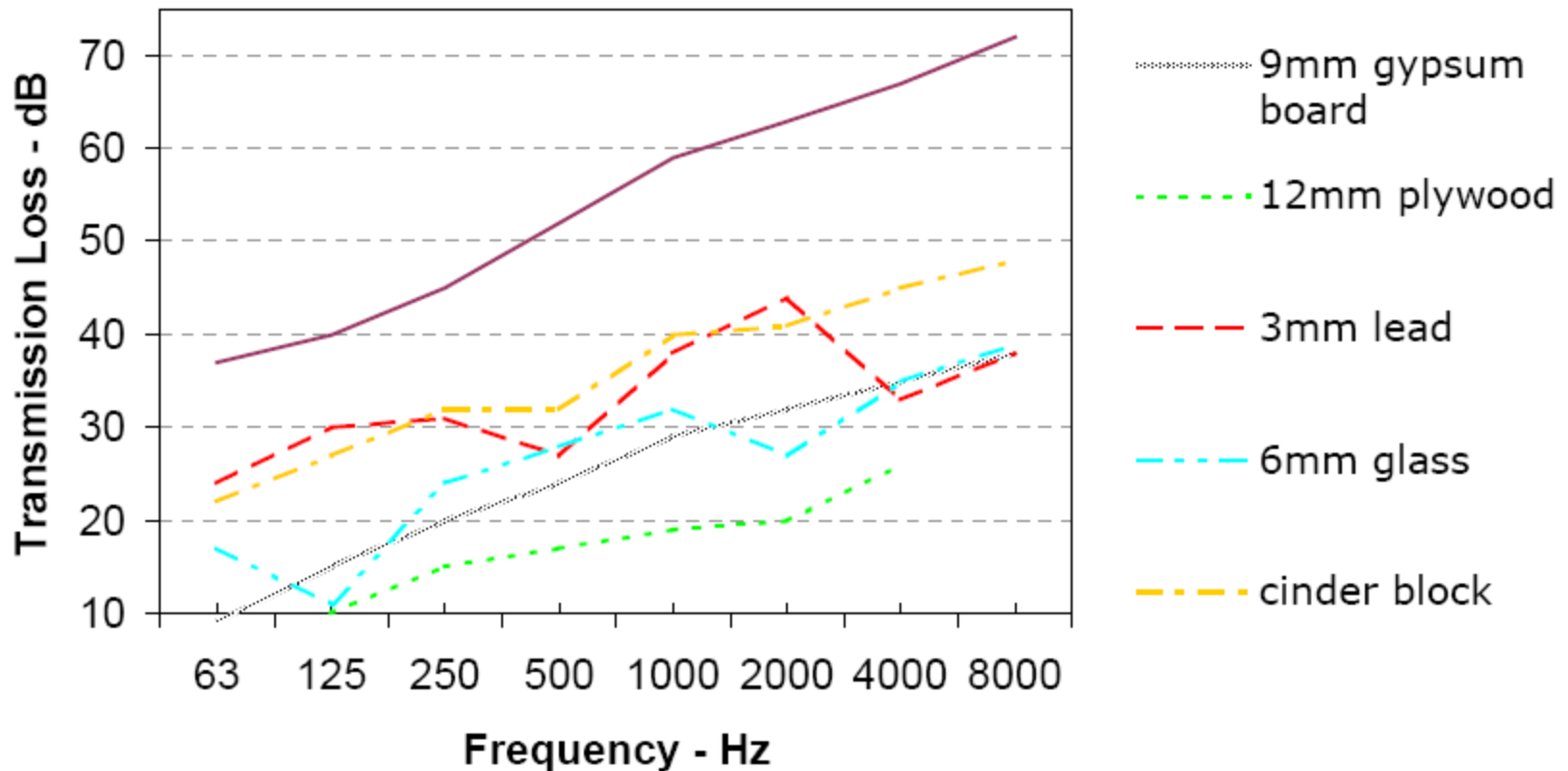
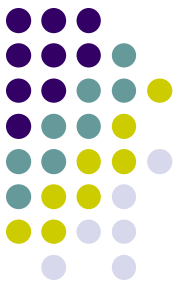
Surface	Area	STL	τ
Door	3' x 7' = 21 ft ²	20	.01
Window	2' x 4' = 8 ft ²	30	.001
Wall (8" concrete)	200-29 = 171 ft ²	50	.00001

STL = 29,6 dB

Teoretska vrijednost STL za beskonačnu homogenu ploču



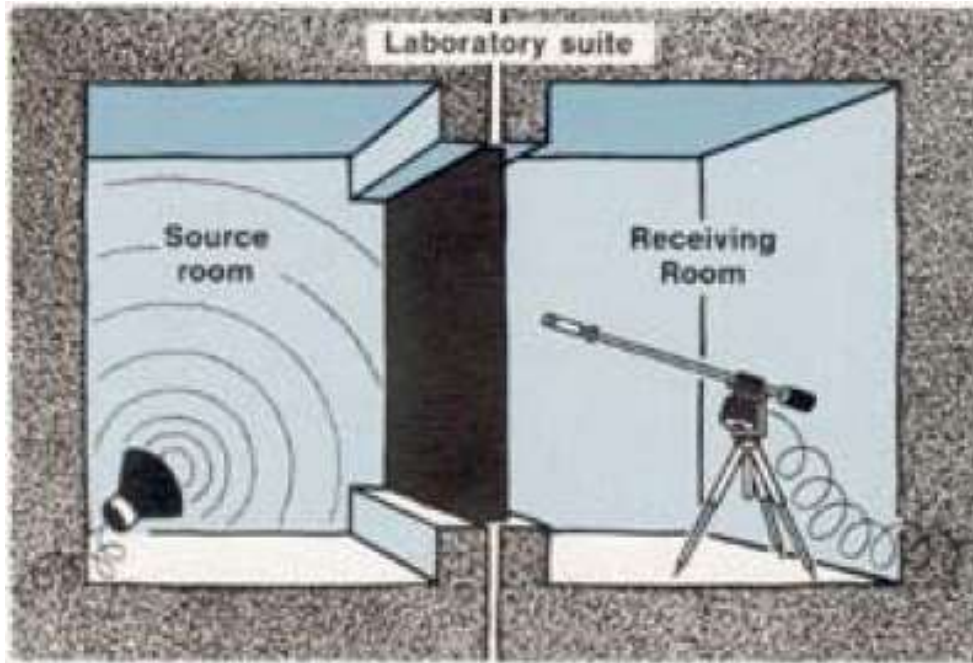
Primjeri STL za tipične građevinske materijale



Načini mjerenja indeksa zvučne izolacije



- laboratorijska mjerenja – posebne prostorije normiranih otvora, volumena i vremena odjeka



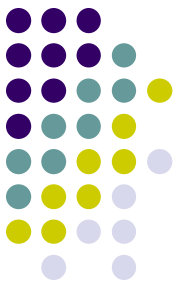
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

L_1 , L_2 – razina zvuka u odašiljačkoj i prijemnoj prostoriji

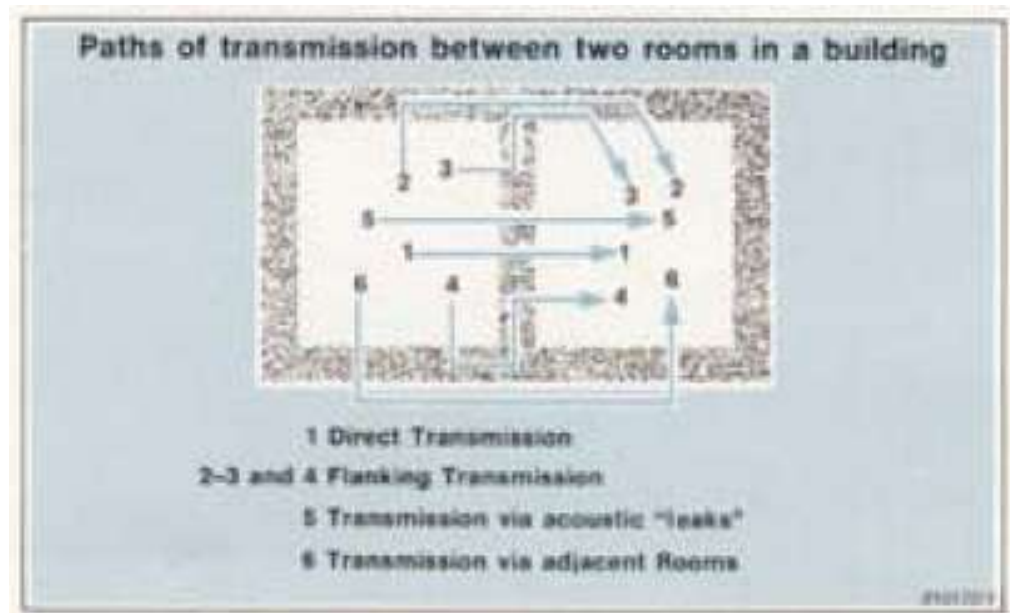
S – površina zajedničkog dijela

A – ekvivalentna apsorpcijska površina (prijemna prostorija)

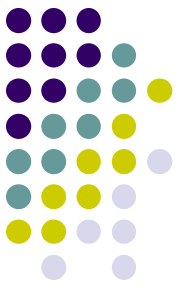
Načini mjerenja indeksa zvučne izolacije



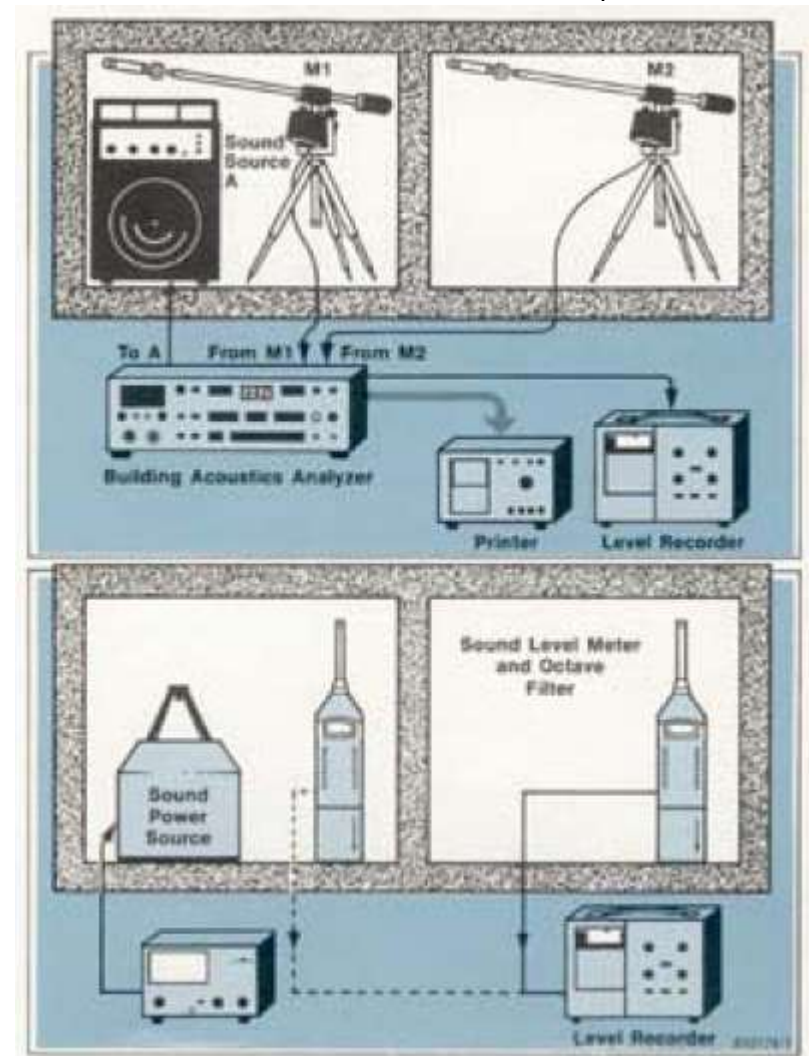
- terenska mjerenja – mnogo faktora doprinosi prijenosa zvuka iz jedne prostrije u drugu, posebice bočne plohe:
- vrijednosti zvučne izolacije R' niže nego kod lab.mj.



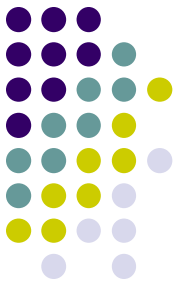
Mjerenje izolacije od uzdušnog zvuka



- odašiljačka prostorija: zvučnik i zvukomjer
- prijemna prostorija: zvukomjer, više točki



Mjerenje izolacije od zvuka udara

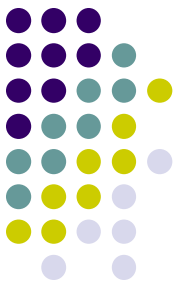


- zvuk udara – simulacija ljudskih koraka po podu prostorije (ili stubama); posebno zbog utjecaja vibracija na prijenos zvuka
- mjeri se normalizirana razina udarnog zvuka samo u prijemnoj prostoriji:

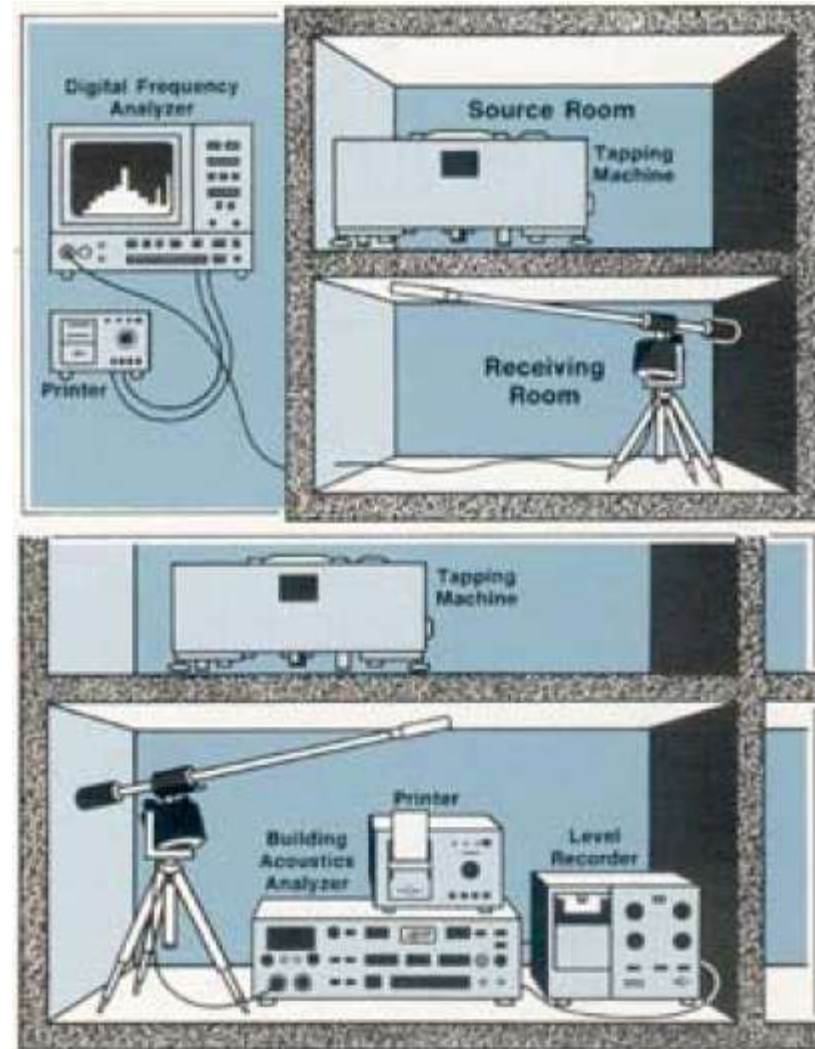
$$L'_n = L_I + 10 \log \frac{A}{10}$$

- L – razina zvuka udara (prijemna prostorija)
A – ekvivalentna apsorpcijska površina (prijemna prostorija)

Mjerenje izolacije od zvuka udara



- stroj za simulaciju zvuka udara (lupalica):
5 utega težine 0,5 kg koji padaju slobodnim padom iz visine 4 cm na površinu poda
frekvencijom 10 udara u sekundi



Primjeri mjerenja indeksa zvučne izolacije

