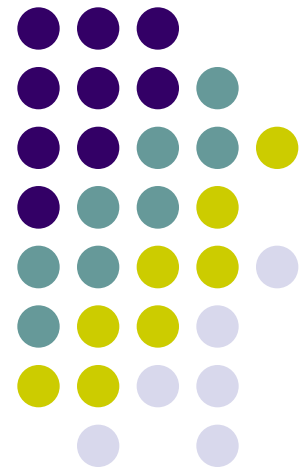


Akustika prostoriya

Direktni i reverberantni zvuk
Apsorpcija i reverberacija
Nivo zvuka u prostoriyi
Apsorberi, rezonatori, difuzori
Akustička obrada prostoriya

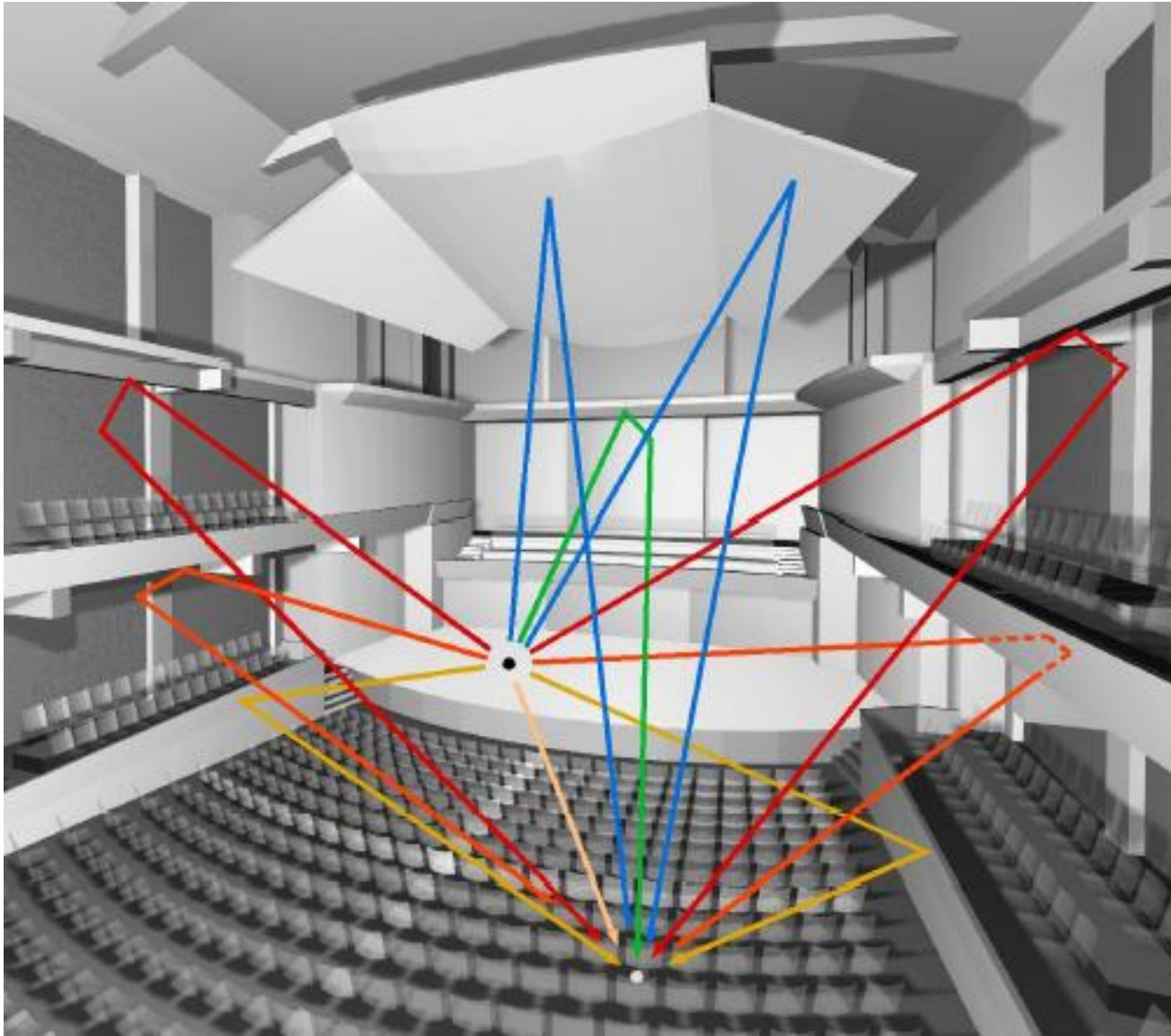
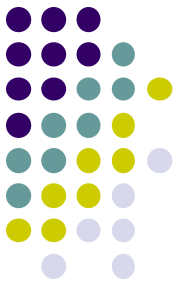




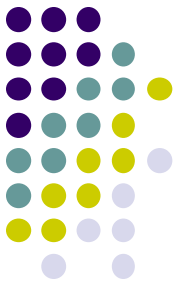
Zvuk u zatvorenom prostoru

- Pored direktnog postoji i reverberantni zvuk
 - u svaku tačku dospeva direktan zvuk pa refleksije
- **Direktan zvuk**
 - stiže prvi – merodavan za utisak o pravcu izvora
 - **dominira samo u neposrednoj blizini izvora**
- **Reverberantni zvuk**
 - sačinjen od niza refleksija
 - prvo pojedinačne, a onda sa svih strana i sve slabije
 - **ima dominantan nivo u većem delu prostorije**
- Poželjno je homogeno difuzno zvučno polje

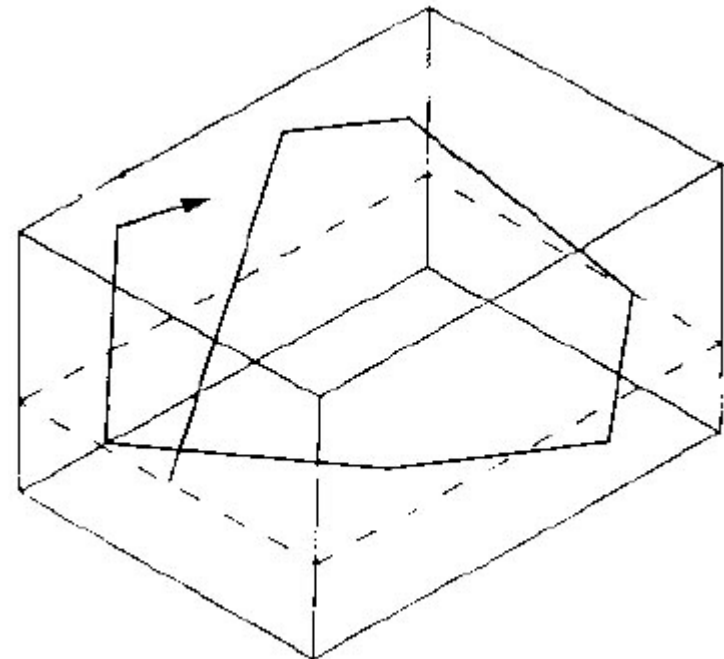
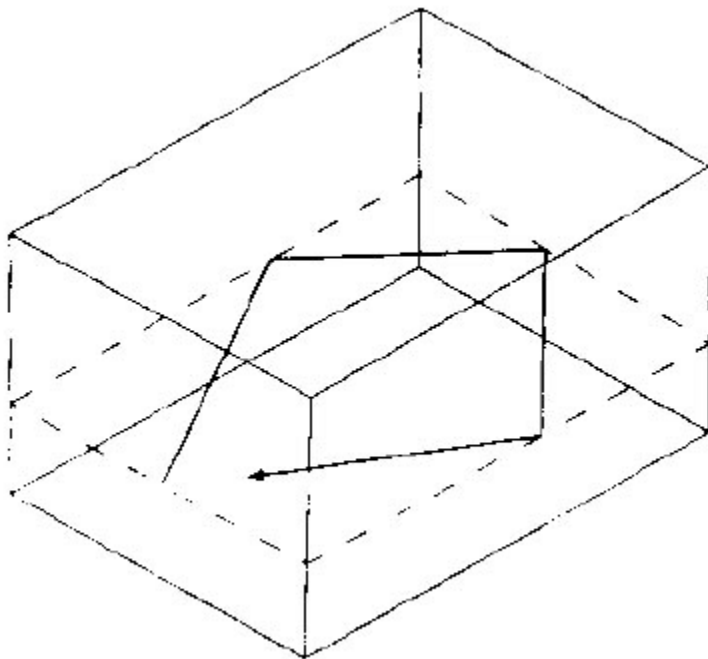
Direktni zvuk i prve refleksije



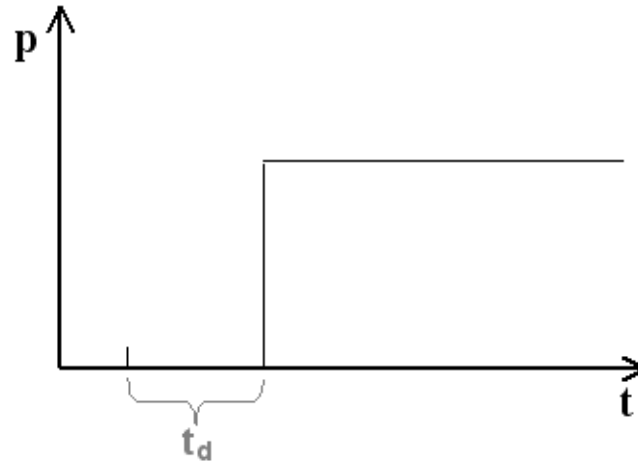
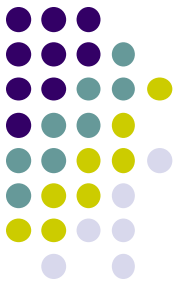
Refleksije zvučnog zraka u prostoru



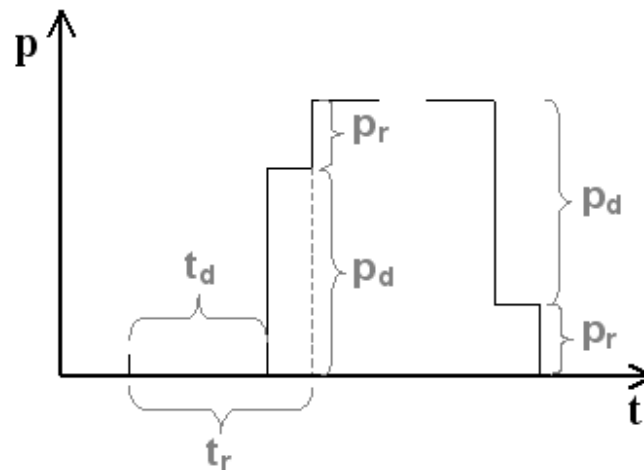
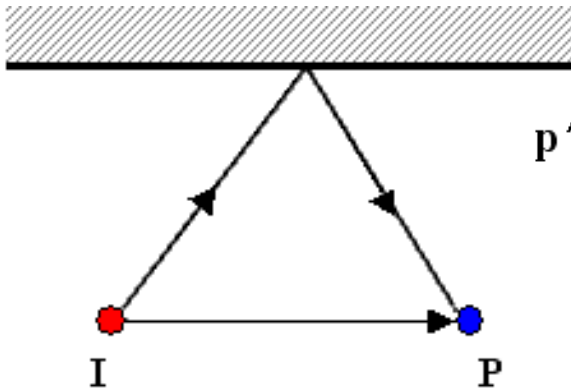
- Zvučni zraci
 - zamišljeni pravci normalni na talasni front
 - dolaze iz izvora zvuka



Vremenski prikaz zvučne energije

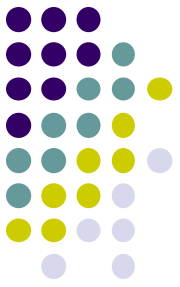


- Direktni zvučni talas

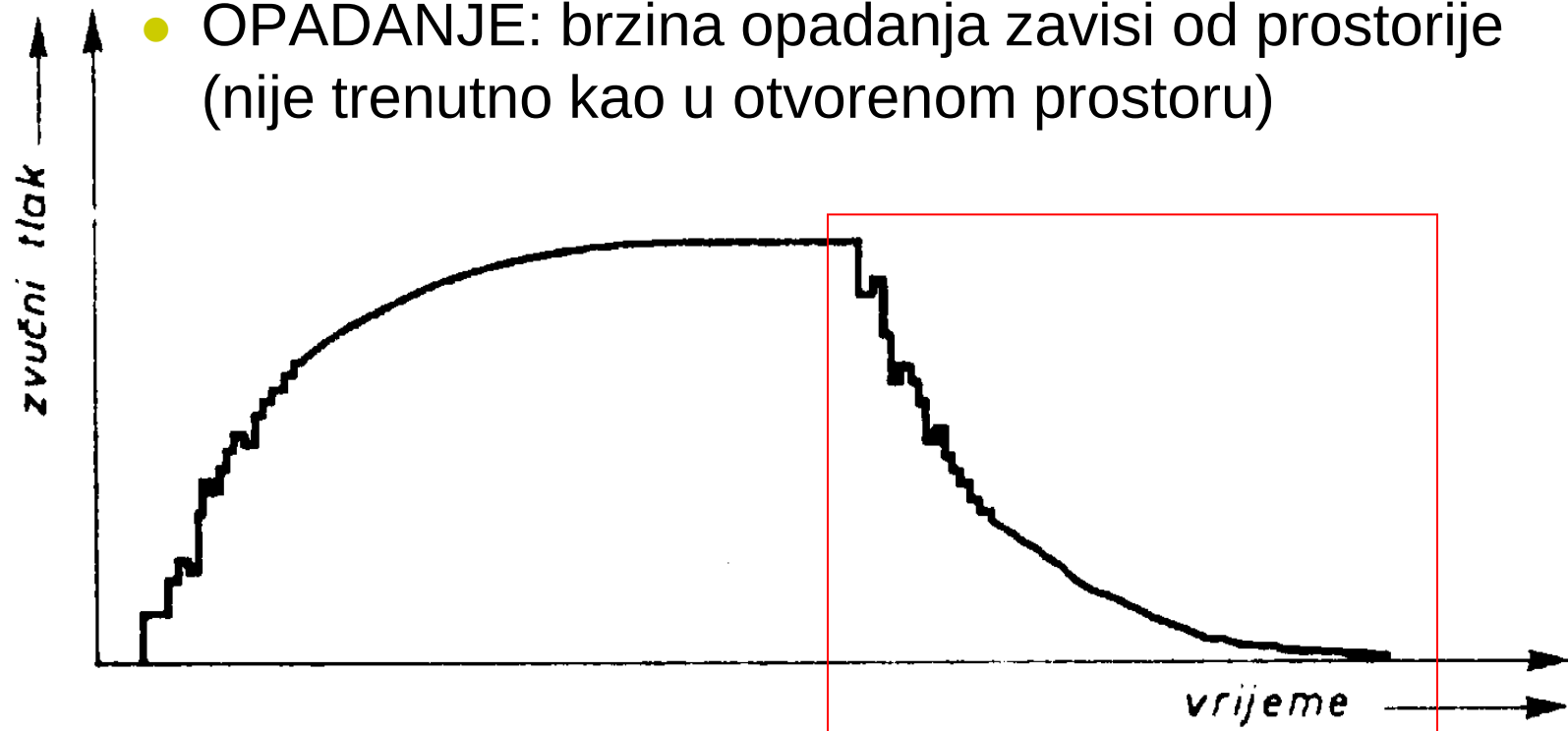


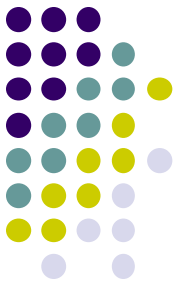
- Direktni (d) i reflektovani (r) zvučni talas

Eksponencijalni rast i opadanje zvučne energije



- Na direktni zvuk dodaje se sve više refleksija
 - raste akustička energija i sve više se apsorbuje
 - RAVNOTEŽA: emitovana = apsorbovanoj zv. energiji
 - OPADANJE: brzina opadanja zavisi od prostorije (nije trenutno kao u otvorenom prostoru)





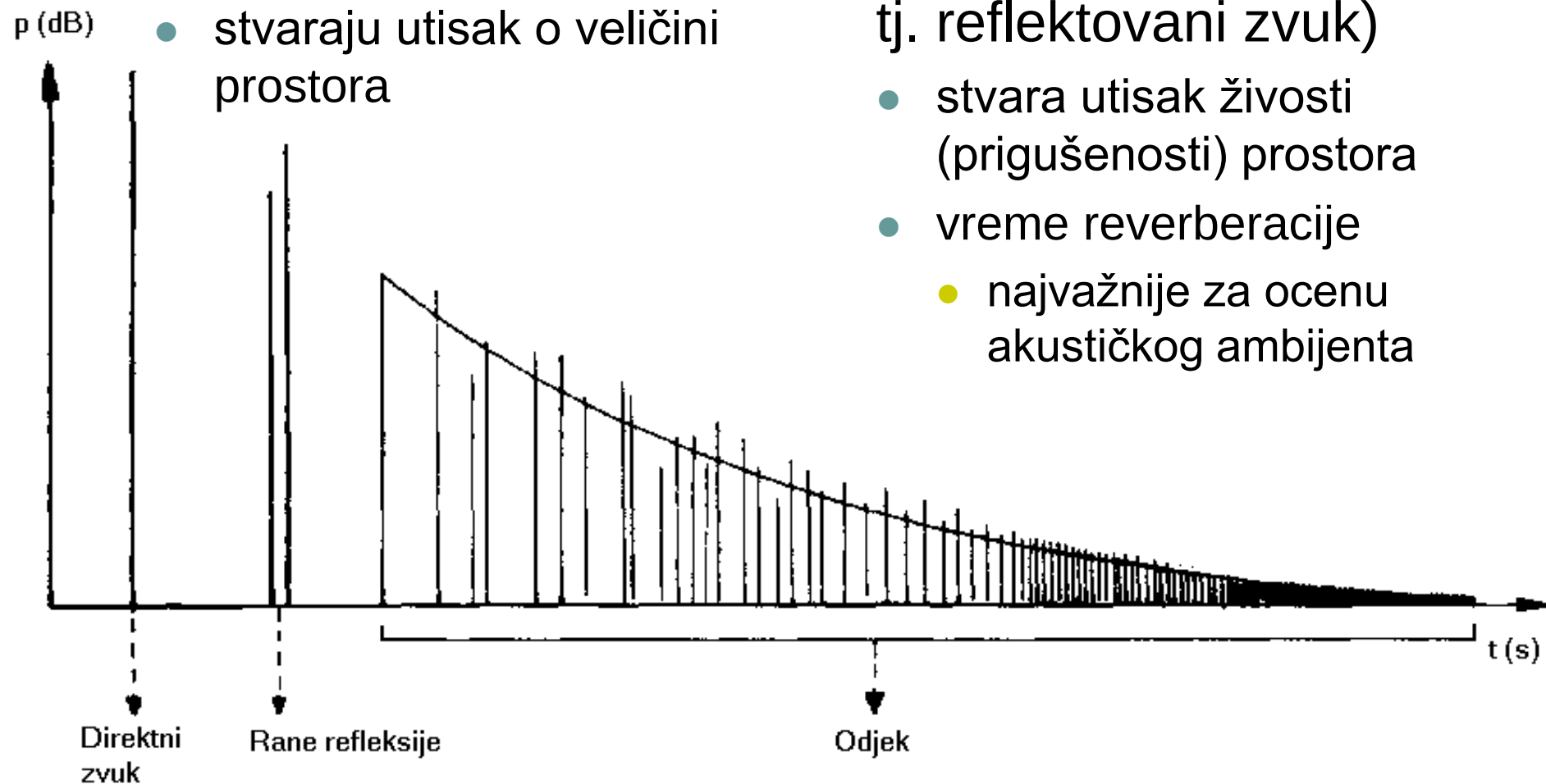
Impulsni odziv prostoriije

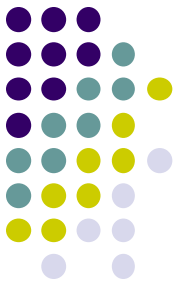
- Rane refleksije

- stvaraju utisak o veličini prostora

- Reverberacija (odjek, tj. reflektovani zvuk)

- stvara utisak živosti (prigušenosti) prostora
- vreme reverberacije
 - najvažnije za ocenu akustičkog ambijenta

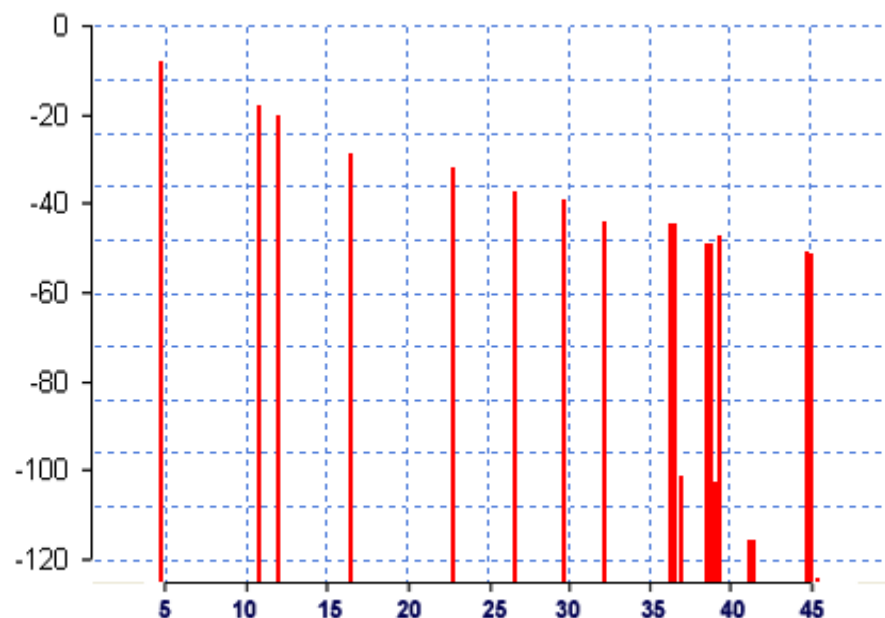
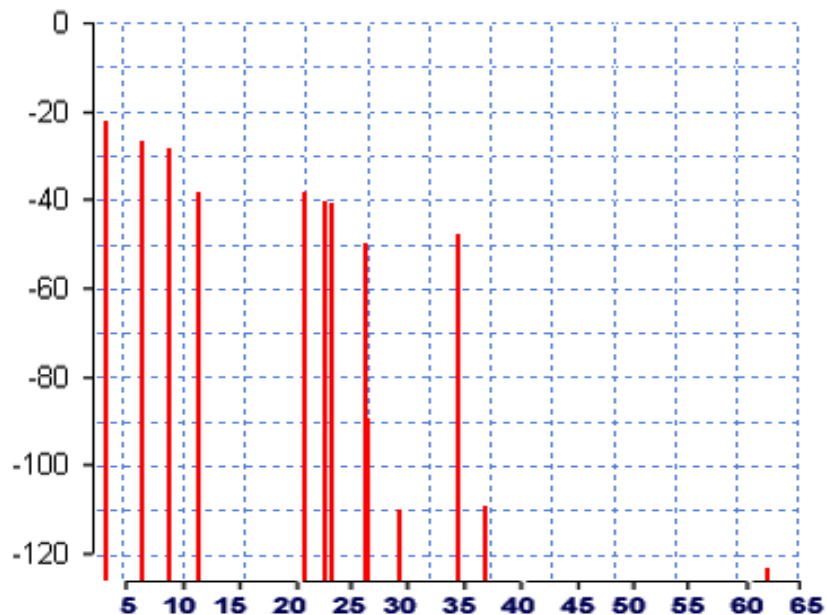
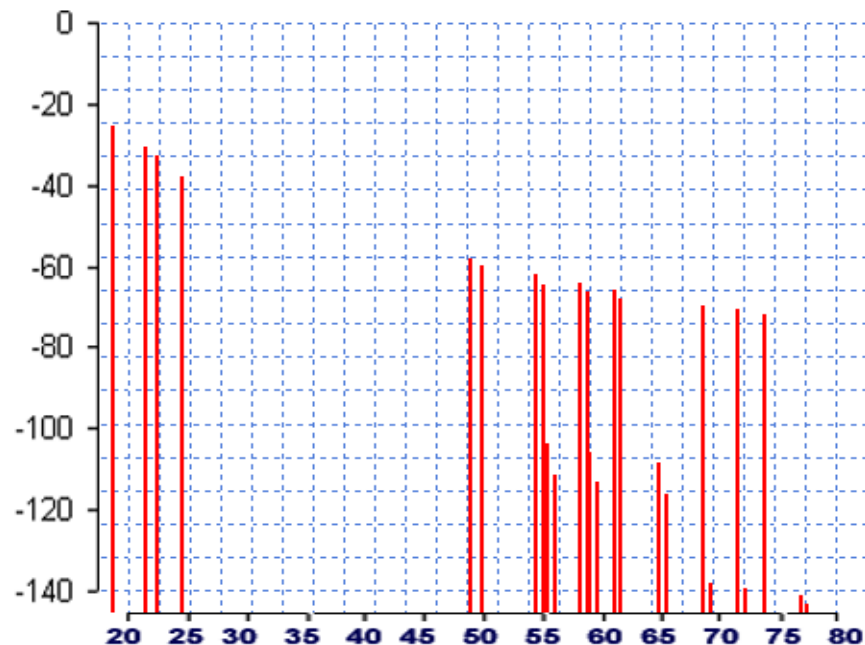




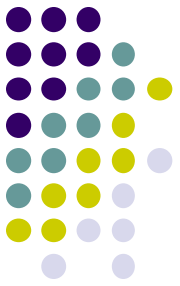
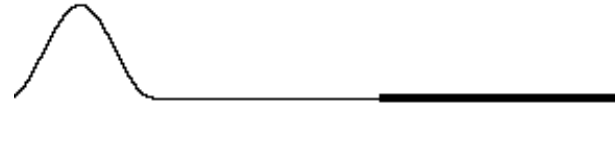
Reverberacija (odjek)

- Uho ne čuje posebno refleksije unutar 20-tak ms
 - ali pravilno uočava pravac na osnovu direktnog zvuka
- Istaknute refleksije u drugom delu odjeka čuju se kao jeka
 - poželjno je postići linearan pad (u dB) zvuka u prostoru
- Kod akustički spojenih prostorija
 - dominira akustička slika prostorije s dužim odjekom
 - npr. studio-režija

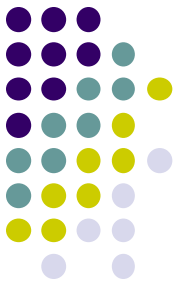
Primeri impulsnih odziva



Apsorpcija zvuka



- Pri prostiranju kroz neku sredinu zvuk slabi
 - Kad zvučni talas udari u neku prepreku
 - jedan deo zvučne energije se reflektuje
 - a ostatak se apsorbuje
- $$J_d = J_r + J_a$$
- Veći deo apsorbovane energije pretvara se u toplotu
 - prvo se pretvori u drugi oblik energije i onda u toplotu
 - Uloga apsorpcionih materijala
 - postizanje željene apsorpcije u prostoriji
 - kontrola raspodele zvučne energije



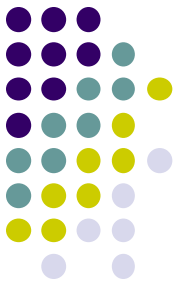
Koeficijent apsorpcije (α)

- α je svojstvo materijala
 - odnos apsorbovane i upadne (direktne) zvučne energije
 - veza sa koeficijentom refleksije (r)
 - zavisi i od frekvencije
- Koeficijent α je važan pri izboru materijala
 - za određenu svrhu pri projektovanju prostorija
 - skraćivanje vremena reverberacije
 - prigušenje buke itd.

$$J_d = J_r + J_\alpha$$

$$1 = \frac{J_r}{J_d} + \frac{J_\alpha}{J_d}$$

$$1 = r + \alpha$$



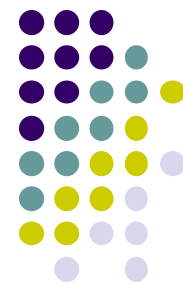
Apsorpcija prostorije

- Svi materijali u prostoriji doprinose
 - srazmerno izloženoj površini
 - srazmerno svom koeficijentu apsorpcije
- Apsorpcija prostorije (bez prisustva ljudi):

$$A_0 = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_N S_N \quad [m^2]$$

- jedinica ekvivalent 1m² otvorenog prozora ($\alpha_i=1$)
- Apsorpcija čoveka: $A_c = 0,5 \text{ m}^2$ – prosečno
- Ukupna apsorpcija prostorije: $A = A_0 + n \cdot A_c$

Intenzitet direktnog i reverberantnog zvuka



- Direktni zvuk

- intenzitet opada sa kvadratom rastojanja

$$J_r = \frac{P_a}{4\pi \cdot r^2}$$

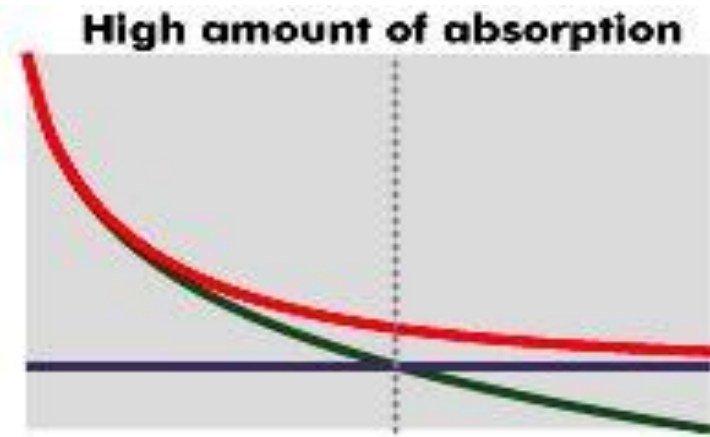
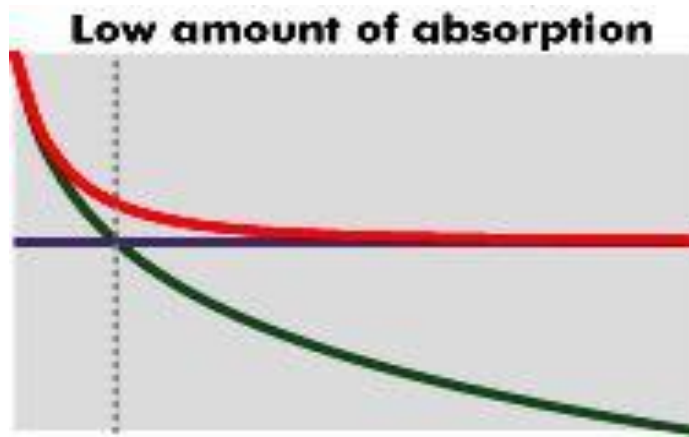
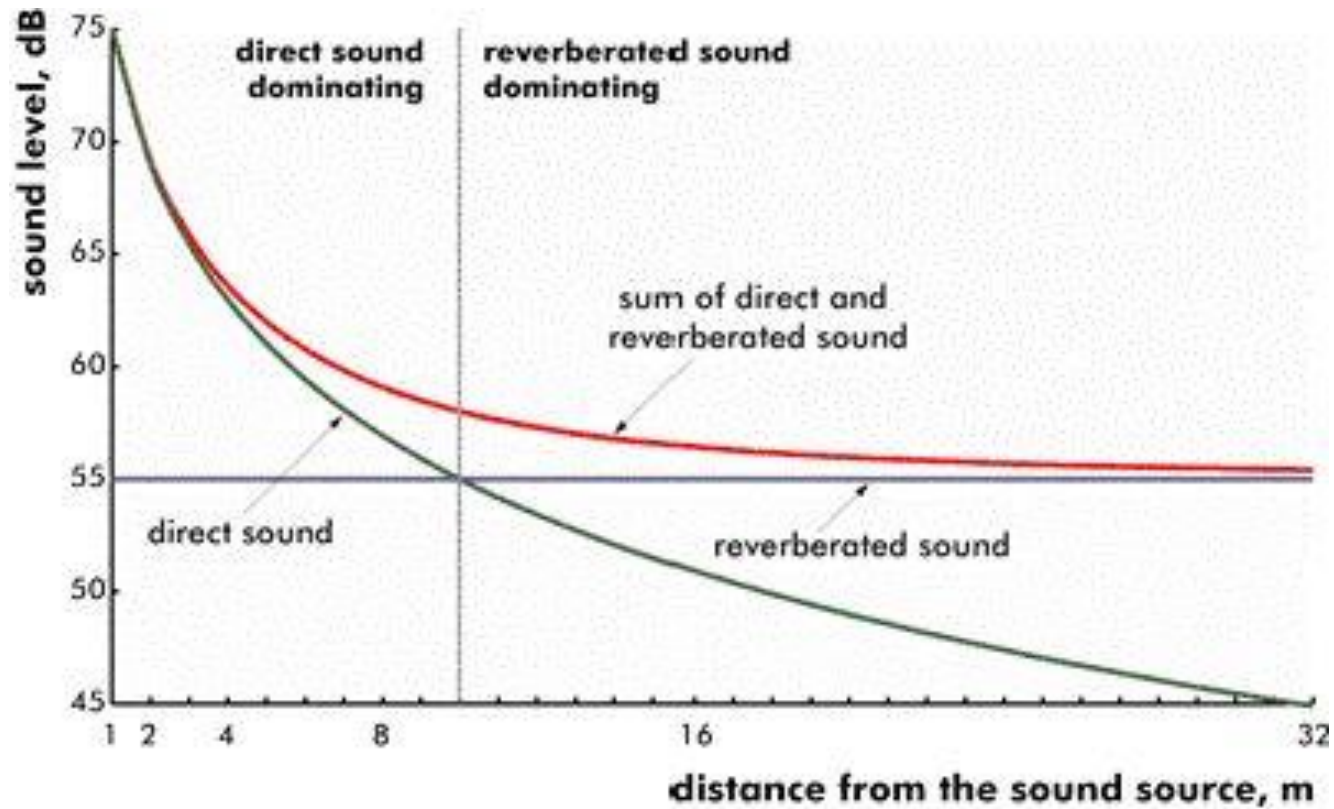
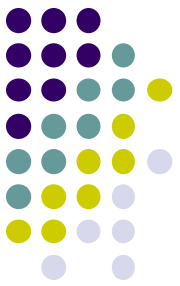
- (važi za slobodno prostiranje zvuka)

- Reverberantni zvuk

- intenzitet pri ravnoteži emitovane i apsorbovane zvučne energije

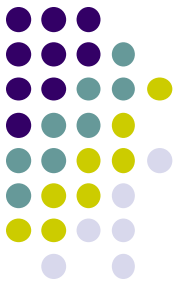
$$J_{\max} = \frac{4 \cdot P_a}{A}$$

- P_a - akustička snaga
- A - apsorpcija prostorije
- (važi za homogeno difuzno zvučno polje)



Radijus dvorane

$$r_h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

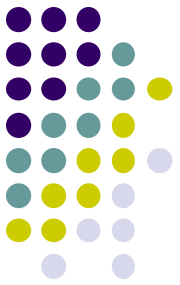


- Opisuje zonu gde dominira direktni zvuk
 - udaljenost od izvora na kojoj su oba polja jednaka P_d i P_r
 - ne zavisi od snage izvora
 - zavisi od apsorpcije (primenjene ak. obrade)
 - povećava se sa povećanjem apsorpcije
 - zavisi još i od usmerenosti zvučnog izvora
- Važan podatak jer se u toj zoni mora nalaziti mikrofonsn da bi snimio taj izvor zvuka
 - mikrofonsn treba da pretvara direktan zvučni signal u električni
 - odnosi D/R i D/B su presudni za kvalitet snimka
 - zavise od blizine mikrofona do izvora zvuka

Vreme reverberacije

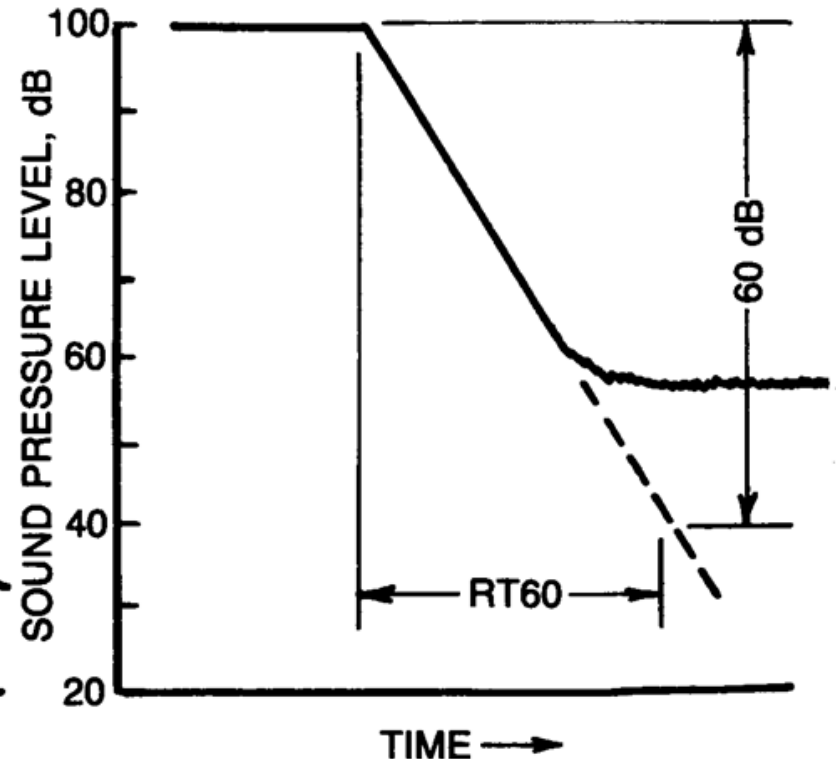
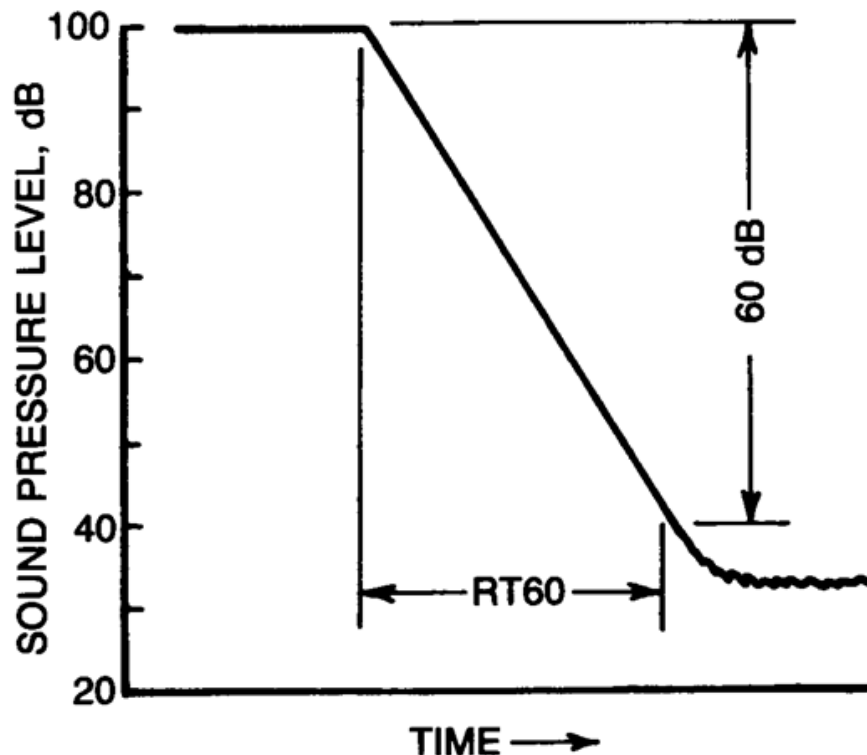


Sabinov
obrazac

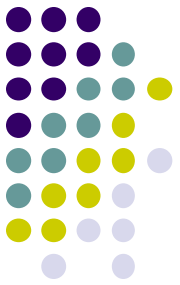


Vreme reverberacije RT_{60}

- Vreme potrebno da se zvuk utiša za 60 dB
 - po prestanku rada izvora zvuka



Definicija vremena reverberacije



- **Sabine:**

- za “ječne” prostorije

$$RT_{60} \cong \frac{0,163 \cdot V}{A}$$

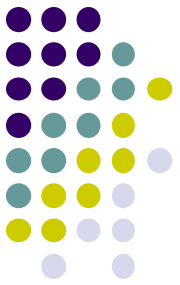
- srednji koeficijent apsorpcije $\alpha < 0,2$
- više refleksija

$$J_{\max} = \frac{4 \cdot P_a}{A} = \frac{25 \cdot P_a \cdot RT_{60}}{V}$$

- **Eyring:**

- dopuna Sabinovog obrasca
- **važi za veće prostorije i sa većim α**
- računa i apsorpciju u vazduhu zavisno od
 - vlažnosti vazduha
 - frekvencije zvuka

$$RT_{60} = \frac{0,163 \cdot V}{A + 4mV}$$



Poželjno vreme reverberacije

- 0,2-0,3s: govor (studio)
 - mala zapremina i velika apsorpcija da ne bi jeka smanjila razumljivost
- 0,6-0,7s: snimanje muzike
 - da bi se pojedini instrumenti snimili u posebne kanale
 - manje od koncertnih sala, pa se posle dodaje reverberacija
- 0,7-0,8s: govor (slušaonice)
 - učionice, kongresne sale, ...

(ovo je sve na 1kHz)
- 1-1,2s: govor i muzika
 - bioskop, pozorište, dom kulture
- 1,7-2s: muzičke dvorane
 - zavisi od vrste muzike:
 - horska
 - klavir (ne sme veliko RT)
 - prave se posebne sale za simfonijsku, koncertnu i drugu muziku
- 2,5-5 ili 6s: crkve, muzeji
 - Narodni muzej – 6s
 - Notr Dam u Prizu i Sveti Petar u Rimu imaju $RT = 10s$

Objekti velikog vremena reverberacije (10 s)

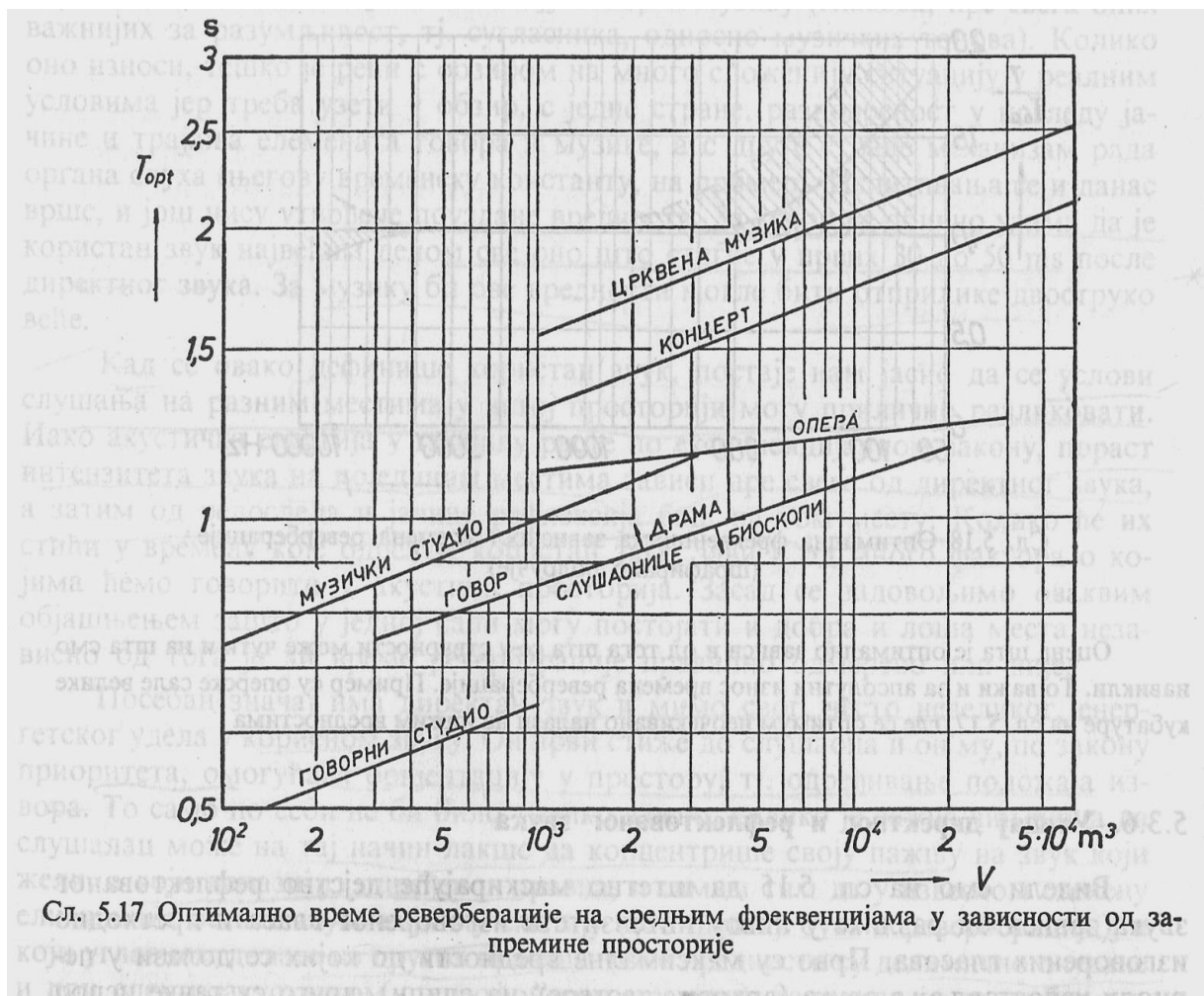
Katedrala Notr Dam, Pariz



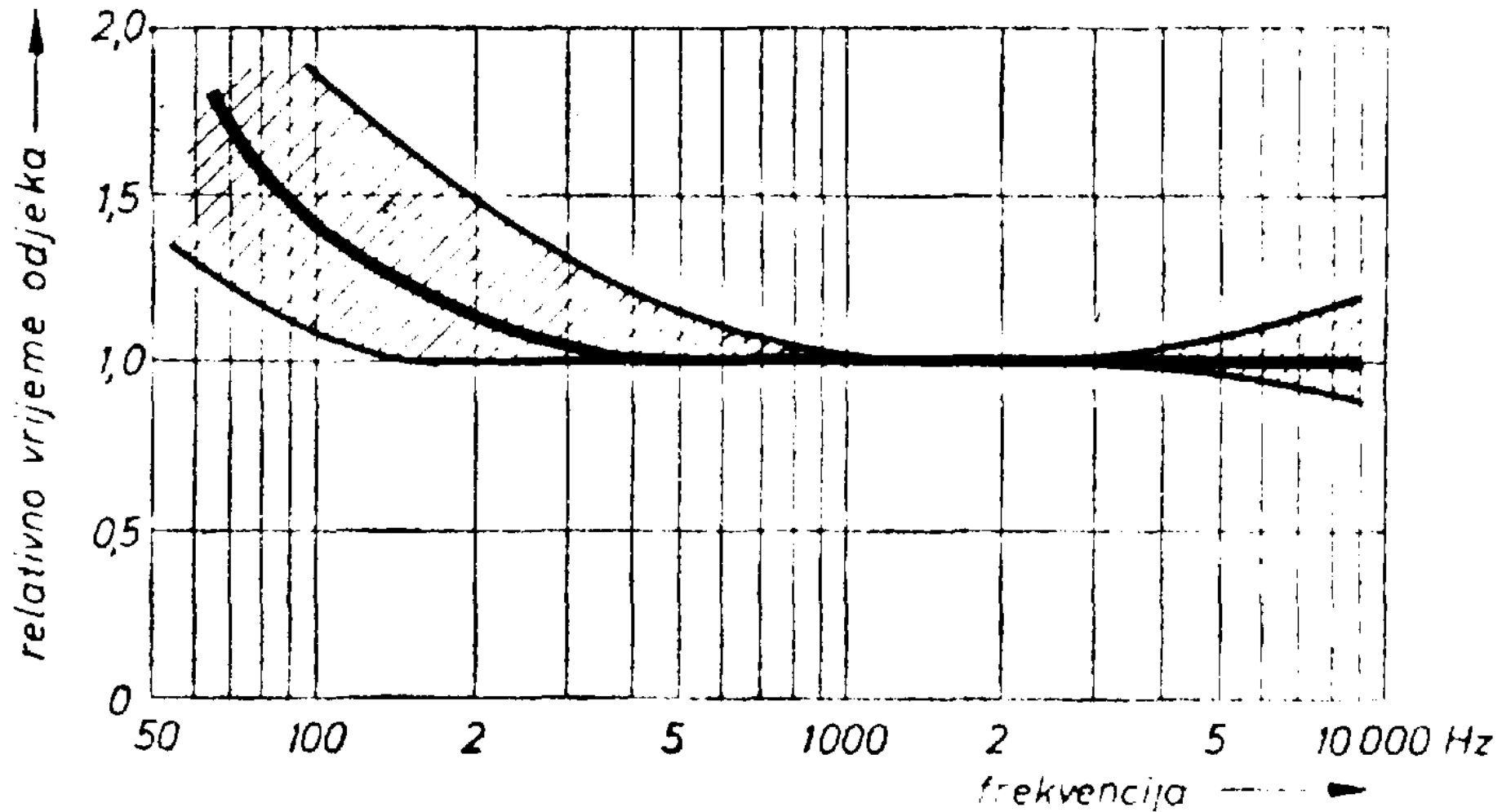
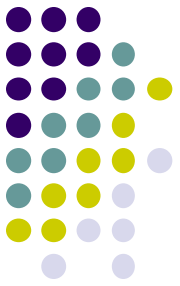
Crkva Svetog Petra



Optimalno vreme reverberacije



Zavisnost RT_{60} od frekvencije



Rezime o vremenu reverberacije



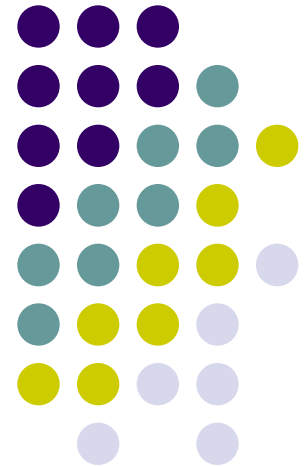
- Jedna brojna vrednost za celu prostoriju
- Važna za ocenu akustičkog ambijenta
 - brzina opadanja zvuka bitna za subjektivnu ocenu
- Sa istom akustičkom snagom postiže se veći nivo zvuka ako je veće RT_{60}
 - sporije iščezava emitovani zvuk
- Ne važi izraz u suviše malim prostorijama
 - jer veliki deo prostorije ima ivične efekte
- Nekad se meri manje opadanje (npr. 30 dB)
 - pa se ekstrapolira vreme za pad od 60 dB

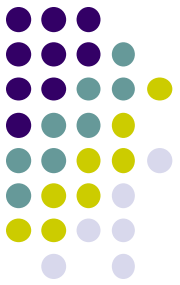
Ocena akustičkog ambijenta

Uslovi za dobru akustiku

Uticaj zapremine i oblika prostorije

Uticaj apsorpcije





Uslovi za dobru akustiku

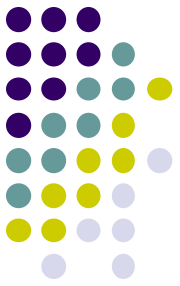
- U prostoriji **ne sme biti buke**
 - ni unutrašnje, ni spoljašnje
- Na svim mestima **zvuk mora biti dovoljno glasan**
 - nivo zvuka mora biti približno jednak (homogeno zv. polje)
- U prostoriji ne smeju nastati neželjene rezonancije
 - izbegavaju se paralelni naspramni zidovi
- U području slušanja ne sme biti odjeka ni *flater*-eha
- **Reverberacija** mora biti dovoljno mala
 - da bi se izbegla preklapanja uzastopnih zvukova
 - to bi narušilo razumljivost govora
 - u muzici je poželjna, ali ne sme biti prevelika

Odrednice akustičkog ambijenta

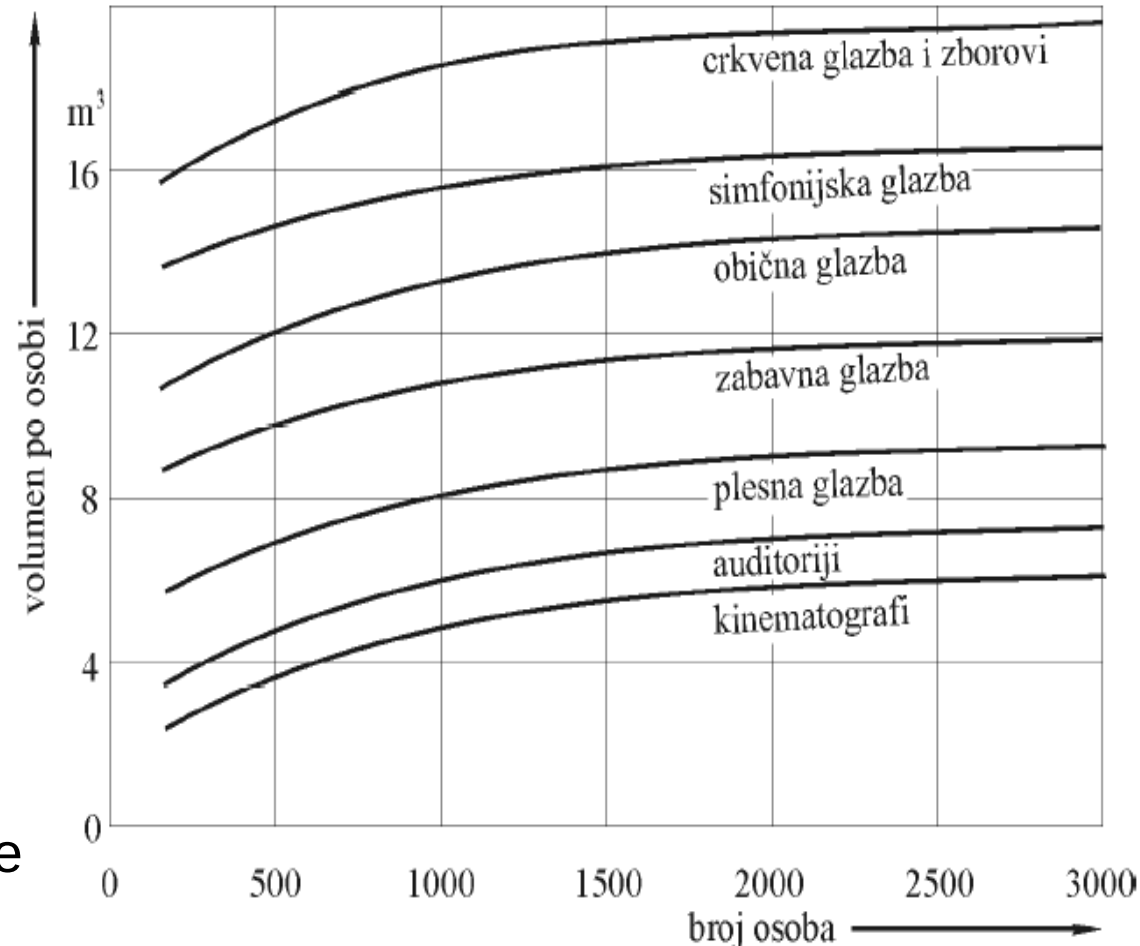


1. Zapremina
2. Oblik
3. Reverberacija
 - zavisi od:
 - **zapremine,**
 - **oblika i**
 - **apsorpcije (primenjene akustičke obrade)**
 - Tri međusobno nezavisna činioca
 - može se reći da ova tri činioca određuju akustičke osobine prostora!

Optimalan volumen (po osobi)



- Koncertne dvorane
 - 6-18 m³ po sedištu
- Opera
 - 4-7 m³ po sedištu
- Bioskopske sale
 - 3-4 m³ po sedištu
- Za govor
 - 3-4,5 m³ po sedištu
 - pozorište
 - konferencijske sale
 - učionice

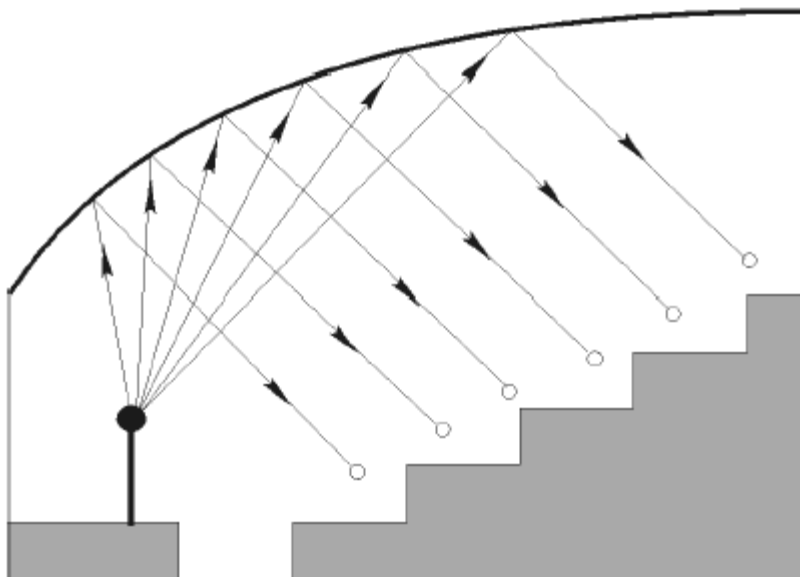


Oblik prostorije



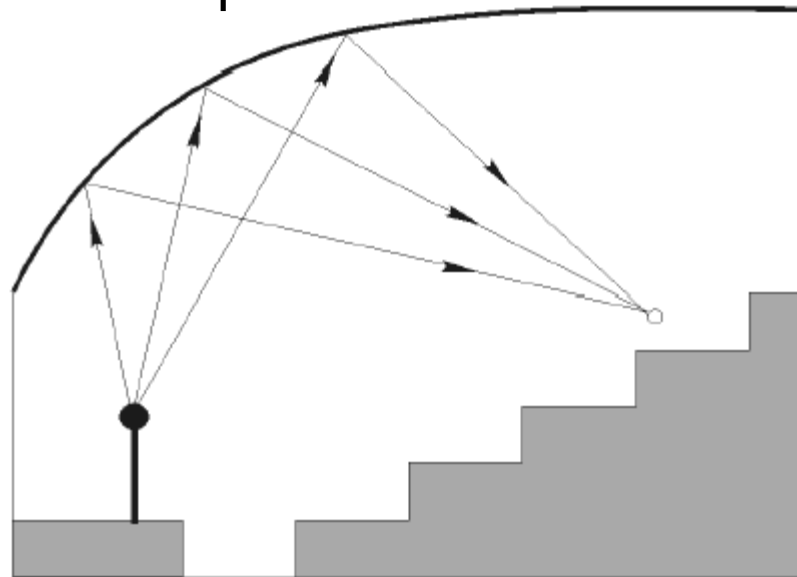
- Povoljni oblici

- bolje duža nego šira
- dobri su lepezasti oblici
- konveksna zakrivljenja
- reflektori zvuka iznad i iza izvora zvuka

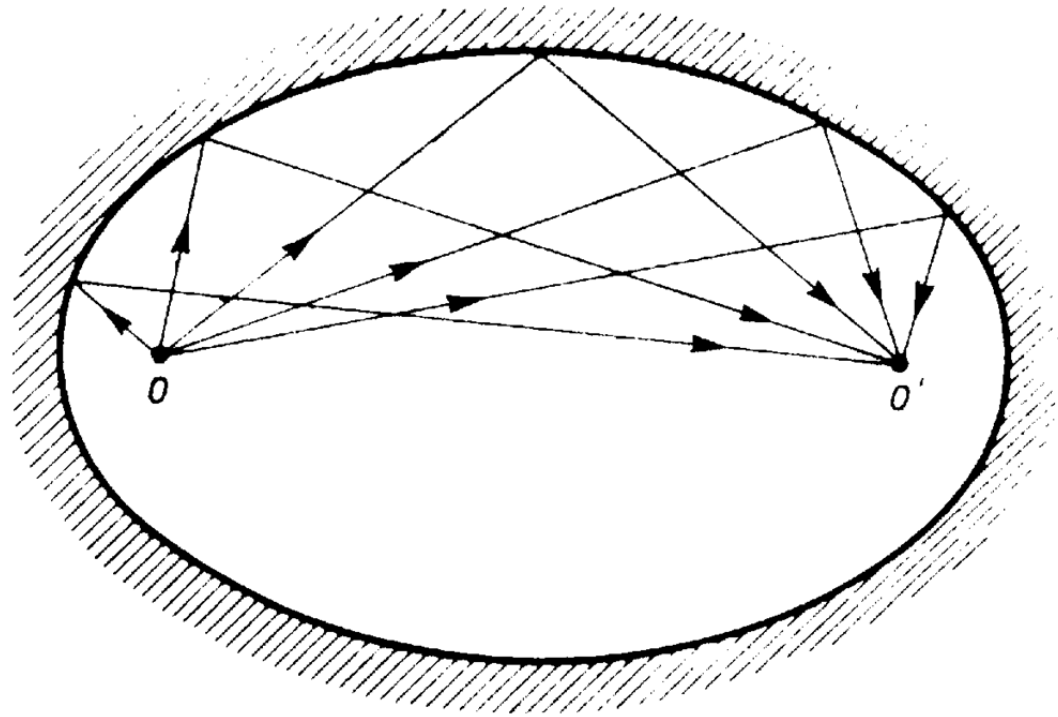
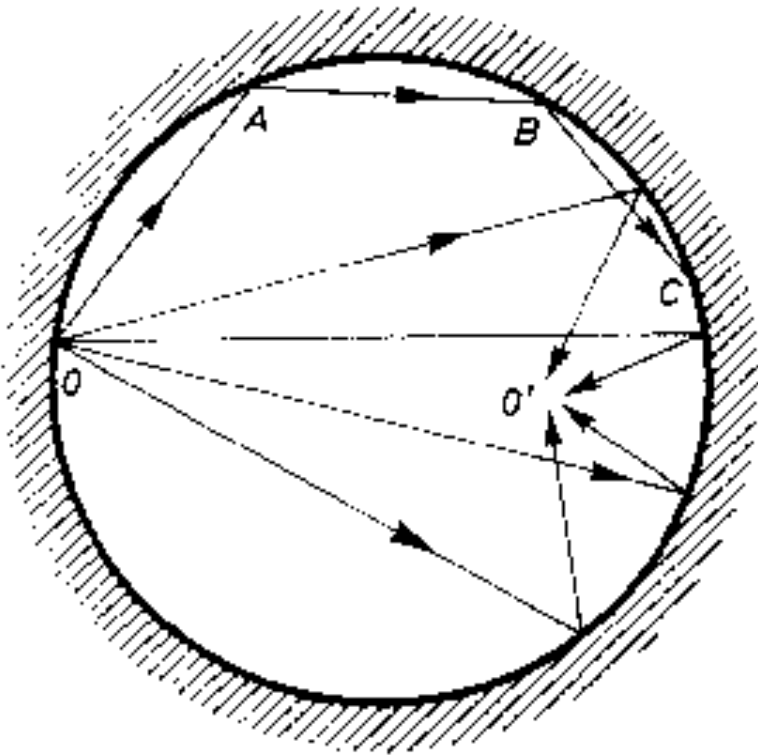
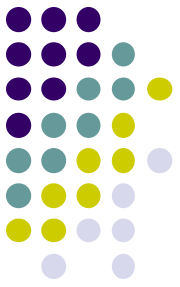


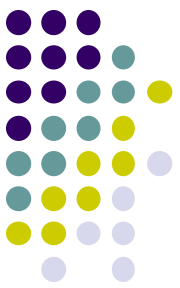
- Nepovoljni oblici

- okrugle i eliptične osnove
- konkavna zakrivljenja
- paralelopipedne prostorije
- kupole

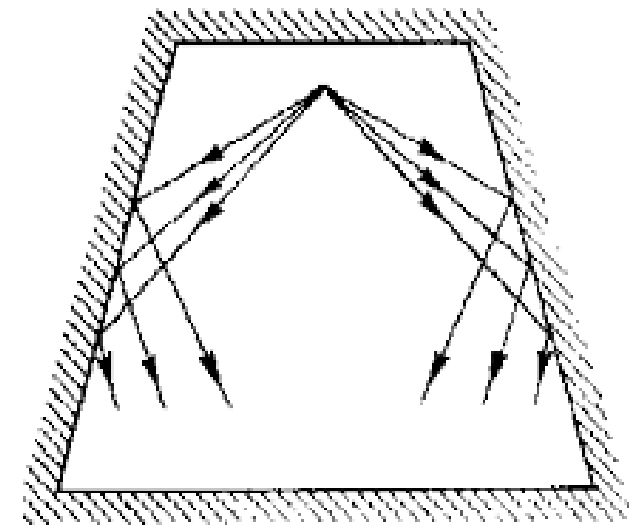
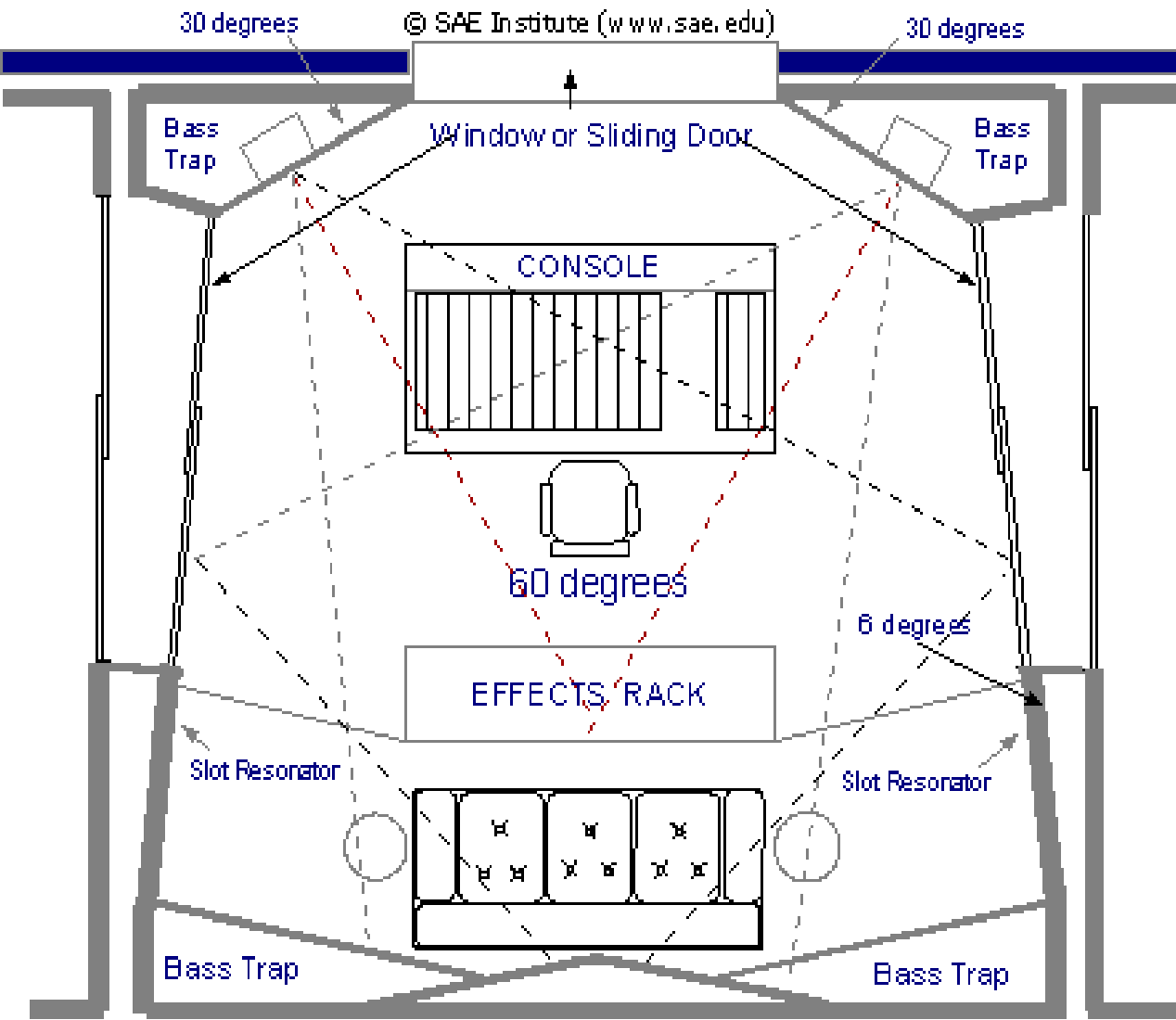


Izrazito nepovoljni oblici



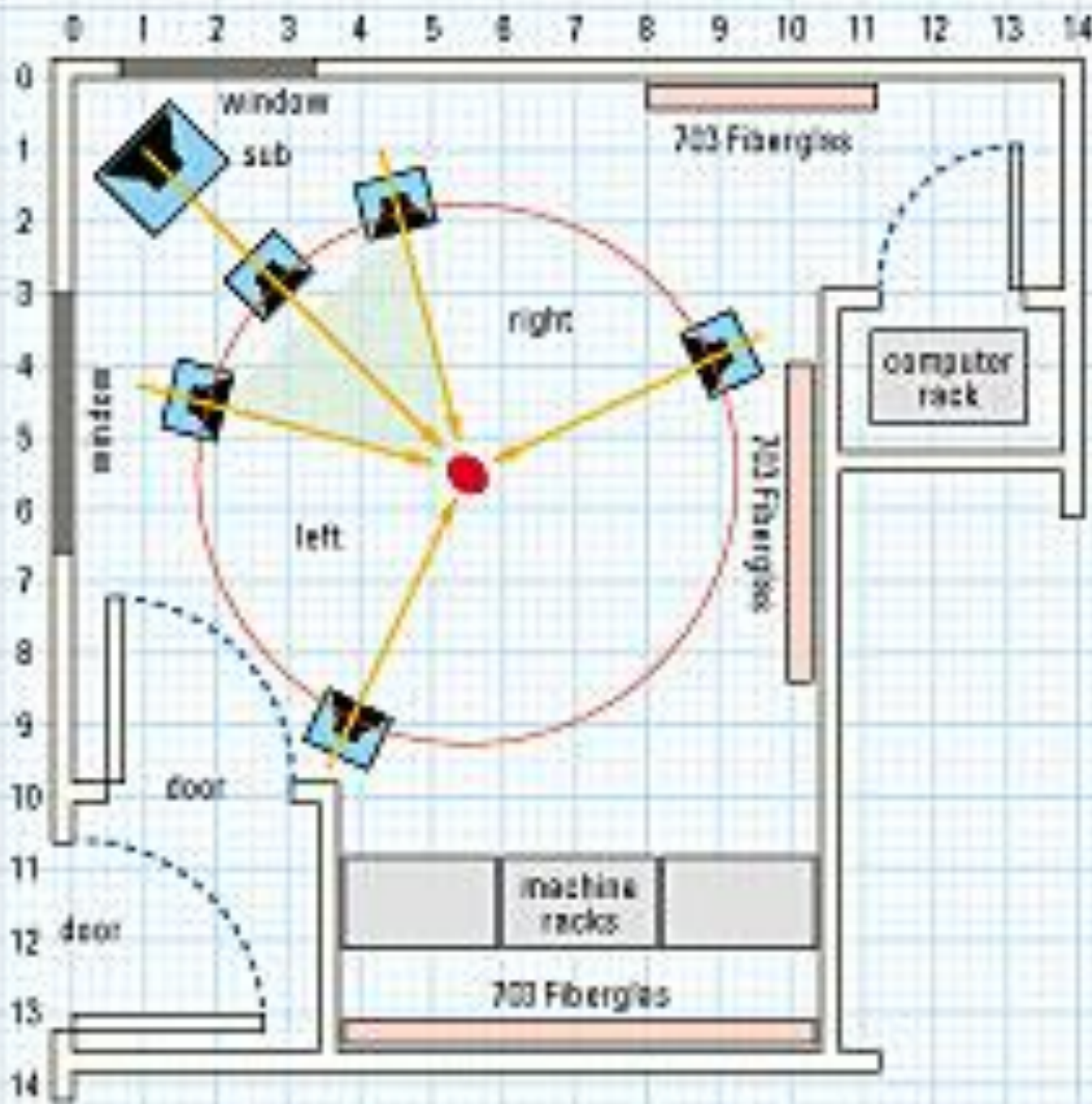


Primeri povoljnog oblika





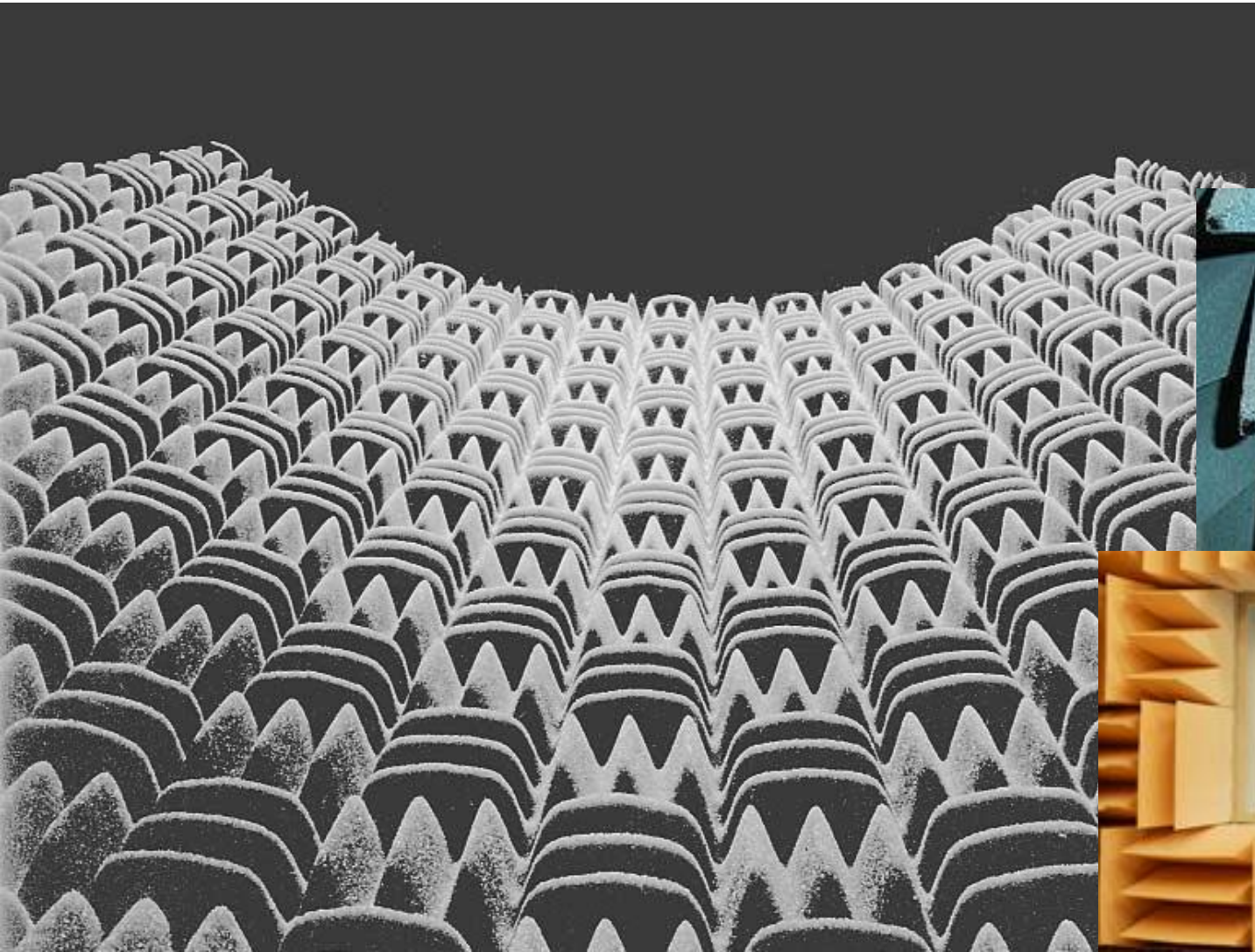
Rešenje za složenije prostore



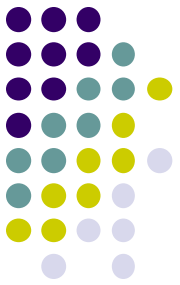




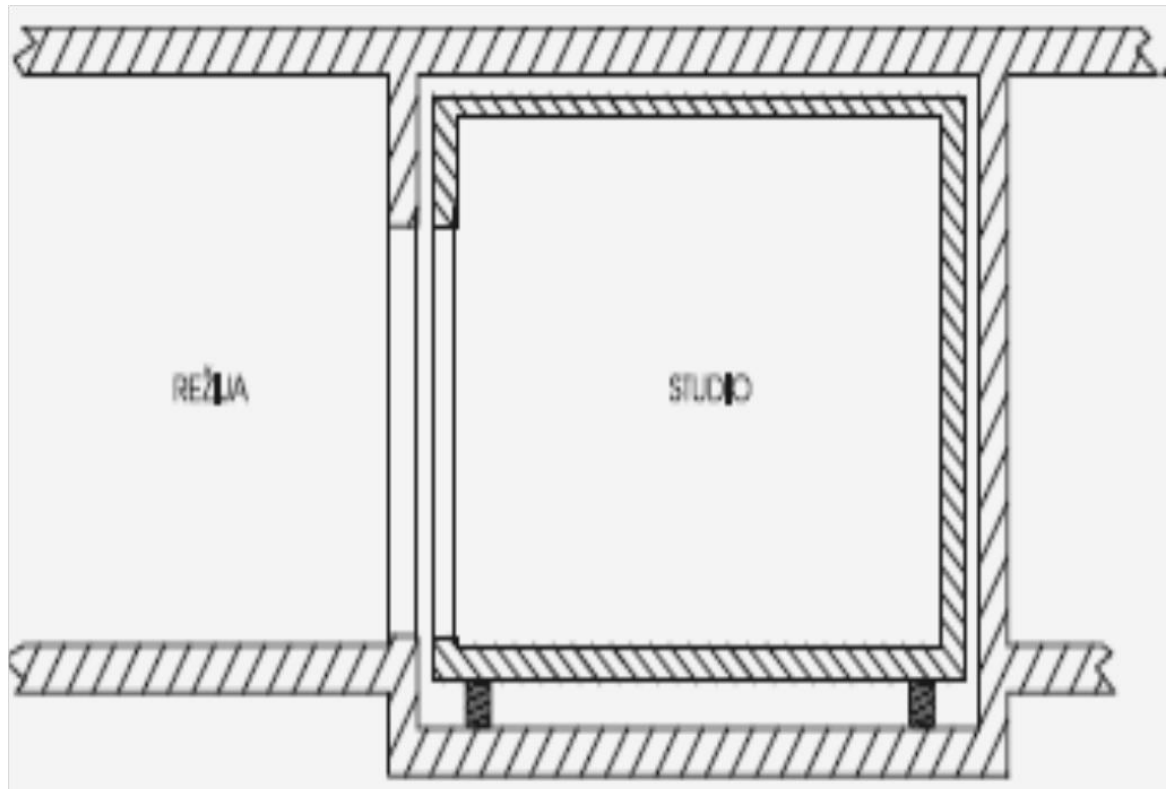
Apsorpcioni materijali



Šta je gluva soba?



- Prostorija akustički tako obrađena
 - stvara utisak ambijenta na otvorenom prostoru
 - nema refleksija od zidova, plafona i poda
 - nema reverberacije
- Soba u sobi
 - bez krutih veza
 - minimizovana i strukturna buka
 - koja se prenosi kroz vibracije zidova

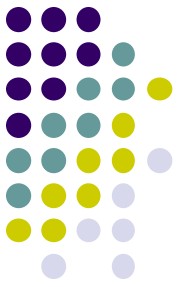


Za čega se koristi gluva soba?



- Snimanja sa efektom slobodnog prostora
 - nivo zvuka u gluvoj sobi se kreće od 10-20 dB
 - za snimanje muzike ili radio drame
- Snimanja čula sluha
- Snimanja karakteristika mikrofona i zvučnika
- Snimanja zvuka proizvoda koji su veoma tihi
- Snimanja zvuka vozila
 - merenje buke unutar kabine koju motor stvara
 - merenje nivoa buke van vozila
- RF snimanja aviona
 - osobina „nevidljivosti“ i rad radara

Kako se pravi gluva soba?



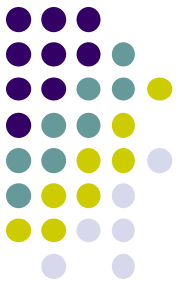
Postavljanje polica za apasorpcione materijale

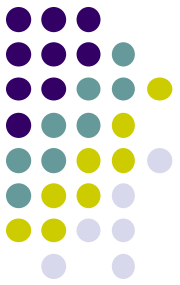


Gluva soba



Snimanje u gluvoj sobi

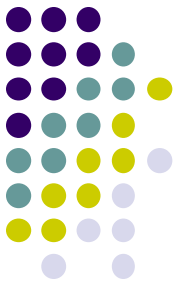




Potpuno gluva soba

- Apsorbuje se sav zvuk
 - i pod je prekriven apsorpci-onim materijalom
 - iznad poda je čelična mreža
- Pod je prigušen i stvara se utisak lebdenja
 - izolovan od vibracija i elektromagnetnih signala



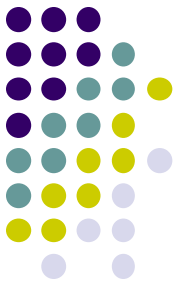


Polu-gluvu soba

- Pod ostavljen bez završnih obrada
 - od betona je
- Služe za testiranje teških mašina
 - čelična mreža ih ne bi izdržala



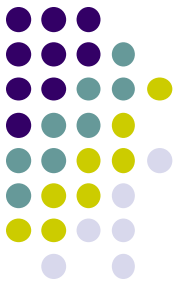
RF-gluva soba



- Slična gluvoj sobi
 - koristi posebni apsorpcioni materijali za enterijer
 - radijacioni apsorpcioni materijal (RAM) piramidalnog oblika
- Apsorbuje RF talase
 - kod zvuka pojačava reverberaciju



Najveća gluva soba



Nalazi se u Kaliforniji: dimenzije 76x80x21m

