

AKUSTIKA UZAVŘENÝCH PROSTORŮ

MUNI
ARTS

Kurz: **Studiová technika II**

Autor: Jiří Schimmel

Šíření zvuku prostředím

Šíření zvuku prostředím

- Je-li ve směru šíření zvukové vlny překážka, dojde k
 - a) odrazu (zrcadlovému, difúznímu)
 - b) ohybu (difrakci)
 - c) absorpci
 - d) průchodu
- O tom, zda bude většina energie odražena nebo se bude šířit ohybem dále, rozhodují rozměry překážek ve srovnání s vlnovou délkou vlnění
- O poměru odražené a absorbované energie zvukového vlnění rozhodují materiálové a konstrukční vlastnosti překážek

Útlum zvukového vlnění při šíření prostředím

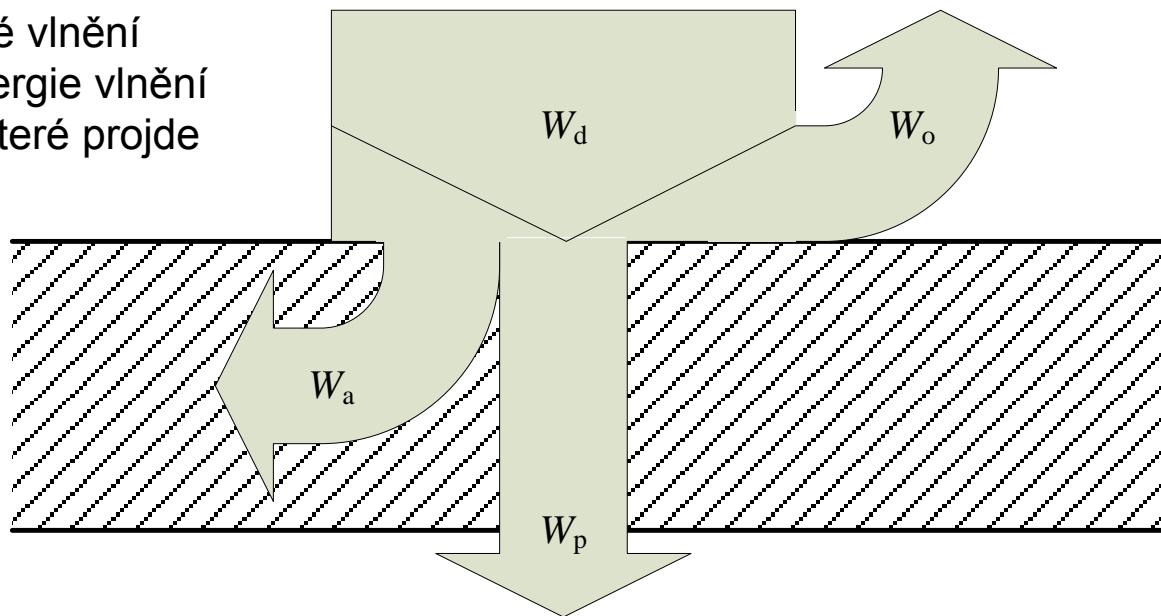
- Při dopadu zvukové vlny na překážku se část jejího výkonu odrazí zpět, část překážkou projde a část bude absorbována

W_d – energie dopadající vlnění

W_o – energie odražené vlnění

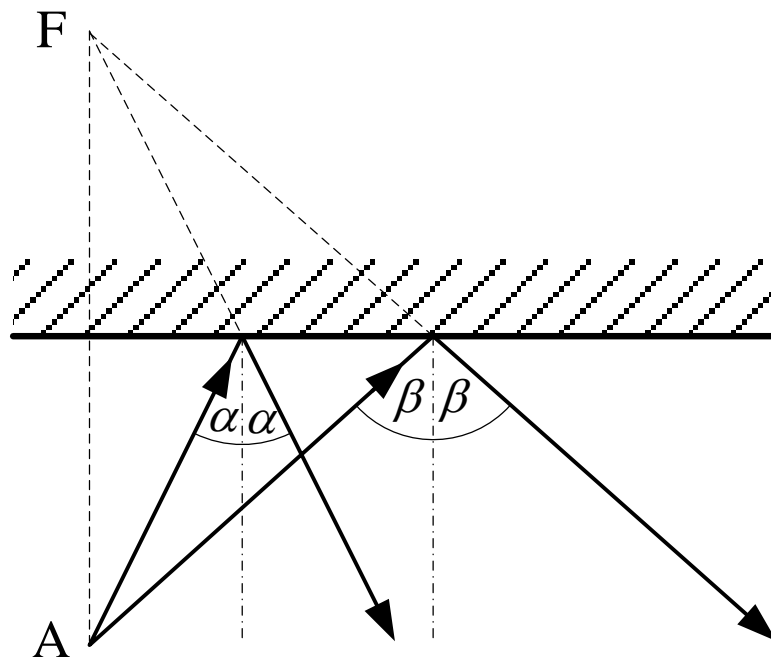
W_a – absorbovaná energie vlnění

W_p – energie vlnění, které projde překážkou



Zrcadlový odraz

- Zrcadlový zdroj
 - Snellův princip – odrazy lze uvažovat jako samostatné virtuální zdroje zvuku



Difúzní odraz

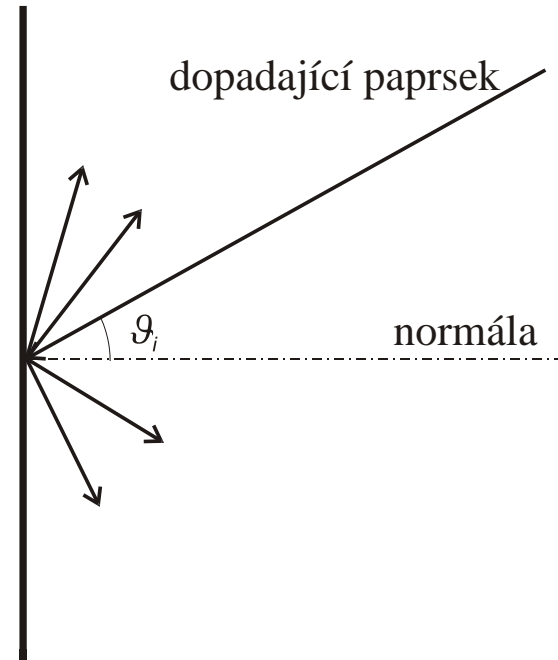
- Způsoben nerovností povrchu s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou vlnění
- Lambertův zákon:

$$I_o = I_d \cos \vartheta_o$$

I_o – intenzita odražené vlny

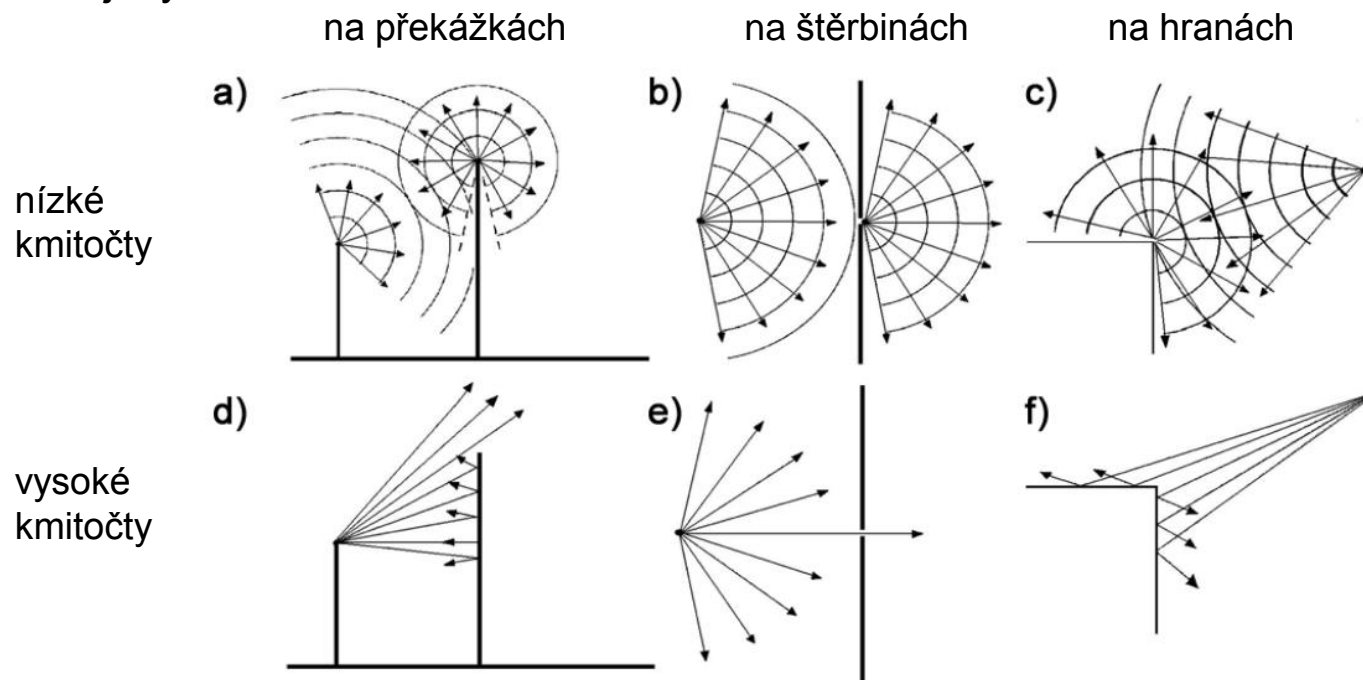
I_d – intenzita dopadající vlny

ϑ_o – úhel odražené vlny



Difrakce

- Lokální změna směru šíření zvukových vln při dopadu na okraj překážky
- Difrakční jevy:



ELORZA, D. O. *Room acoustics modeling using the ray-tracing method: implementation and evaluation*, University of Turku, Department of Physics, 2005.

Absorpce

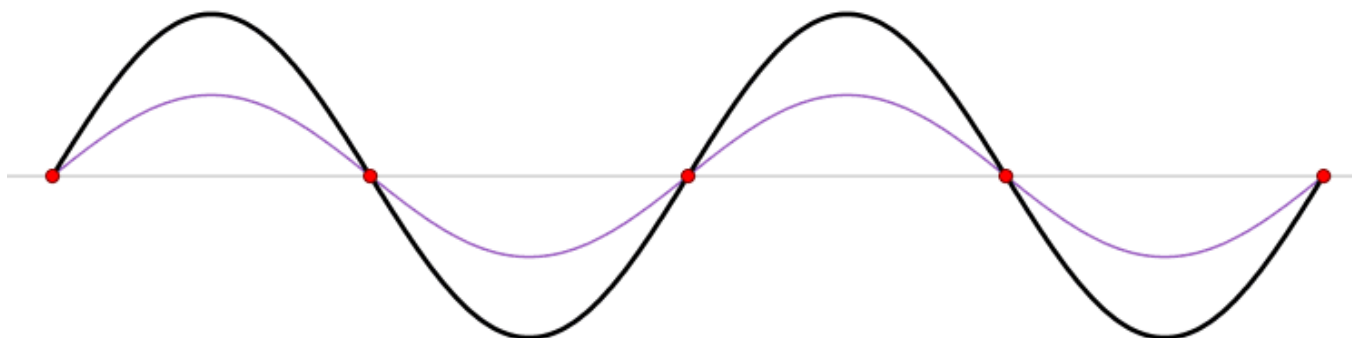
- Činitel *zvukové pohltivosti*: poměr energie W_a pohlcené určitou plochou k energii W_d na tuto plochu dopadající.

$$\alpha = \frac{W_a}{W_d}$$

materiál	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
beton, nenatřený	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
beton, natřený	0,11	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
okenní sklo	0,3	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
sádra	0,14	0,11	0,06	0,05	0,04	0,03
Překližka	0,28	0,22	0,17	0,09	0,11	0,11
textilní čalounění	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Sádra, tloušťka	0,29	0,11	0,05	0,04	0,07	0,09
lehký závěs	0,03	0,04	0,12	0,17	0,24	0,35

Řešení vlnové rovnice v uzavřeném prostoru

- Pro analýzu vlastností uzavřených prostorů s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou zvuku je nutné řešení vlnové rovnice. Okrajové podmínky řešení jsou, že akustická rychlost musí na povrchu stěn mít nulovou velikost
- Uvažujeme rovinné vlnění, kdy se prostorem šíří vlna přímé od zdroje a vlna odražená
- Obě vlny se sčítají a vzniká stojaté vlnění – v určitých místech prostoru je energie součtu vln nulová a jinde maximální



Vlastní kmity prostoru

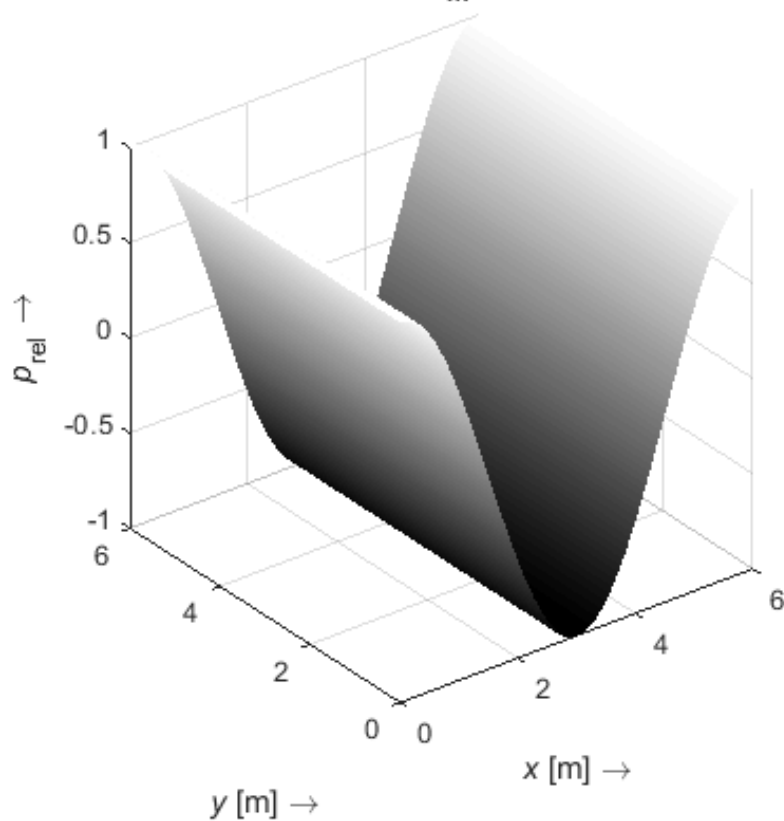
- Vlnění, která splňují okrajové podmínky, tj. vytvoří stojatá vlnění, se nazývají **vlastní kmity** nebo **módy** prostoru, pro jejich kmitočet platí:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c_0}{2\pi} k_{n_x n_y n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

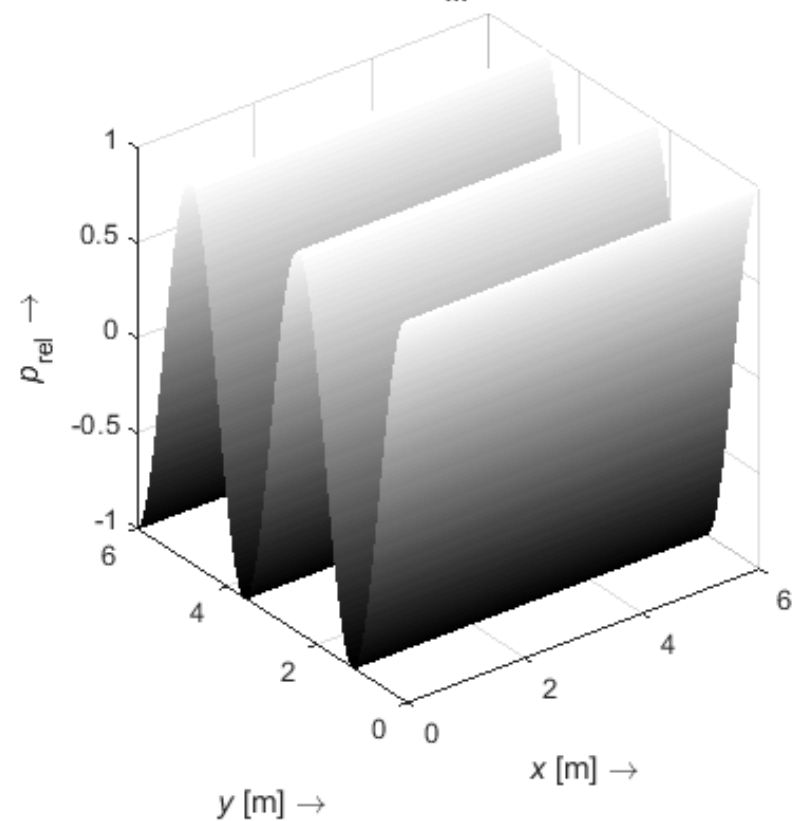
- **Šikmé (kosé) módy**: všechny indexy n jsou různé od nuly, směr šíření vln v prostoru je obecný
- **Tangenciální módy**: jeden z indexů n_x , n_y a n_z je nulový, vlny se šíří pouze v rovinách rovnoběžných s danou rovinou souřadnicového systému
- **Axiální (osové) módy**: hodnoty dvou indexů jsou rovny nule, vlny se šíří ve směru zbývajících osy

Rozložení akustického tlaku axiálních módů

mód [0 2 0], $f_m = 57.3333$ Hz

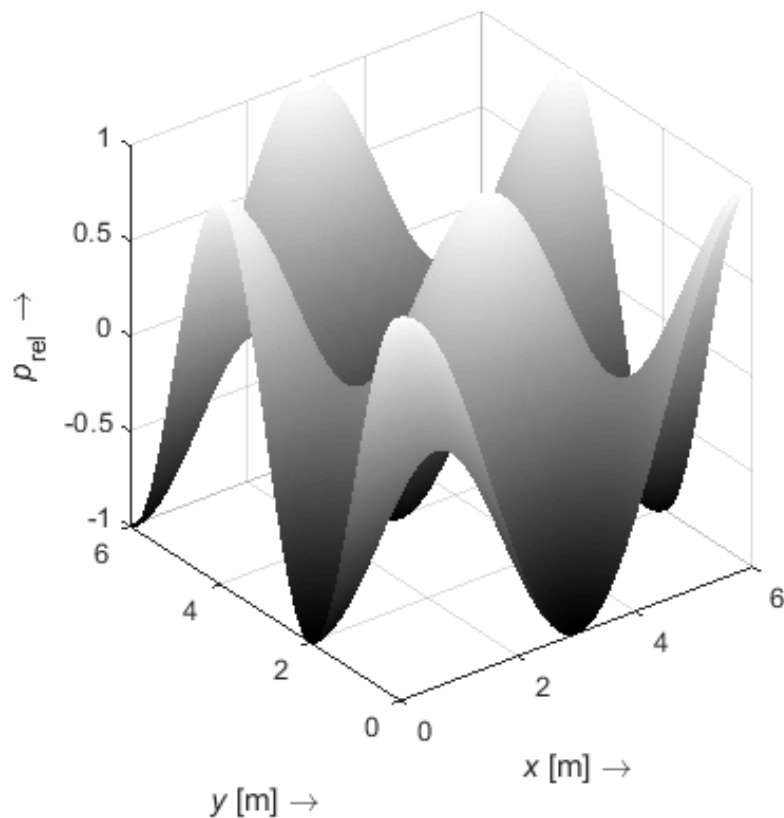


mód [5 0 0], $f_m = 143.3333$ Hz

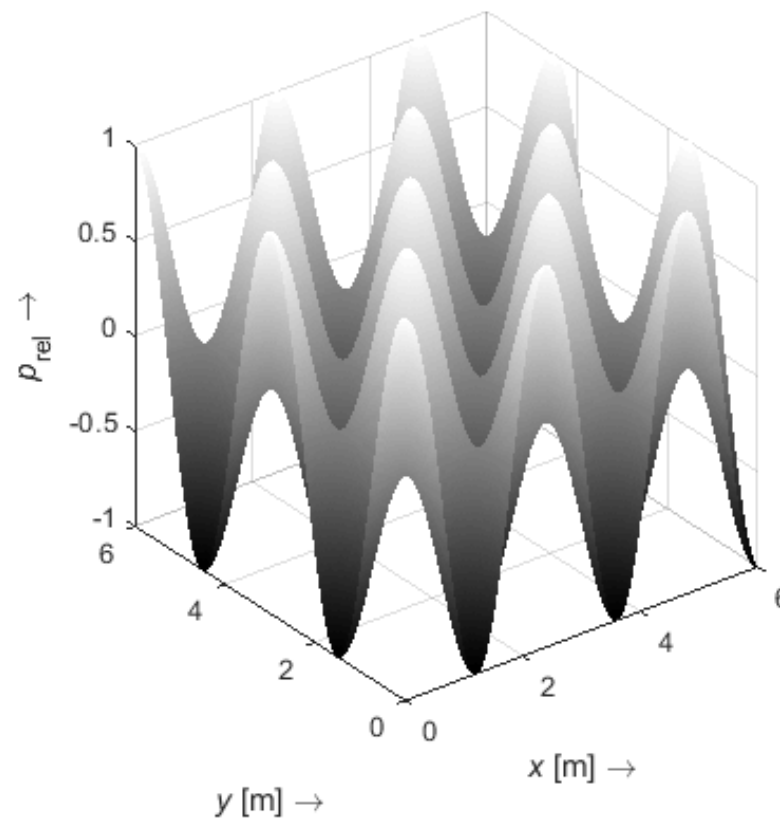


Rozložení akustického tlaku tangenciálních módů

mód [3 2 0], $f_m = 103.3591$ Hz



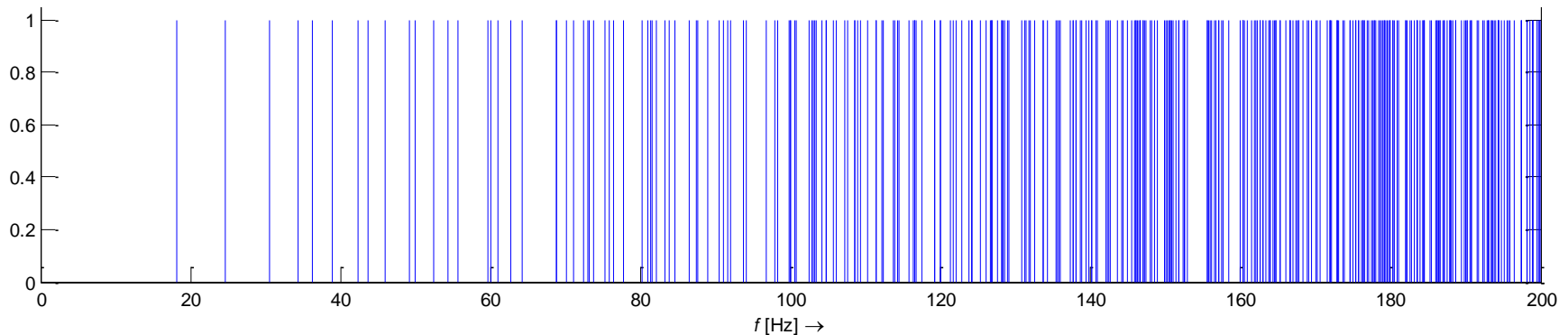
mód [4 5 0], $f_m = 183.5562$ Hz



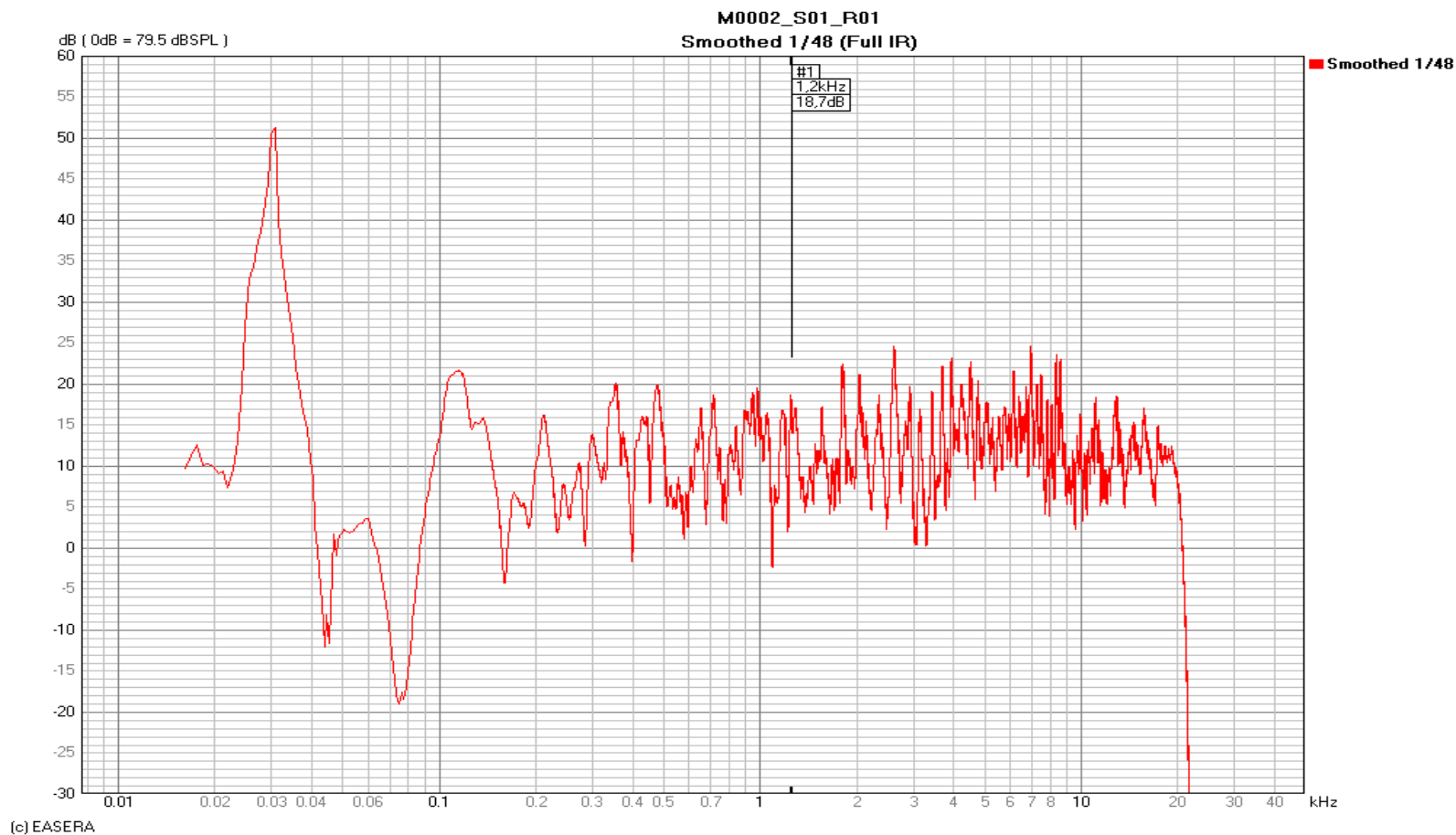
Vlastní kmity prostoru

- Kmitočtová charakteristika jednoho módu je rezonanční křivkou (má tvar jako pásmová propust)
- Kmitočtová charakteristika prostoru je dána součtem rezonančních křivek všech módů prostoru
- Jestliže mají dva nebo více módů (pro dvě nebo více kombinací indexů n_x , n_y a n_z) stejný kmitočet, nazývají se *degenerovanými módy*. Jejich důsledkem je koncentrace akustické energie na těchto kmitočtech

pravoúhlá místnost 9,5 x 7 x 5 m, módy pro $n_x, n_y, n_z = 0...10$ do 200 Hz



Kmitočtová charakteristika prostoru



Kritický kmitočet

- Poměrně konstantního rozložení akustického tlaku bude dosaženo, pokud bude vzdálenost dvou sousedních módů menší než polovina jejich šířky pásma δ

$$\Delta f < \frac{\delta}{2}$$

- Nad tzv. kritickým (*Schröderovým*) kmitočtem bude rozložení akustického tlaku poměrně konstantní

$$f_k = \sqrt{\frac{c_0^3}{2\pi V \delta}} \cong \frac{2500}{\sqrt{V \delta}}$$

- Šířka pásma módu souvisí s dobou dozvuku $T = 6,91/(\delta\pi)$, dosazením do rovnice kritického kmitočtu získáme jeho vyjádření pomocí doby dozvuku

$$f_k = 2500 \sqrt{\frac{\pi T}{6,91V}} \cong 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

Doba dozvuku

Statistická akustika

- Určení průměrných hodnot akustických veličin v uzavřeném prostoru
- Základní veličina charakterizující zvukové pole je hustota zvukové energie
- Zjednodušující předpoklady statistické akustiky:
 1. velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn → předpoklad nekoherentních zdrojů zvuku
 2. hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně veliká → platí pouze v difúzním poli, pouze pro kmitočty větší než kritický kmitočet
 3. úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností.

Statistická akustika

- Hustota zvukové energie v ustáleném stavu:

$$w_0 = \frac{4P}{c_0 \alpha S}$$

P – výkon zdroje zvuku, c_0 – rychlost zvuku, S – plocha stěn, α – střední činitel zvukové pohltivosti

- Průměrná hodnota zvukové pohltivosti:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i S_i}{S}$$

α_i - činitelé pohltivosti části stěn S_i

- Při započítání ztráty zvukové energie způsobené lidmi:

$$\alpha = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i S_i}{S} + \frac{NA_p}{S} \right)$$

N - počet osob, A_p - ekvivalentní plocha pohlcování osoby

Střední činitel zvukové pohltivosti

Druh místnosti	α
Téměř prázdná místnost s tvrdými stěnami z betonu, cihel nebo dlaždic	0,05
Částečně prázdná místnost s tvrdými stěnami	0,10
Místnost zařízená nábytkem; pravoúhlá dílna, průmyslová provozovna	0,15
Místnost nepravidelného tvaru zařízená nábytkem; dílna nebo průmyslová provozovna nepravidelného tvaru	0,20
Místnost zařízená čalouněným nábytkem; průmyslový provoz nebo dílna s dílčími akustickými úpravami na stropě nebo zdech	0,25
Místnost s materiálem pohlcujícím zvuk na stěnách a stropu	0,35
Místnost s velkým množstvím materiálu pohlcujícím zvuk na stropu a stěnách	0,50

Doba dozvuku

- **Dozvuk:** zvuk, který se díky odrazům od stěn a konečné rychlosti zvuku šíří prostorem po vypnutí zdroje zvuku
- **Doba dozvuku:** doba, za kterou hustota energie nebo intenzita zvuku klesne po vypnutí zdroje zvuku na 10^{-6} původní hodnoty (tj. o 60 dB)

- podle Sabina:
$$T = 0,164 \frac{V}{\alpha S}$$

vyhovuje pouze pro prostory s malým α

- podle Eyringa:
$$T = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{stř}})}$$

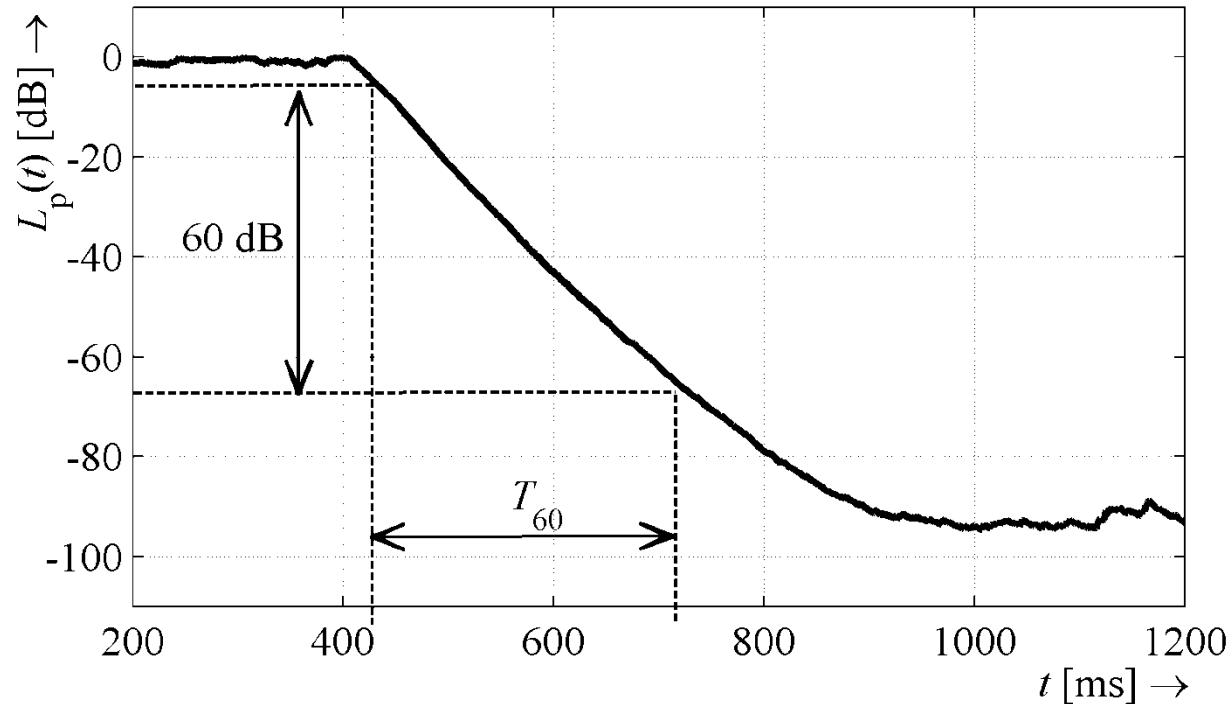
vyhovuje pouze pro prostory s $\alpha < 0,8$

- podle Millingtona:
$$T = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

přesnější výsledky pro $\alpha > 0,8$, v praxi se obvykle nepoužívá

Měření doby dozvuku

- Měření doby poklesu hladiny akustického tlaku L_p o 60 dB po vypnutí všesměrového širokopásmového zdroje zvuku (aproximace Diracova impulsu nebo šum)



Metody měření doby dozvuku

1. Metoda přerušného šumu

- zdrojem vlnění je reproduktor, na který je přiváděn signál ze širokopásmového náhodného nebo pseudonáhodného zdroje šumu
- měření doby poklesu hladiny akustického po vypnutí zdroje zvuku

2. Metoda integrované impulsní odezvy

- zdrojem vlnění je zdroj akustického impulsu, který sám nedoznívá a má dostatečně široké spektrum (signální pistole apod.)
- zdrojem může být i širokopásmový měřicí signál, který poskytuje impulsovou odezvu až po zpracování zaznamenaného zvukového signálu
- ze získané impulsové se integrací její druhé mocniny vytvoří křivka poklesu, ze které se určí doby poklesu hladiny akustického po vypnutí zdroje zvuku podobně jako u metody přerušovaného šumu
- Doba dozvuku se měří širokopásmově nebo v oktávových či třetino-oktávových pásmech

Zásady měření doby dozvuku

- Hladina hluku pozadí musí být alespoň o 15 dB nižší než hladina, pro kterou budeme pokles hladiny akustického tlaku měřit
- To není vždy možné při měření zajistit, proto se neměří doba poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB, ale o 30 (T_{30}), případně 20 dB (T_{20}), některé měřicí aplikace nabízejí i měření pro pokles hladiny akustického tlaku o 10 dB (T_{10})
- Zdroj zvuku musí vybudit dostatečnou hladinu akustického tlaku, aby křivka poklesu začínala minimálně o 45 dB (T_{30}) resp. 35 dB (T_{20}) nad hlukem pozadí v daném kmitočtovém pásmu
- Při určování T_{20} se vyhodnocuje křivka poklesu od 5 dB do 25 dB pod ustálenou hladinou, u T_{30} od 5 dB do 35 dB pod ustálenou hladinou
- Doba dozvuku se získá průměrováním z více míst mikrofonů a zdroje
 - průměrováním doby dozvuku změřené v jednotlivých místech
 - průměrováním směrnic regresních přímk křivek poklesů v jednotlivých místech

Měření doby dozvuku



Měření doby dozvuku



Měření doby dozvuku

- Všesměrový zdroj zvuku umístěný 1,5 m nad podlahou.
- Mikrofon umístěný v difúzním poli v dostatečné vzdálenosti od odrazivé plochy (větší než čtvrtina vlnové délky nejnižšího zkoumaného kmitočtu).
- Měření se provádí ve více bodech a výsledky se průměrují, polohy mikrofonů vzdáleny alespoň polovinu vlnové délky nejnižšího zkoumaného kmitočtu:

$$a(T_{60}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{60i}$$

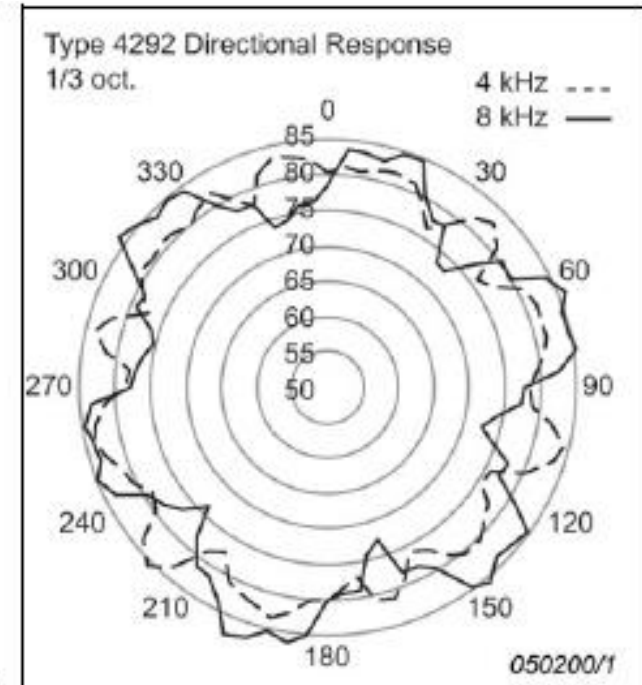
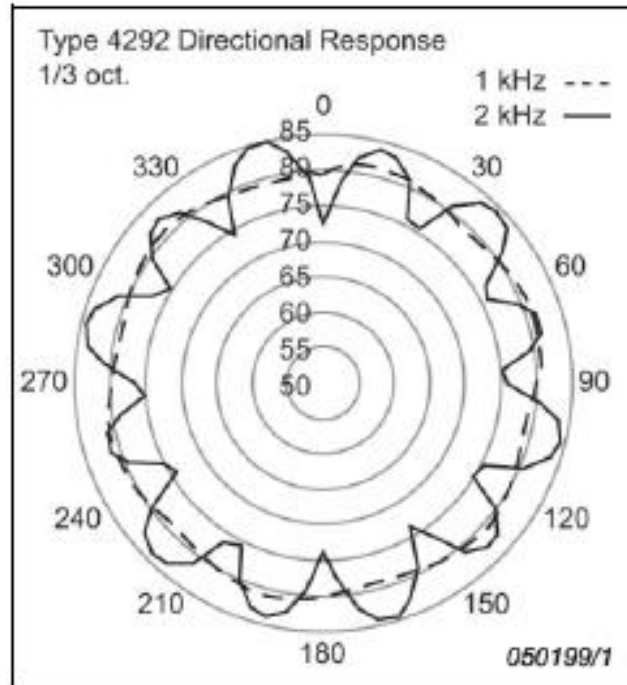
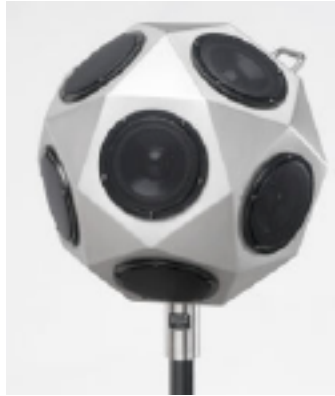
$$D(T_{60}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{60i} - a(T_{60}))^2$$

$$\sigma(T_{60}) = \sqrt{D(T_{60})}$$

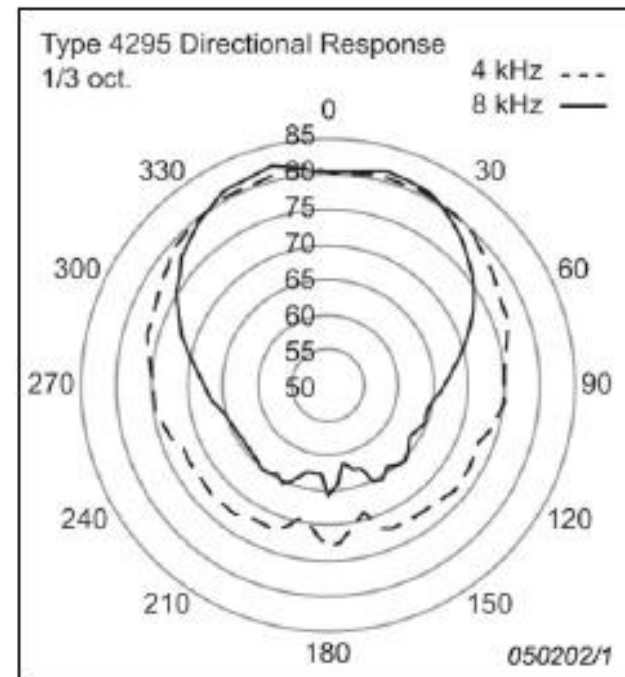
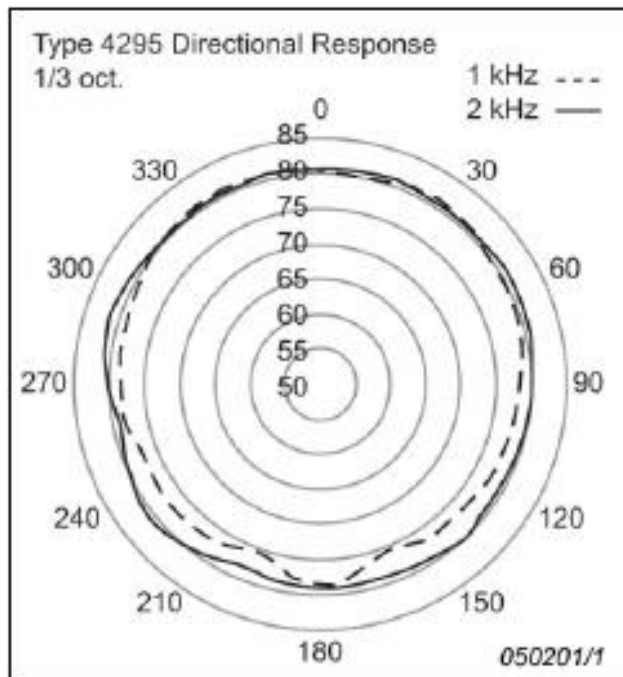
počet sedadel	počet míst měření
500	6
1000	8
2000	10

N – počet měření, $a(T_{60})$ – střední hodnota, $D(T_{60})$ – rozptyl, $\sigma(T_{60})$ – směrodatná odchylka

Měření doby dozvuku



Měření doby dozvuku

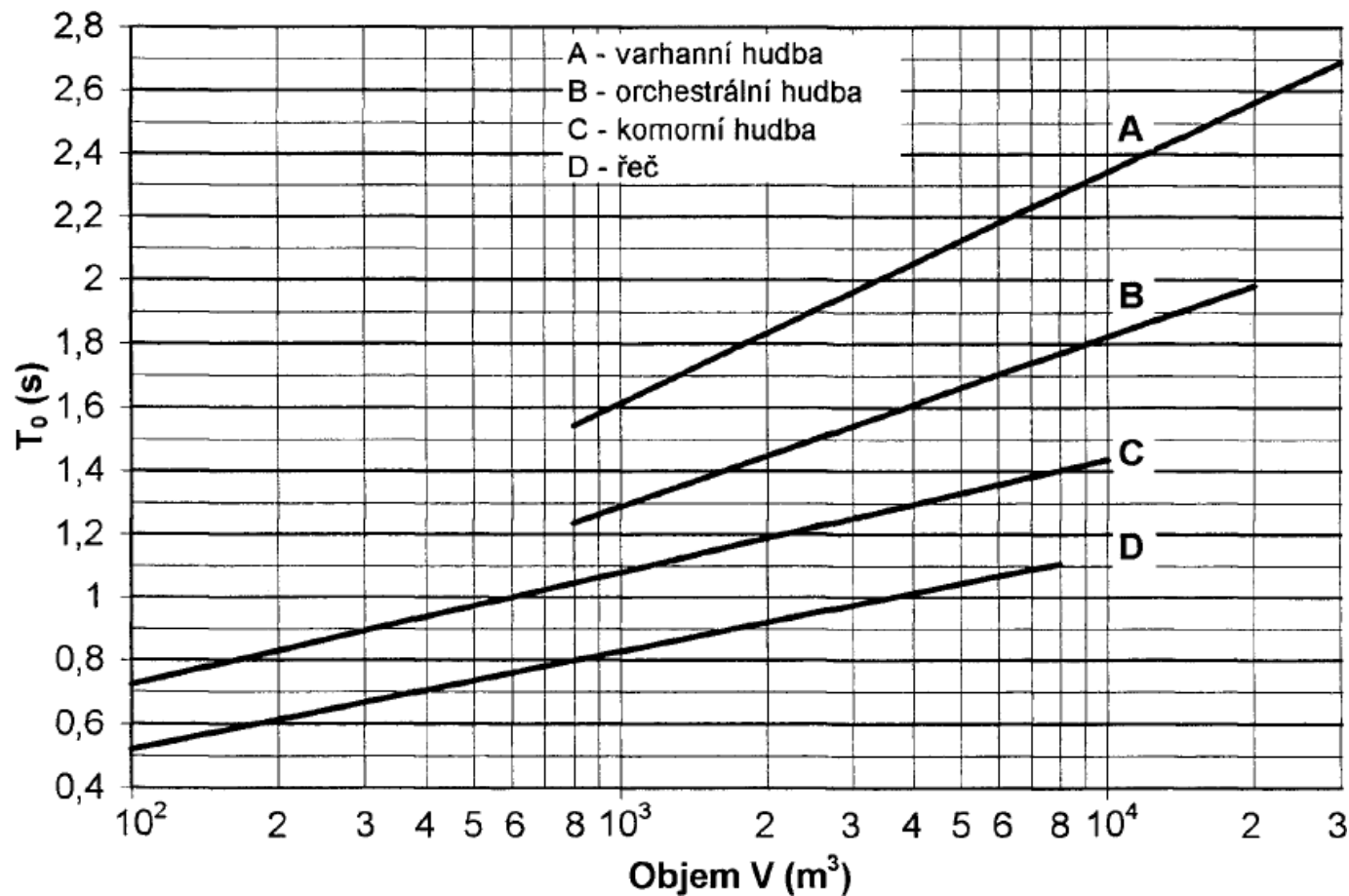


Požadavky na dobu dozvuku

Doporučení pro dobu dozvuku

- O subjektivně vhodné době dozvuku rozhoduje určení a objem prostoru
- Hodnoty vhodné doby dozvuku byly stanoveny na základě subjektivních testů
 - přednes mluveného slova: 0,5 s (menší prostor) – 1,2 s (větší prostor)
 - poslech hudby: 1,6 s (menší sály) – 2,1 s (větší sály), závisí na stylu
 - komorní hudba 1,4 s – 1,6 s
 - symfonická cca 2 s
 - varhanní hudba > 2 s
 - operní divadla: kompromis mezi hodnotou pro řeč a hudbu
 - chrámy a kostely: až 8 s
- Minimální postřehnutelná změna doby dozvuku je 10 %
- Kmitočtová závislost doby dozvuku:
 - doporučena vyrovnaná závislost v třetino-oktávových pásmech 100 Hz až 10 kHz
 - subjektivně je jako vhodná hodnocena prodlužující se doba dozvuku na nízkých kmitočtech, případně mírně se prodlužující i na kmitočtech vysokých

Doporučení pro dobu dozvuku



Požadavky vyplývající z norem ČSN

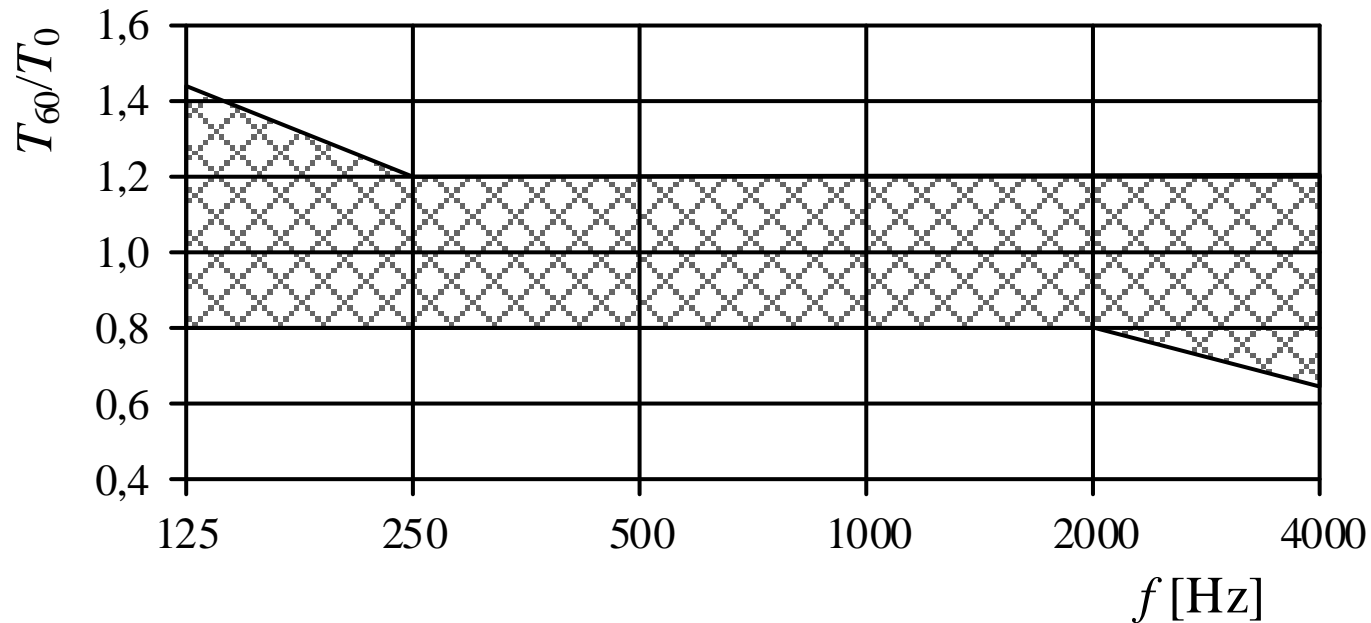
- Normy ČSN
 - ČSN 73 0525 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady
 - ČSN 73 0526 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku
 - ČSN 73 0527 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely
- Požadavky na dobu dozvuku:
 - definovány pomocí optimální doby dozvuku T_0 na 1 kHz a tolerančního pásma = přípustné rozmezí hodnot T/T_0 v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma
 - vyžadovány v oktávových pásmech 125 – 4000 Hz, u veřejných prostorů pouze 250 – 2000 Hz

ČSN 73 0526 – doporučená hodnota doby dozvuku

Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku	V_0 [m ³]	T_0 [s]
hlasatelská kabina	30	0,3
hlasatelna, dabingové studio	90	0,3
malé činoherní studio, televizní hlasatelna	180	0,4
střední činoherní studio	500	0,5
velké činoherní studio	1000	0,8
malé hudební studio	1500	1,0
střední hudební studio	4000	1,5
velké hudební studio	13000	1,8
malé televizní/filmové studio	5000	0,8
střední televizní/filmové studio	10000	1,1
velké televizní / filmové studio	20000	1,3
režijní místnost	130	0,3
mixážní hala (pro vícekanálový záznam)	700	0,7 (0,5)

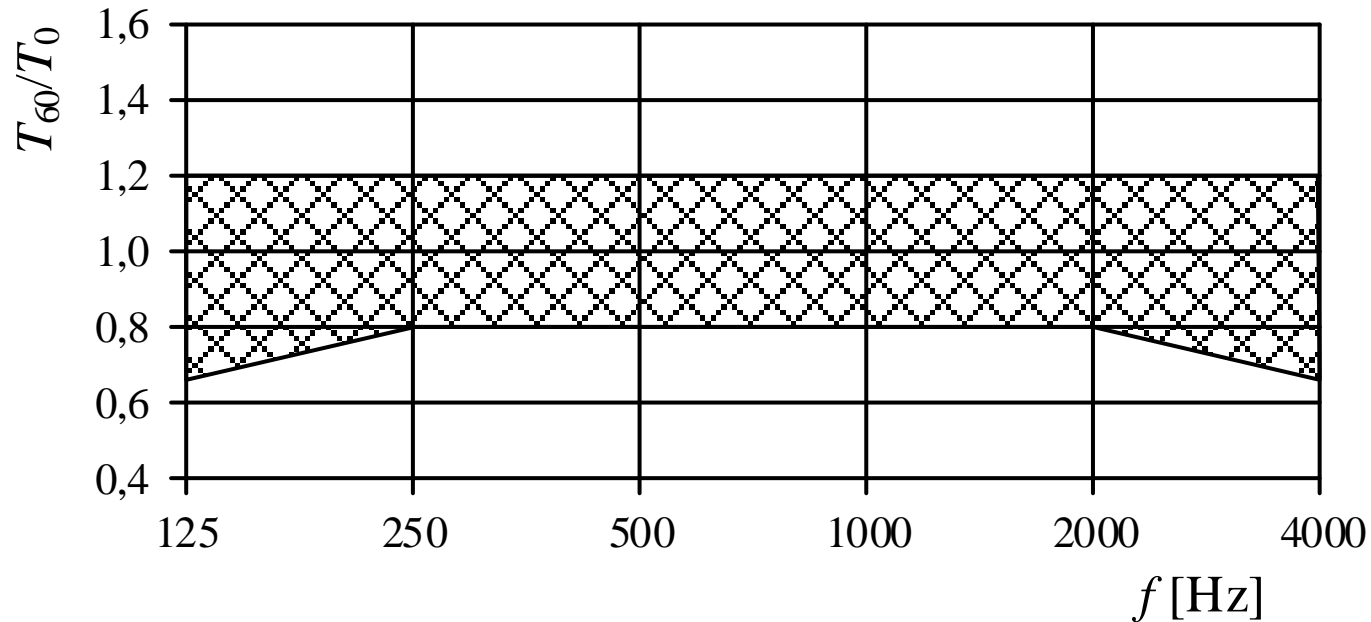
ČSN 73 0526 – maximální rozmezí poměru T/T_0

- typ 1 – prostor určený především pro hudbu nebo pro hudbu a řeč



ČSN 73 0526 – maximální rozmezí poměru T/T_0

- typ 2 – prostor určený především pro řeč



ČSN 73 0527 – doporučená hodnota doby dozvuku

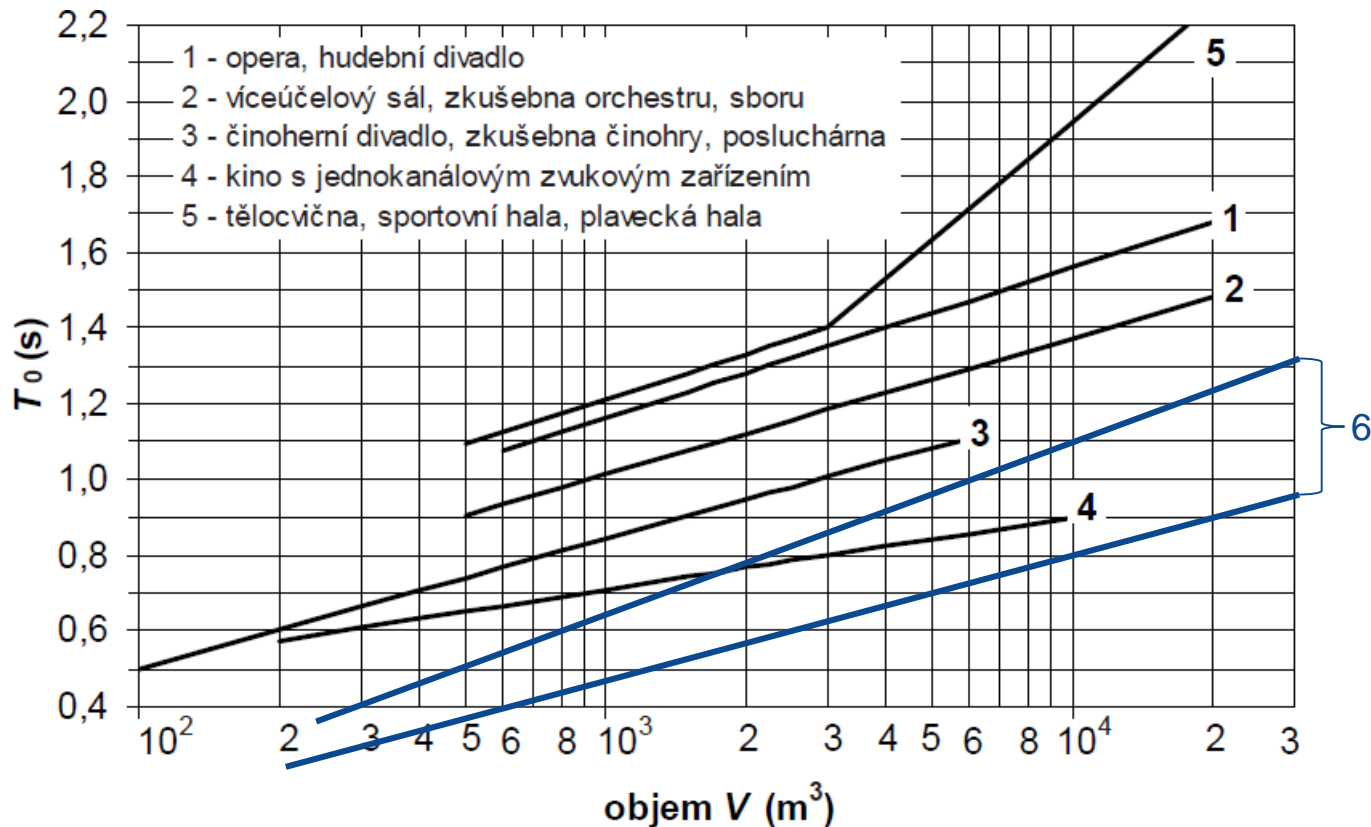
Prostory ve školách a pro veřejné účely	V_0 [m ³]	T_0 [s] *	tol. pásmo
učebna a posluchárna	< 250	0,7	typ 2
posluchárna	> 250	závislá na V_0 (3)	typ 2
jazyková učebna, laboratoř	130 – 180	0,45	typ 2
audiovizuální učebna	200	0,6	typ 2
čítárna a studovna	-	-	-
učebna hudební výchovy (při reprodukované hudbě)	200	0,9 (0,5)	typ 1
učebna hry na individuální nástroje a sólového zpěvu	80 – 120	0,7	typ 1
učebna orchestrální hry	dop. > 600	závislá na V_0 (2)	typ 3
tělocvičny, plavecké haly, nádražní a letištní haly	-	závislá na V_0 (5)	**
haly a dvorany veřejných budov, kde je důležitá srozumitelnost řeči	-	1,4	**

* **Platí pro obsazenou místnost**, s výjimkou tělocvičen a prostorů pro veřejné účely

** konstantní rozsah 0,8 – 1,2 pro pásma 250 – 2000 Hz

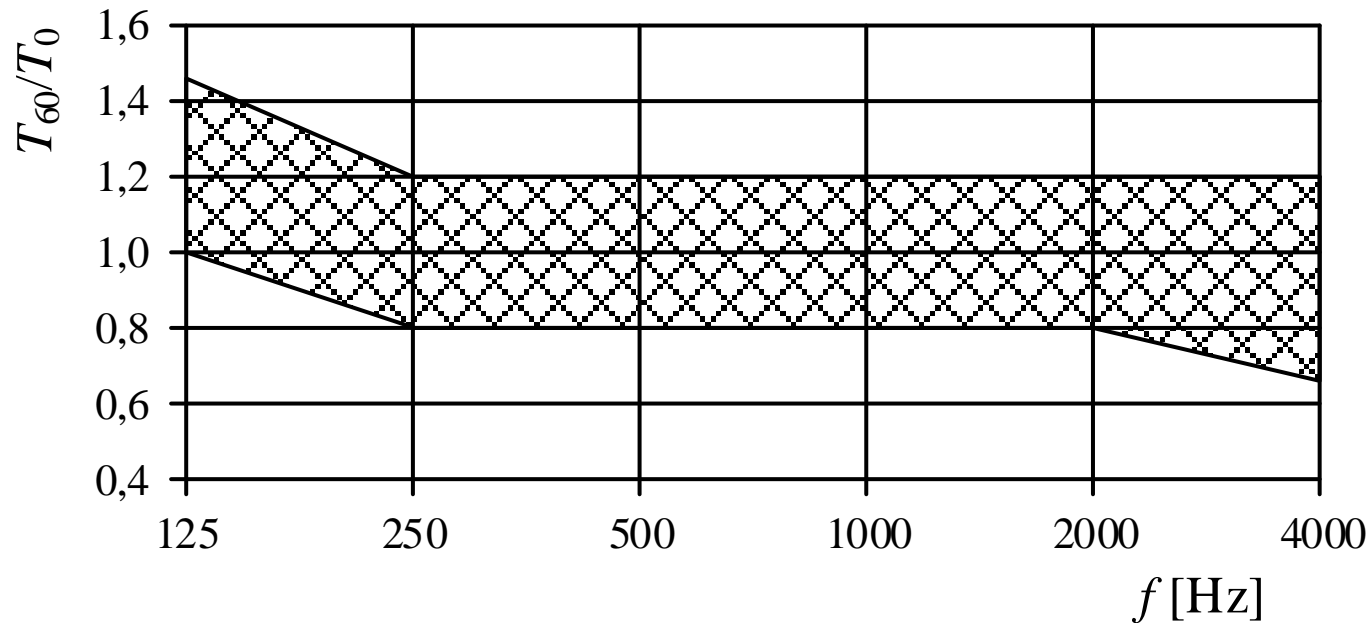
ČSN 73 0525 – Optimální doba dozvuku

Optimální doba dozvuku pro 1 kHz v závislosti na objemu obsazené místnosti (s výjimkou 5)



ČSN 73 0527 – maximální rozmezí poměru T/T_0

- typ 3 – obsazený prostor určený k hudební produkci

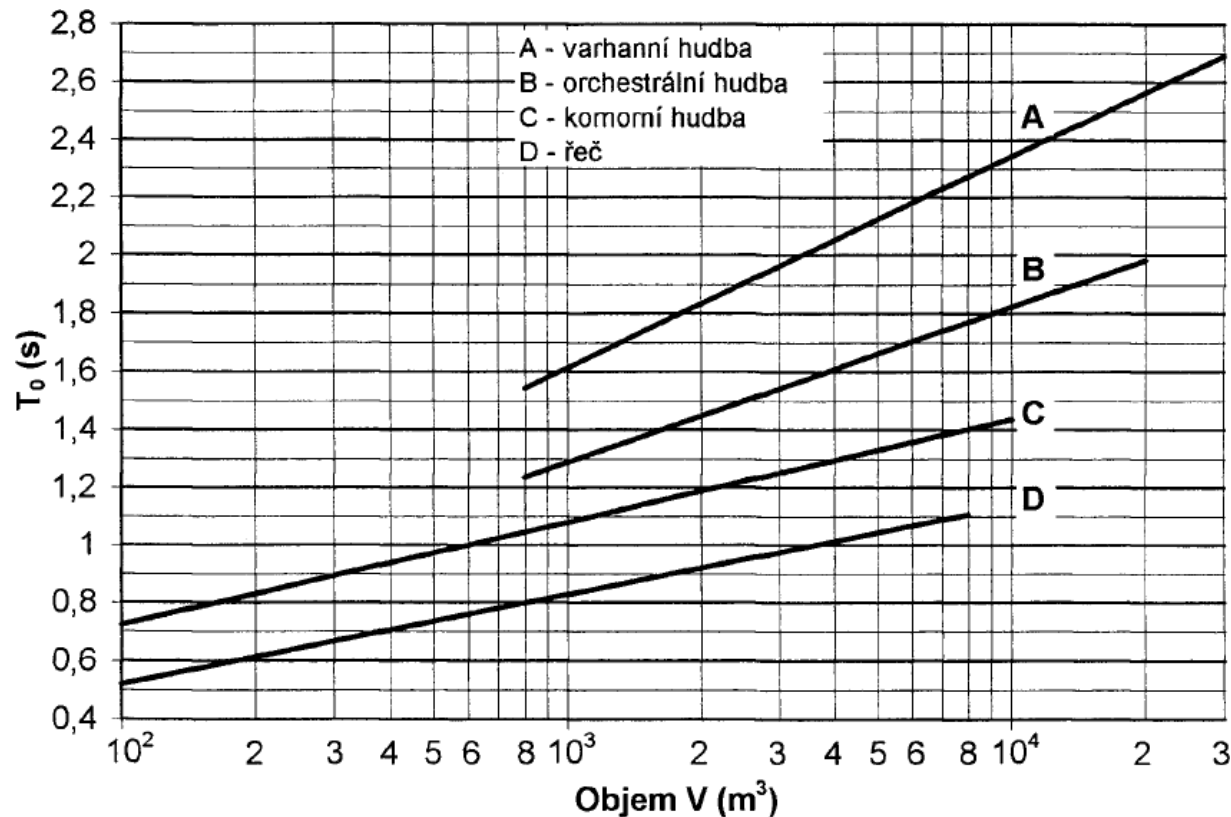


ČSN 73 0527 – doporučená hodnota doby dozvuku

Prostory pro kulturní účely	počet osob	objem na osobu [m ³]	závislost T_0 na V_0	tol. pásmo
koncertní sál				
- varhanní hudba		10 – 12	A	typ 3
- symfonický orchestr	do 2000	8 – 10	B	typ 3
- komorní hudba	do 500	6 – 8	C	typ 3
opera	do 1500	6 – 8	1	typ 3
hudební divadlo		6 – 8	1	typ 3
zkušebna orchestru / sboru		200	2	typ 3
víceúčelový sál		200	2	typ 1
činoherní divadlo		80 – 120	3	typ 2
zkušebna činohry			3	typ 2
přednáškový sál		4000	3	typ 2
kino s jednokanálovým zvukovým zařízením		dop. > 600	4	typ 4
kino s vícekanálovým zvukovým zařízením			6	typ 5

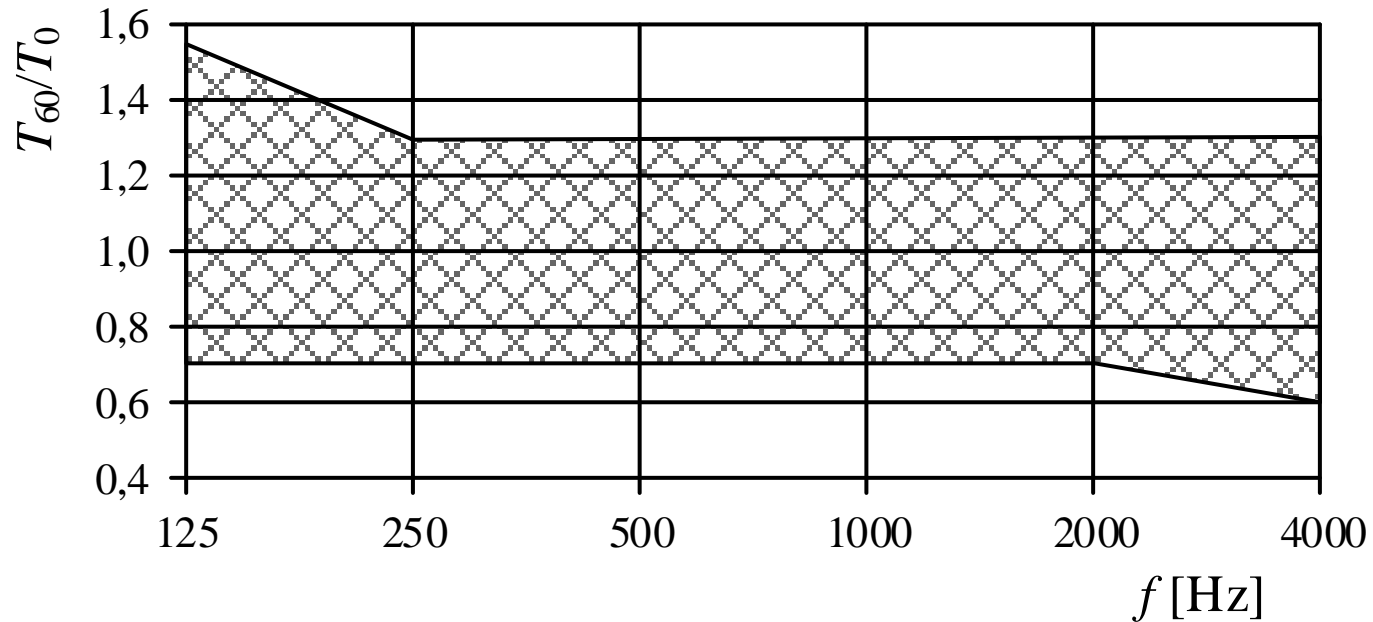
ČSN 73 0527 – Optimální doba dozvuku

Optimální doba dozvuku pro 1 kHz v závislosti na objemu obsazené místnosti



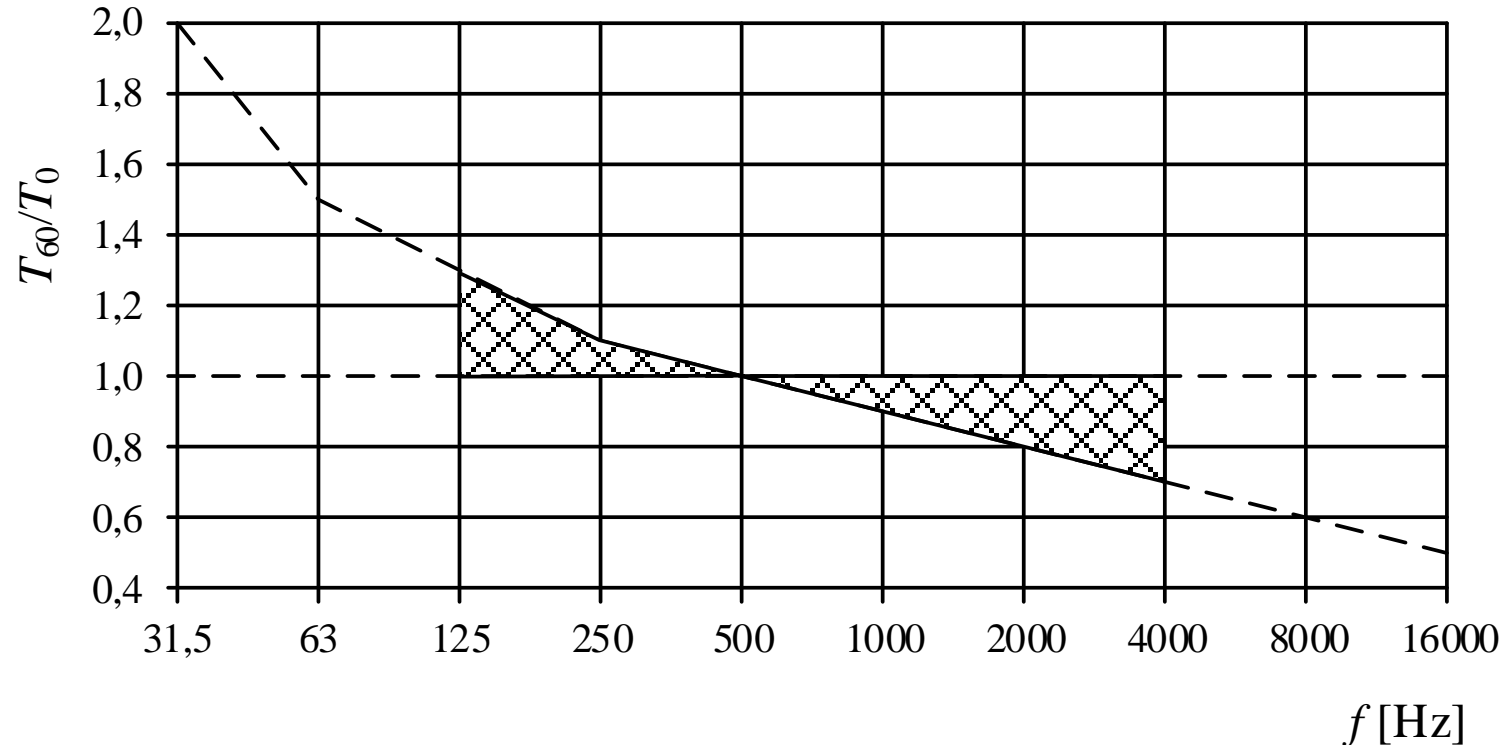
ČSN 73 0527 – maximální rozmezí poměru T/T_0

- typ 4 – obsazený prostor kina s jednokanálovým zvukovým zařízením



ČSN 73 0527 – maximální rozmezí poměru T/T_0

- typ 5 – obsazený prostor kina s vícekanálovým zvukovým zařízením



Akustické pohltivé prvky

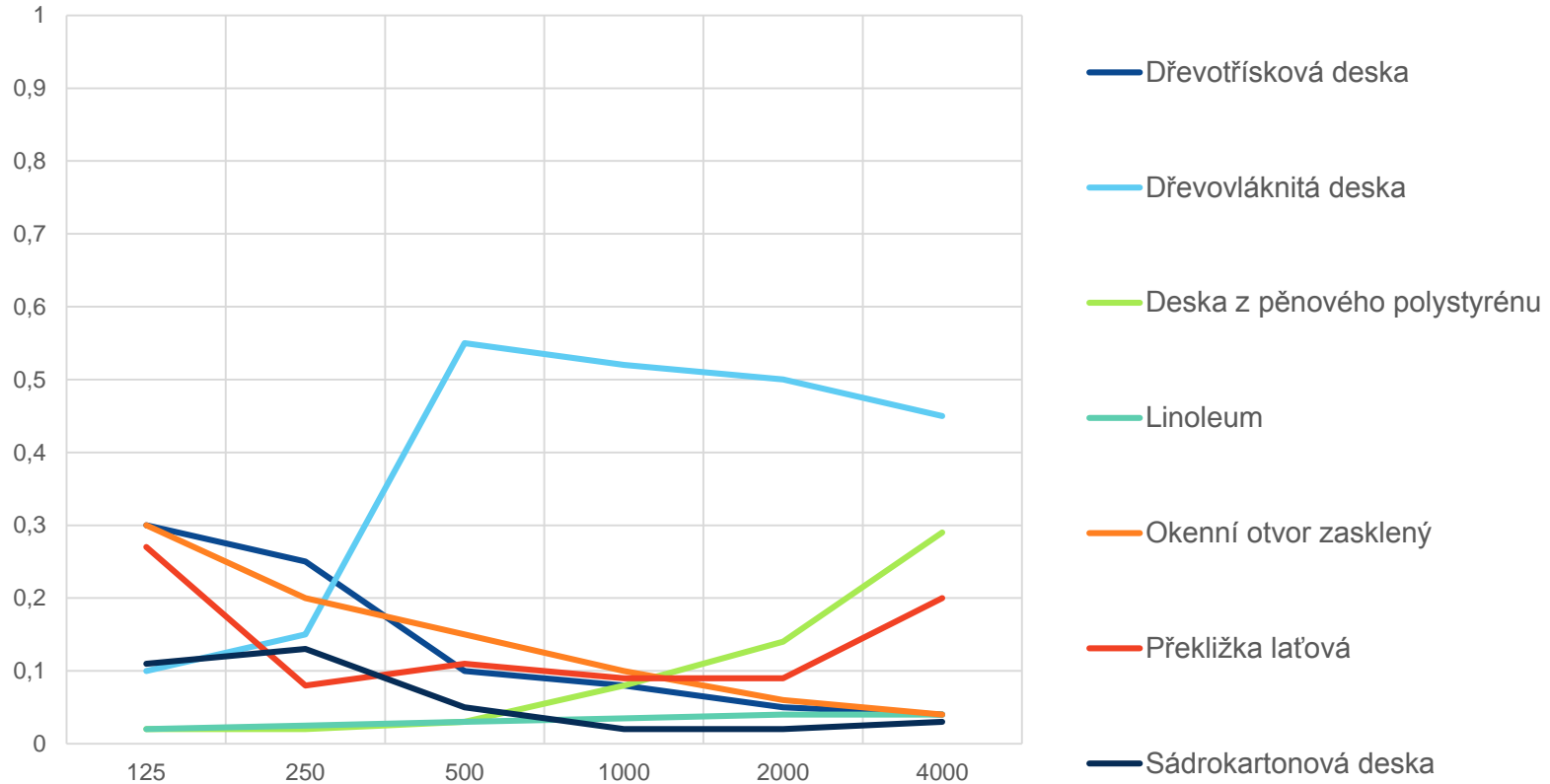
Pohlcování zvuku

- Nevratná přeměna zvukové energie v jinou
- Způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách:
 1. přeměny vznikající třením v blízkosti pevné stěny, nutná velká plocha
 2. přeměna energie kmitající desky v energii tepelnou vlivem mechanických ztrát
 3. přeměny vznikající poklesem akustického tlaku (relaxační) – v místech, kde nastává zhuštění částic, stoupá tlak, pokud dojde k jeho snížení (relaxaci), zmenší se energie vlnění; k relaxaci dojde např. přestupem tepla do kostry
 4. přeměny vznikající nepružnou deformací těles látky s pružnou hysterezí – stlačíme-li látku určitou silou, nevrátí se do původního stavu; práce vynaložená na deformaci je vyšší než práce získaná pružností tělesa a rozdíl představuje úbytek zvukové energie

Porézní materiály

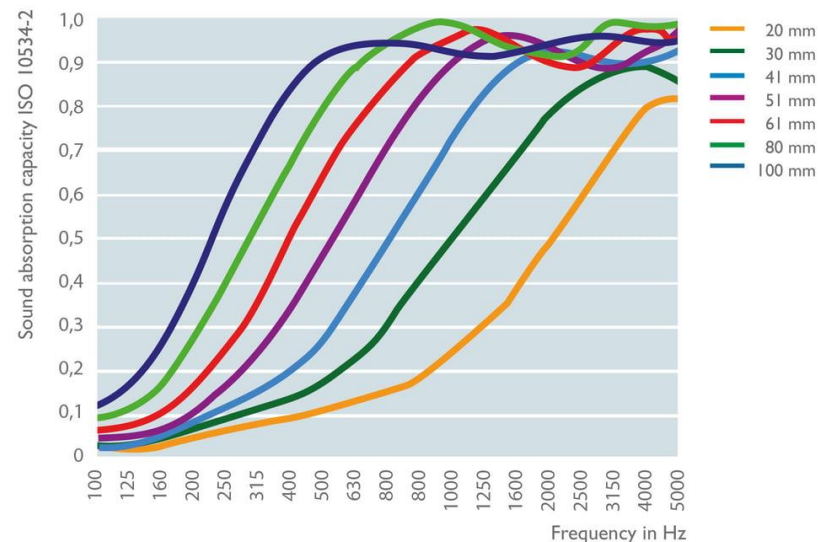
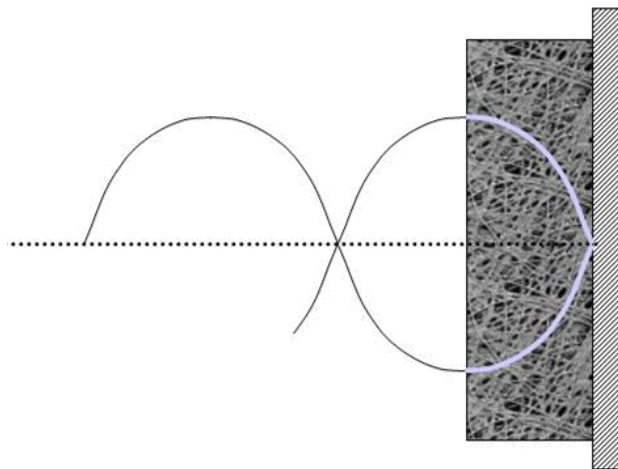
- Pevné látky, v jejichž objemu jsou malé dutinky vyplněné vzduchem (80 až 99 % celkového objemu)
 - vláknitá, kanálková nebo pěnová struktura
 - organické, minerální, skleněné a plastické hmoty, nanovláknenné materiály
 - póry musí být navzájem propojeny, nebo materiál musí být elastický, aby se zvuk mohl materiálem šířit
 - zvuková energie se v mezní vzduchové vrstvě nad povrchem kanálku nebo vlákna mění třením vrstev v energii tepelnou

Akustické porézní materiály



Kmitočtová závislost činitele zvukové pohltivosti

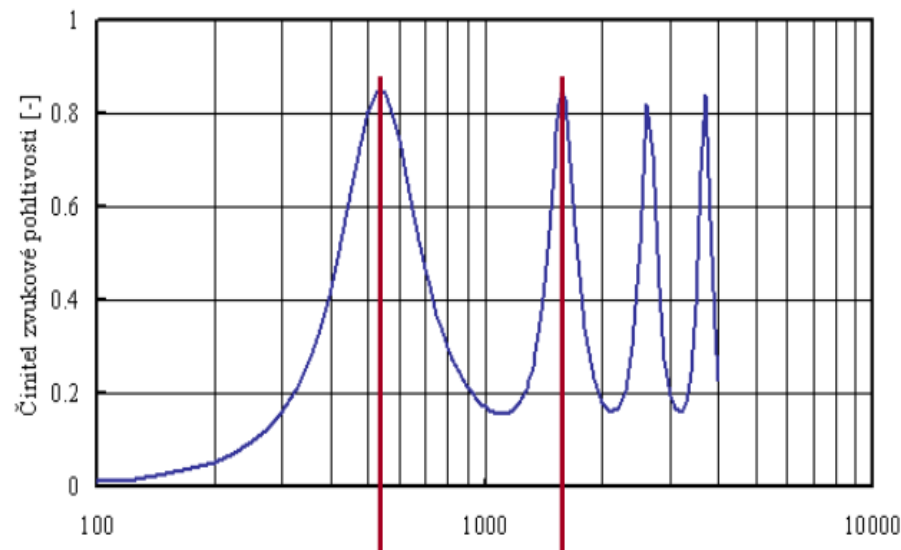
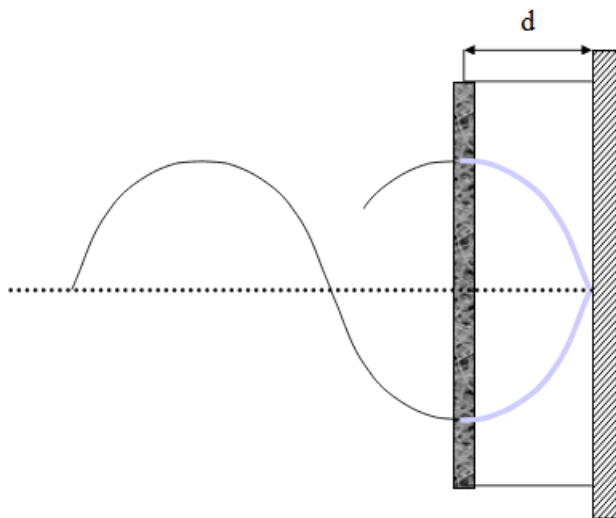
- Činitel zvukové pohltivosti závisí na velikosti energie přeměňované v teplo
 - akustická energie závisí na amplitudě akustické rychlosti
 - akustická rychlost je na povrchu, kde dochází k odrazu, nulová (viz vlnová akustika) → největší tření je ve vzdálenosti $\lambda/4$ od povrchu → vyšší pohltivosti na nižších kmitočtech lze dosáhnout zvýšením tloušťky materiálu



Kmitočtová závislost činitele zvukové pohltivosti

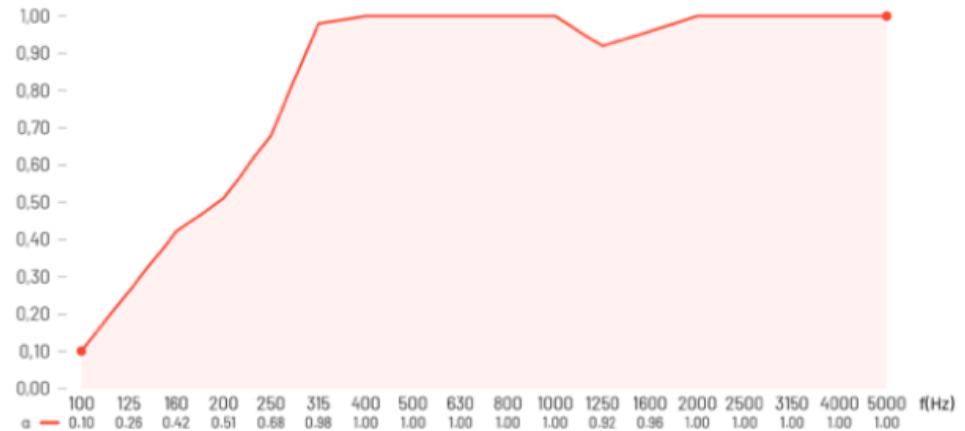
- Vyšší pohltivosti na nižších kmitočtech lze dosáhnout také předsazením materiálu před pevnou stěnu
- maximální akustická rychlost bude ve vzdálenosti $d = \lambda/4$ od pevné stěny pro vlnové délky

$$\lambda = \frac{4d}{2n-1} \quad \text{pro } n = 1, 2, \dots$$



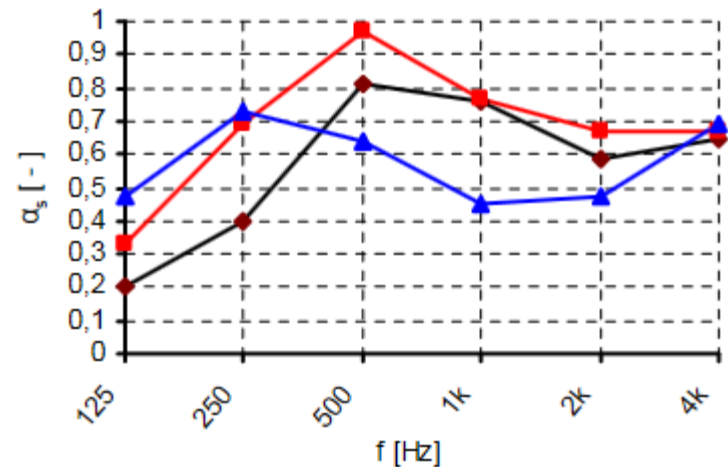
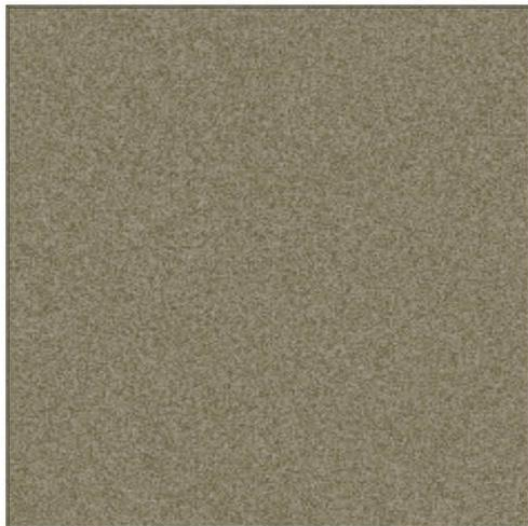
Pěnové a vláknité desky

- minerální vlna (poréznost 0,92-0,99)
- uhlíková vlákna (poréznost 0,91-0,97)
- akustická pěna (poréznost 0,95-0,99)
- plst (poréznost 0,83-0,95)
- dřevovláknitá deska /poréznost 0,65-0,80)



Sonit

- barvený písek pojený epoxidovou kompozicí
- pro použití v exteriéru je lícová strana obkladu natřena barevným nástřikem
- nehořlavý, vysoká mechanická, klimatická a chemická odolnost



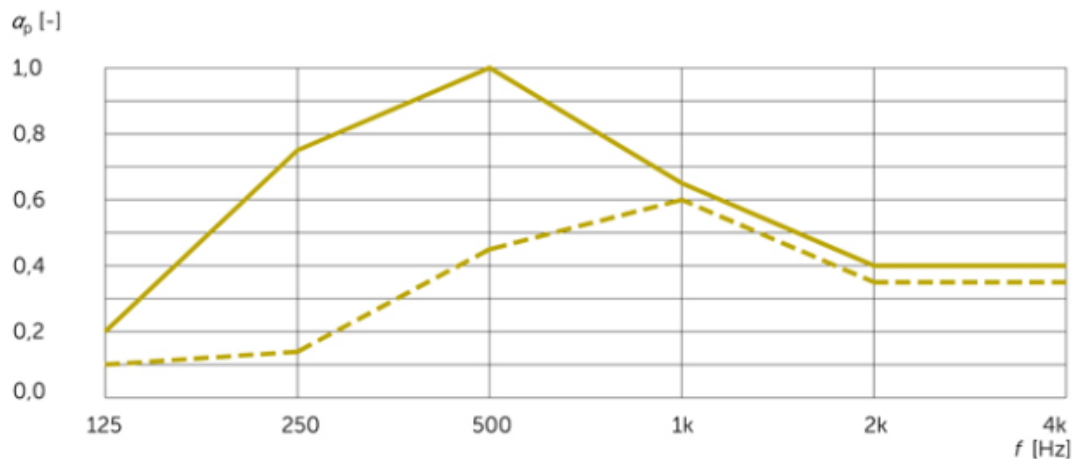
—◆— SONIT D30 - vzduchová mezera 75 mm
NRC=0,65 $\alpha_w=0,65$

—■— SONIT D30 s doplňkovým absorbérem
NRC=0,75 $\alpha_w=0,75$

—▲— SONIT D30 s úpravou dutiny a doplňk. absorbérem
NRC=0,55 $\alpha_w=0,50$ (L,H)

Glasio

- drť z recyklovaného křišťálového skla různých frakcí teplotně propojených tak, aby vznikla porézní struktura v celé tloušťce panelu
- nehořlavý, mechanická odolnost



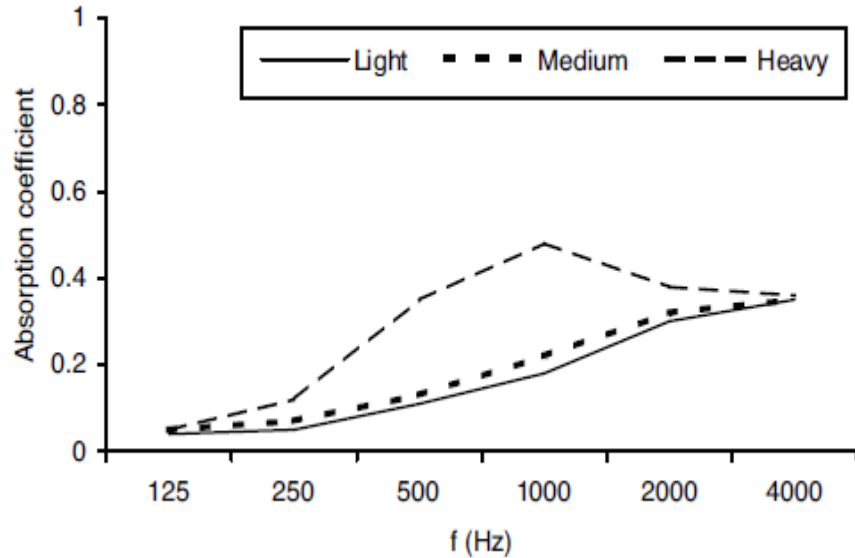
f [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	α_w	NRC
α_p (s absorpční vložkou)	0,20	0,75	1,00	0,65	0,40	0,40	0,50	0,70
α_p (bez absorpční vložky)	0,10	0,15	0,45	0,60	0,35	0,35	0,40	0,40

Glasio

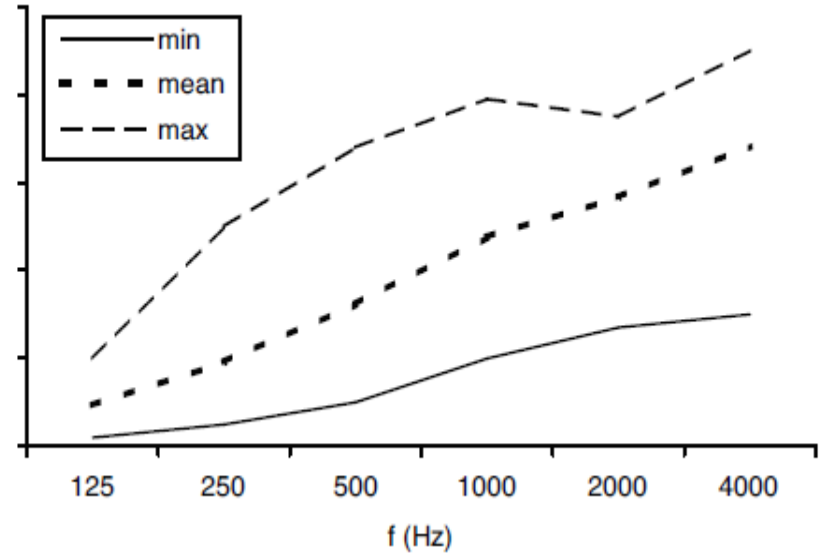


Závěsy a koberce

závěsy (Beranek)

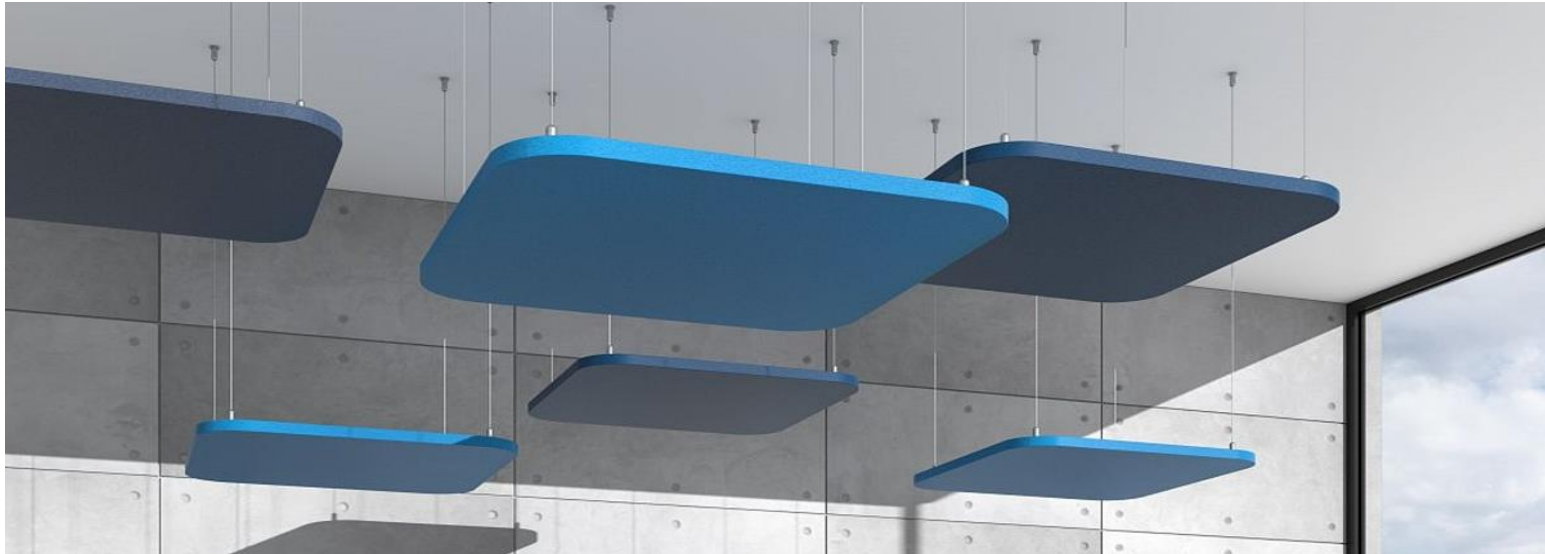


koberce (rozsah hodnot z různých zdrojů)

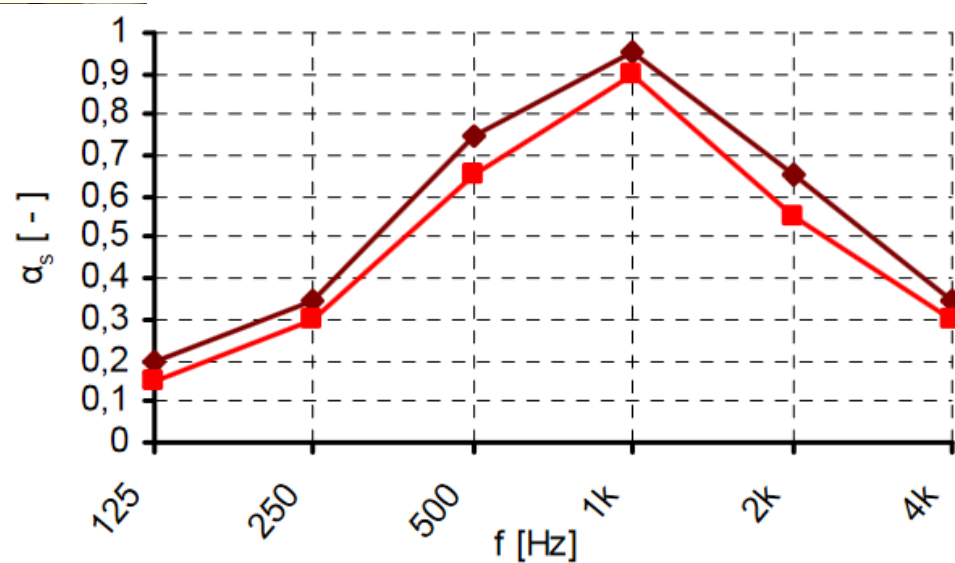


Zavěšené akustické prvky

- Akustické prvky porézního materiálu zpevněné mřížkou
 - díky ohybu vln dopadá vlnění na prvky ze všech stran, činitel zvukové pohltivosti vztažený na jednotku plochy prvku je větší než 1
 - s klesající vzdáleností mezi zavěšenými prvky se snižuje prostor k ohybu vln a činitel zvukové pohltivosti klesá



Zavěšené akustické prvky



—◆— SONIRAL A - hustota 1,67 ks/m²
NRC = 0,70 $\alpha_w = 0,55$ (M)

—■— SONIRAL B - hustota 1,67 ks/m²
NRC = 0,60 $\alpha_w = 0,50$ (M)

Prvky založené na rezonančním principu

- Princip
 - rezonanční soustava složená z akustické hmotnosti m_A , poddajnosti c_A a odporu
 - dopadne-li na soustavu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejich amplituda bude maximální na rezonančním kmitočtu
 - přestane-li vlnění na soustavu dopadat, bude po určitou dobu dokmitávat vlastním rezonančním kmitočtem – energie celého spektra dopadajícího vlnění je přeměněna na energii rezonančního spektra soustavy
 - rychlost poklesu amplitudy vlastních kmitů je závislá na tlumení rezonátoru, tj. na akustickém odporu soustavy – pro použití pro pohlcování zvuku musí být rezonanční soustava co nejvíce tlumena (co nejvíce energie bylo přeměněno v teplo)
 - Rezonanční kmitočet soustavy:

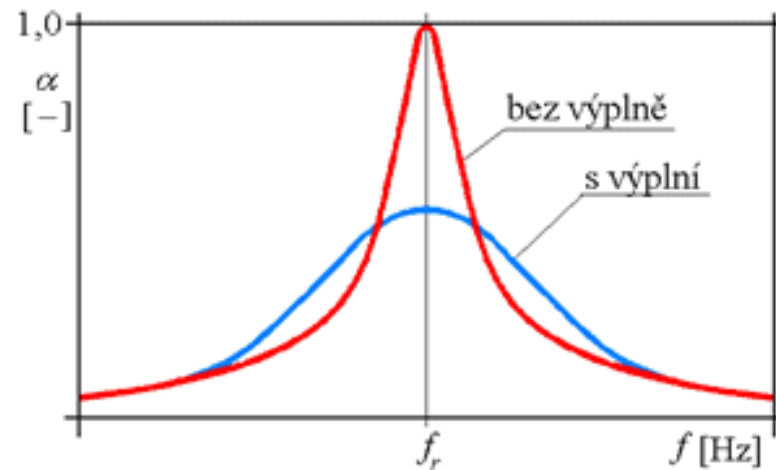
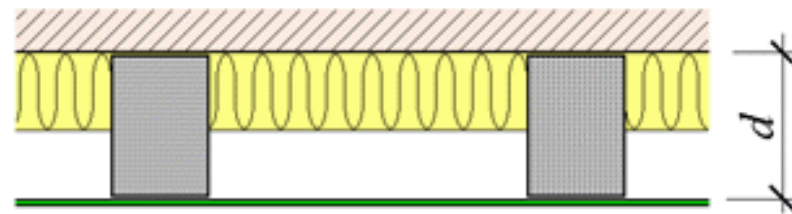
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m_A c_A}}$$

Prvky založené na rezonančním principu

- Typy akustických prvků založených na rezonančním principu:
 - 1) kmitající membrány (tenká deska nebo fólie umístěná v určité vzdálenosti od pevné stěny)
 - 2) kmitající desky (použití tuhé desky místo membrány)
 - 3) Helmholtzovy rezonátory (dutina o s hrdlem představujícím nehmotný píst vzduchového sloupce)
 - 4) sendvičové konstrukce

Kmitající membrány

- Prostor mezi membránou a stěnou bývá vyplněn porézním materiálem (odstup 5 až 10 mm od membrány), který přizpůsobuje impedanci membrány vlnovému odporu vzduchu a tím tlumí rezonanční soustavu
 - snížení činitele jakosti
 - zvýšení šířky pásma



Kmitající desky

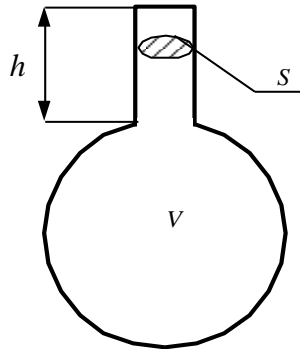
- Použití tuhé desky místo membrány
 - zvýšení hmotnosti membrány → snížení rezonančního kmitočtu
 - na okraji měkce upevněná, aby mohla kmitat jako píšť
 - mechanické ztráty třením v pružném uložení desky jsou vyšší než ztráty třením v porézním materiálu za deskou, proto porézní materiál nemá na tlumení soustavy příliš vliv



Helmholtzův rezonátor

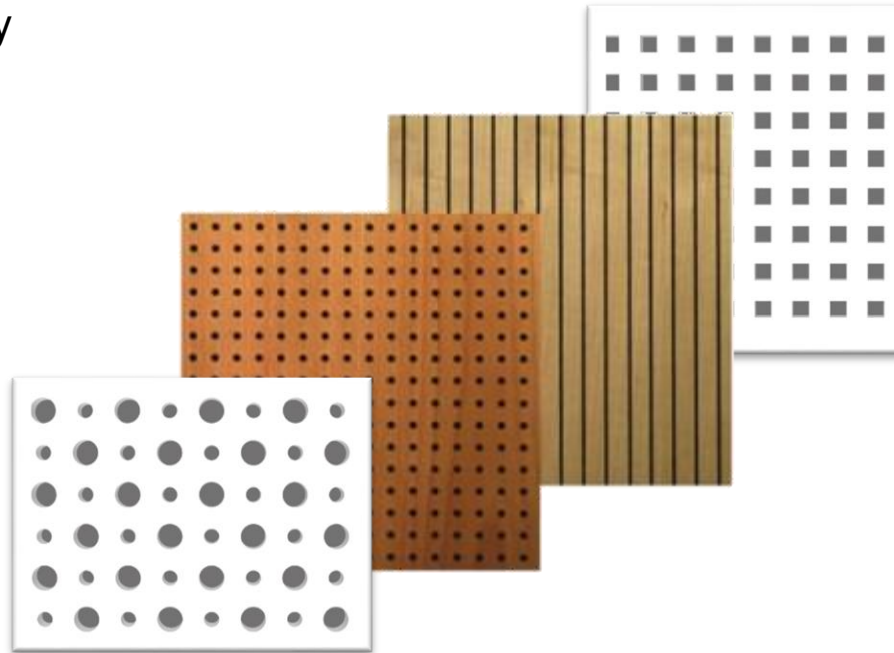
- Dutina o objemu V s hrdlem délky h a průřezu S
 - hmotnost vzduchu v hrdle představuje píst s hmotností m_A
 - pohybu pístu je kladen odpor r_A (tření v hrdle)
 - rezonanční kmitočet:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m_A c_A}} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(h + 2\Delta h)}}$$



Děrované desky

- Sdružené Helmholtzovy rezonátory
 - obvykle deska umístěná v určité vzdálenosti od pevné stěny

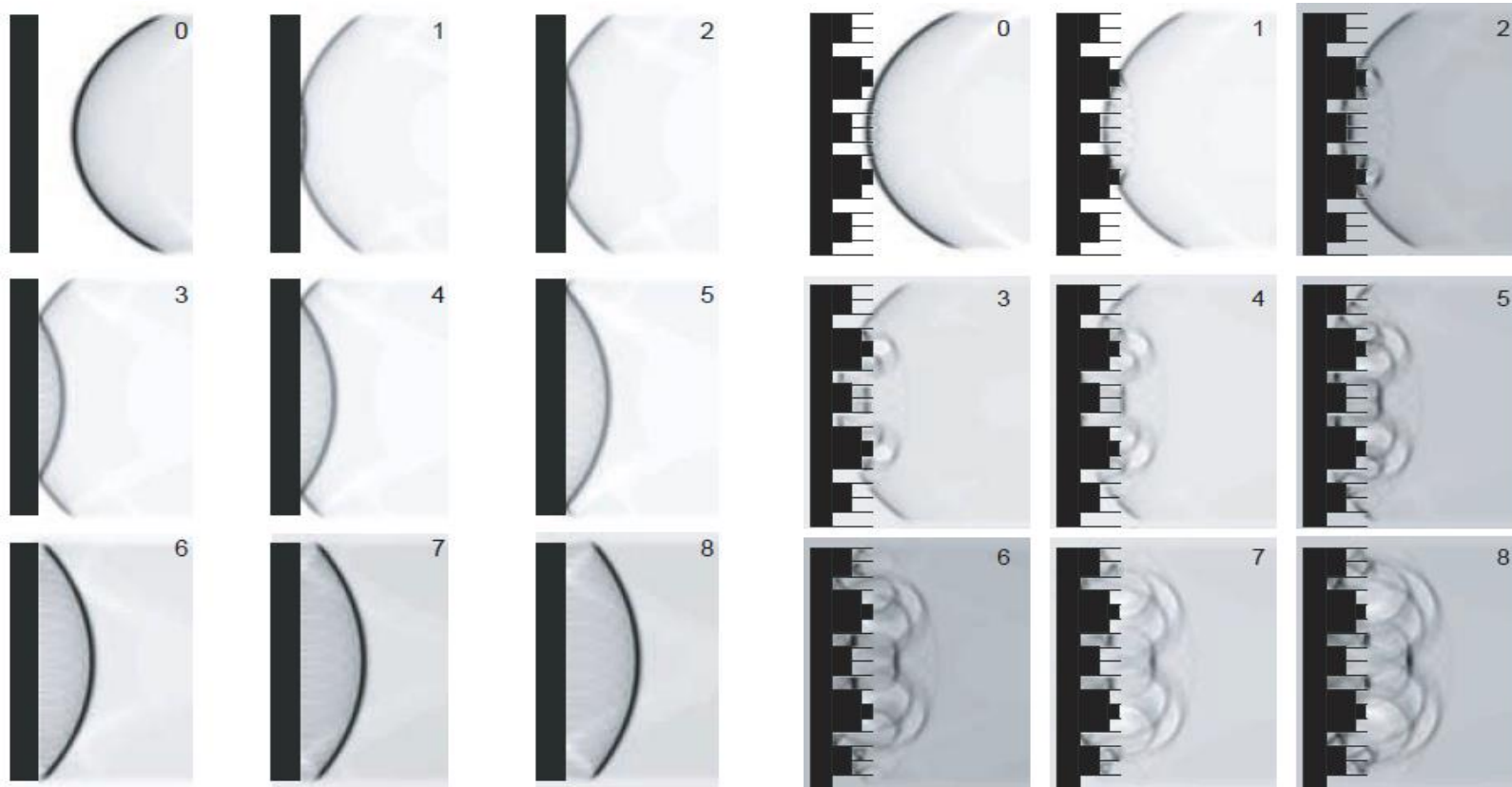


Akustické reflexní a difúzní prvky

Difuzory

- Prvky rozptylující zvukové vlnění
 - prevence/maskování ozvěny při zachování zvukové energie
 - subjektivní vjem prostorovosti a „obalení“ posluchače zvukem (místo směrové lokalizace odrazů)
 - zmírnění efektu hřebenového filtru zrcadlového odrazu (snížení změny barvy zvuku v malých prostorách, zlepšení srozumitelnosti řeči)
 - způsobují nejen prostorovou, ale i časovou disperzi vlnění (časové zpoždění vln na struktuře difuzoru)
- Difúzní odraz je závislý na poměru vlnové délky vlnění a nerovnosti povrchu

Rozptyl zvukových vln difuzory

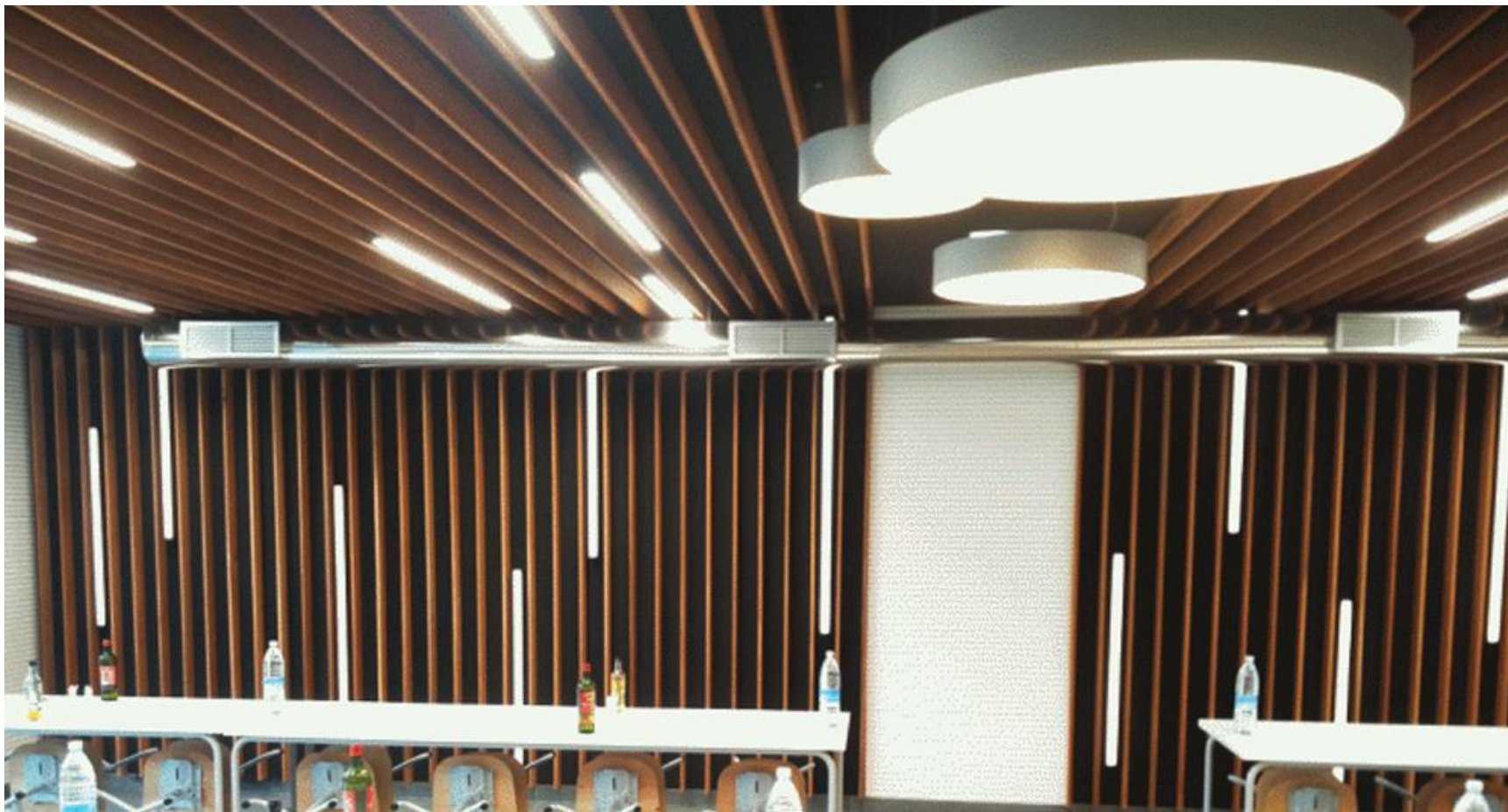


Cox, T., J., D'Antonio, P., *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, design and application*, 2nd ed. Taylor & Francis, NY, 2009. ISBN 978-0-415-47174-9

Ploché panely

- Ploché panely konečných rozměrů volně umístěné v prostoru
 - a) na nízkých kmitočtech nedochází k žádnému odrazu (pro největší vlnové délky je charakteristika stejná jako směrová funkce dipólu)
 - b) na vysokých kmitočtech dochází k zrcadlovému odrazu
 - c) na středních kmitočtech (relativně k velikosti panelu) dochází k částečnému odrazu a interferenci s přímou vlnou

Ploché panely

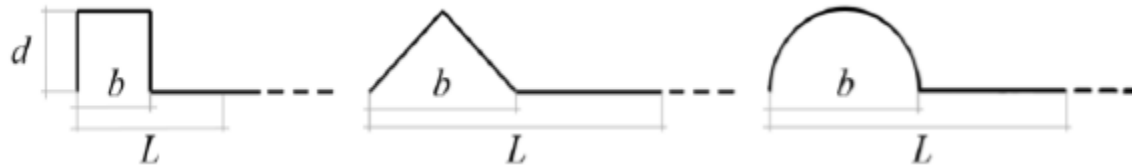


Ploché panely

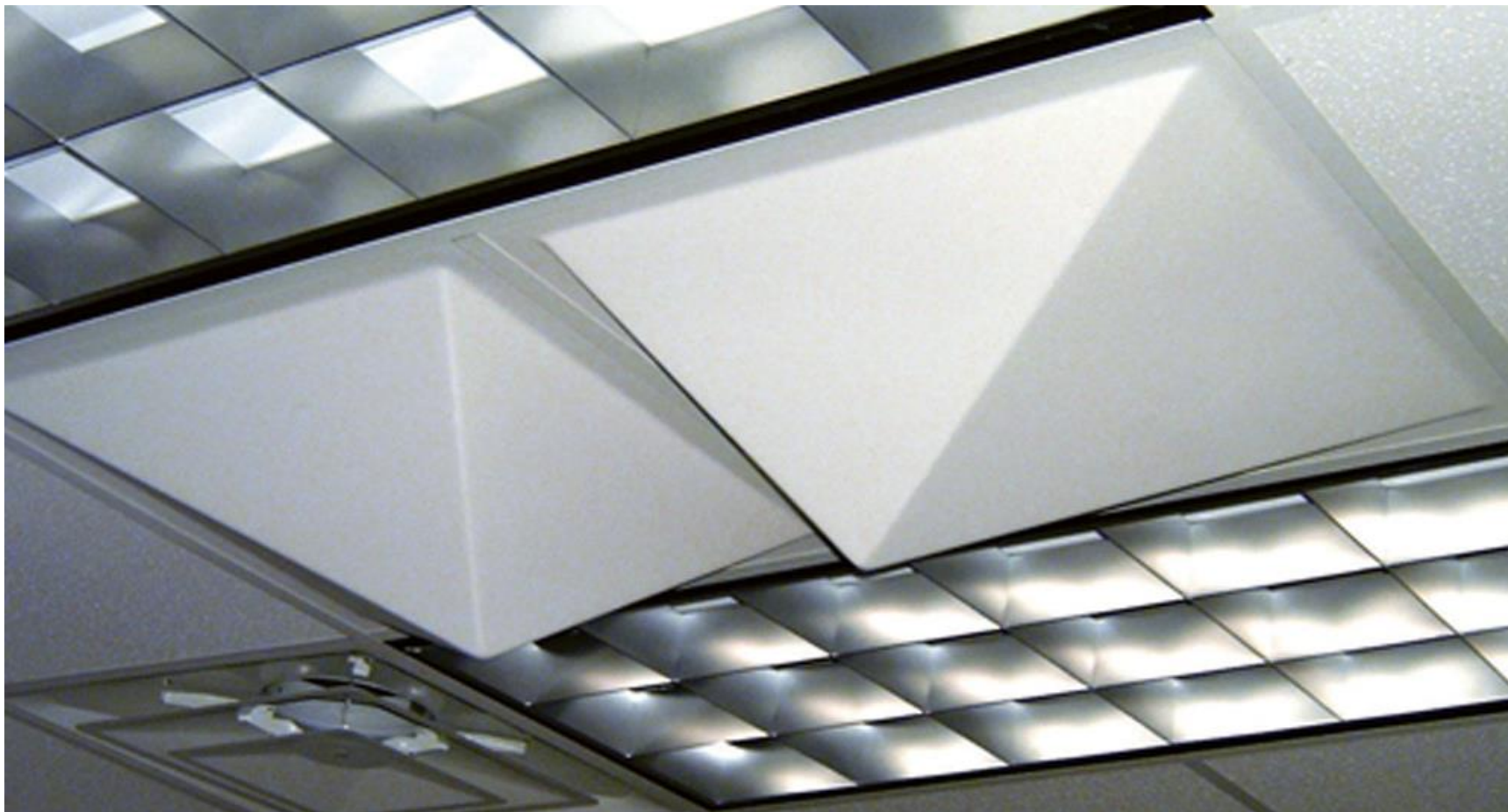


Geometrické difuzory

- Uspořádání základních geometrických tvarů do periodické struktury
- Nejlepších rozptylových účinků se dosáhne za podmínek:
 $d = \lambda_0/4$, kde λ_0 je vlnová délka návrhového kmitočtu f_0
 $d \approx L/4$ až $L/5$
 $d \leq b \leq L$
- Dobrého rozptylu se dosahuje pouze při vlnových délkách srovnatelných s délkou periodické struktury



Trojúhelníkové prvky



Pole trojúhelníkových prvků

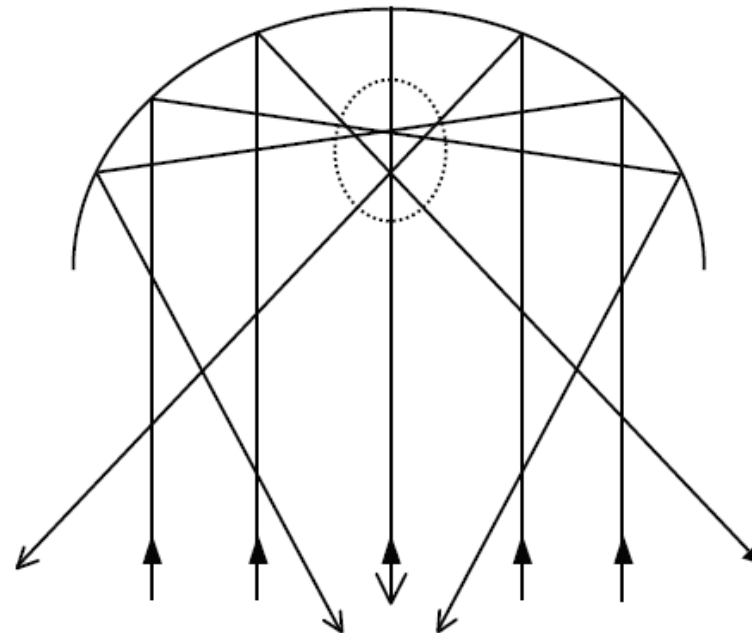


Pole trojúhelníkových prvků



Konkávní oblouky

- V závislosti na vzdálenosti posluchače od ohniska způsobuje efekt zaostření (silná energie odrazů v ohnisku, změna barvy zvuku a echa ve velké části prostoru)
- Za ohniskem nebo naopak ve velké vzdálenosti před ohniskem je rozptyluje energii rovnoměrně



Konkávni oblouky



Konvexní oblouky

- Samostatný půlválec má ideální prostorovou disperzi, ale způsobuje silný efekt hřebenového filtru, praxi je problém s realizací prvku dostatečných rozměrů
- Snížení prvku způsobí ztrátu disperze pro vlnění přicházející ze stran
- Při použití pole konvexních oblouků hraje roli jejich prostorové uspořádání, periodicity způsobují vznik výraznějších laloků
- Pro rozptyl v obou rovinách slouží hemisférické prvky

Konvexní oblouky



Konvexní oblouky



Konvexní oblouky



Konvexní oblouky

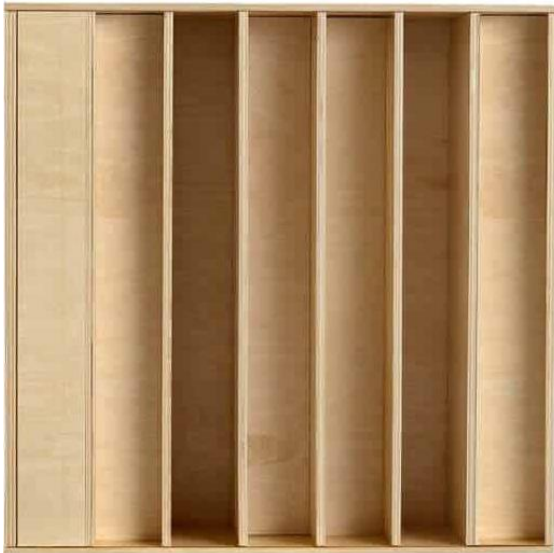


Schröderovy difuzory

- Série šachet stejné šířky a rozdílné hloubky
- Princip
 - zvukové vlny se odrážejí ode dna šachet a jsou znovu vyzařovány do prostoru
 - odražené vlny mají odlišnou fázi kvůli fázové změně způsobené dobou, po kterou se zvuk šíří v dané šachtě – v důsledku toho je směrová charakteristika určena hloubkou šachty
- Jednoduchý návrh a konstrukce
- Optimální difúze, možnost predikce rozptylu
- Používané typy:
 - Primitive Root Difuser (PRD) – navržený pomocí posloupnosti primitivních kořenů
 - Quadratic Residue Difuser (QRD) – navržený pomocí posloupnosti kvadratických reziduí
 - Maximum Length Sequence (MLS) – navržený pomocí sekvence maximální délky

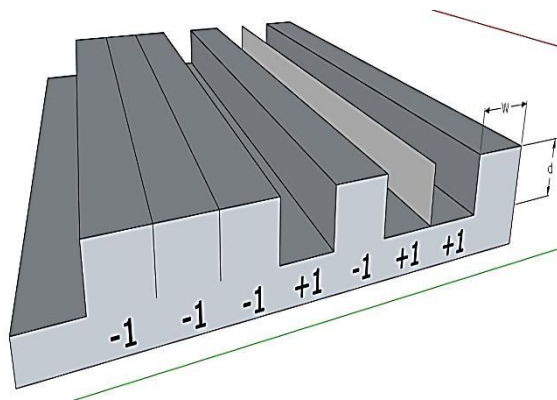
Difuzory PRD a QRD

- 1D – v jedné rovině se chová jako rovná plocha, ve druhé se uplatňuje difúzní odraz
- 2D – difúzní odraz se uplatňuje v obou rovinách



Difuzor typu MLS

- Šachty stejné hloubky
- Nevýhodou je malá šířka pásma, ve které difuzor pracuje efektivně



Fraktálové difuzory

- Prvky s více úrovněmi, kdy každá z úrovní rozptyluje zvuk v jiném pracovním pásmu
- Do jednotlivých šachet jsou vnořeny menší difuzory na základě fraktálového principu, jednotlivé úrovně difuzoru se chovají nezávisle
- Velká šířka pracovního pásma bez nutnosti zvětšovat délku sekvencí



Akustika uzavřených prostorů