

## Műszaki akusztika és zajcsökkentés (önálló felkészülést segítő tananyag)

Összeállította: Dr. Koscsó Gábor c. egyetemi docens (BME Áramlástan Tanszék)

12. előadás (2020.11.25.)

### Tartalom:

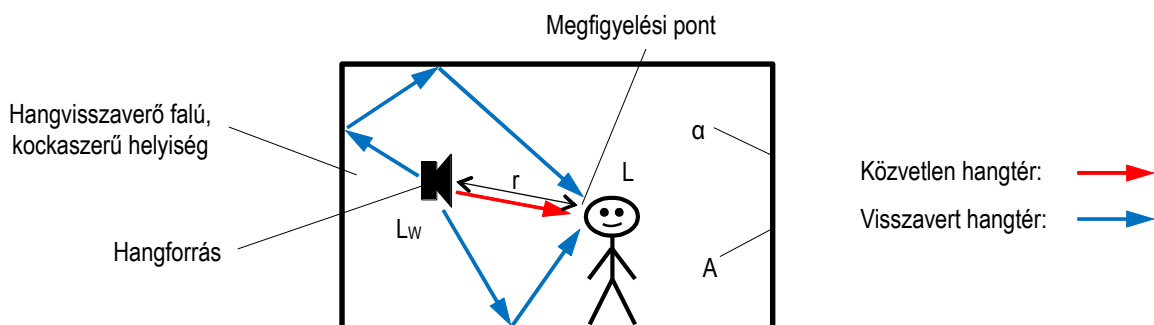
12.1. Hangvisszaverő falakkal határolt hangtér számítása (előadás vázlat)

12.2. Gyakorló feladatok

### 12.1. Hangvisszaverő falakkal határolt hangtér számítása (előadás vázlat)

Zajforrások számos esetben épületek belső terében működnek, ezért a szabadtéri esetek vizsgálata mellett a gépészeti zajvédelem egy másik fontos feladata a zajforrások által hangvisszaverő falakkal határolt térben létrehozott zajszint számítása. Az akusztikában alkalmazott hullámakusztikai modellezés (hullámegyenlet felírása és megoldás meghatározása) a falakkal határolt térben is alkalmazható. Használata azonban még egyszerű esetekben is körülményes. Szükséges egy olyan modellezési módszer, amely egyszerű, gyors, képes kezelni a bonyolult belső tereket és megfelelően pontos.

A számítás elvi alapja a korábban már felhasznált sugár- (geometriai) akusztikai modell. Sugárakusztikában a hang egy energia szállító csóva, amely képes fókuszálódni (összetartani), divergálni (széttartani), illetve határolófelülethez érve visszaverődni és elnyelődni. Homogén, nyugvó közegben a hangsugarak egyenesek, így a hangforrástól távolodva a hangsugárcsatorna keresztmetszet bővülése könnyen számolható (ld.: pontszerű hangforrás távolféle modell). Ez a modell határolt térben is alkalmazható, avval a kiegészítéssel, ha a hangsugárcsatorna határoló felülethez ér, a beeső hangteljesítmény egy része elnyelődik (kilép a belső térből), másik része visszaverődik (bent marad a belső térben). Így a helyiségben kijelölt megfigyelési pontban a hangforrásból közvetlenül és visszaverődések útján odaérkező hanghullámok (-sugarak) jelennek meg.



Hangvisszaverő fallal határolt helyiségben kialakuló közvetlen és visszavert hangtér

Ha a határolófelület jó hangvisszaverő, a hangteljesítmény nagy része, még számos visszaverődés után is a belső térben marad. A visszavert hangsugarak összessége a visszavert hangtér. A hangforrás által létrehozott közvetlen hangtérhez képest a visszavert hangtér jelenléte miatt a helyiségben a hang térfogati energiasűrűsége megnövekszik. Kocka-szerű helyiség geometria, jó hangvisszaverő belső felület és minden irányban egyenletesen, időben folyamatosan sugárzó hangforrás esetén, a visszavert hangsugár összetevők terjedési iránya és a térfogati hangenergia sűrűsége eloszlása kiegyenlített, úgynevezett diffúz visszavert hangtér jön létre.

A számítások során alkalmazott egyszerűsítő feltételek a lineáris akusztikai modellnél alkalmazott (homogén, sűrűdés- és hővetésmentes, kontinuum, izentropikus állapotváltozás, nyugvó közeg és kis amplitúdók) megkötetések, továbbá a szabadtéri terjedéshez hasonlóan a hangforrás minden irányban egyenletesen sugároz és a számítások a forrástól távol érvényesek. Kifejezetten a visszavert hangtér számításával kapcsolatban a helyiség alakja kockaszerű, a falak jó hangvisszaverők és a kialakuló visszavert hangtér tökéletesen diffúz. Az utóbbi három, az eddigiekhez képest új, egyszerűsítő feltétellel kapcsolatban a következő részletek fontosak.

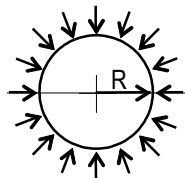
A visszavert hangtér megfelelő diffúzitása érdekében a helyiség belső befoglaló méretei közül a legnagyobb méret nem haladhatja meg a legkisebb háromszorosát. Ha a feltétel teljesül, a helyiség akusztikai szempontból kockaszerű. Az a, b és c befoglaló méret élhosszak esetében,

$$a \geq b \geq c \quad , \quad \text{a helyiség geometriája kockaszerű, ha} \quad 1 \leq a/c \leq 3$$

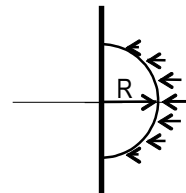
A diffúz hangtér kialakulásához a belső felületek jó hangvisszaverő képessége is fontos. Nagy hangelnyelő képességű anyaggal burkolt belső felület esetén a falra eső hangenergia nagy része elnyelődik és csak gyenge visszavert hangtér alakul ki. Tökéletesen diffúz, azaz kiegyenlített és irányítástól mentes hangtérben, a térfogati energiasűrűség a tér bármely pontján ugyanakkora, és a pillanatnyi visszavert hang intenzitás vektorok időátlaga nulla.

$$e_v(\underline{r}) = \text{áll.} \quad , \quad \text{illetve} \quad \bar{\underline{I}} = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{I}'_v dt = 0$$

Minden irányban egyenletesen sugárzó, jó hangvisszaverő falú, kockaszerű helyiség belső részén folyamatosan működő hangforrás, leszámítva a hangforrás közelébe eső részt (a közvetlen hangteret), diffúz hangteret hoz létre.



Gömb felületére eső intenzitás vektorok megoszlása diffúz hangtér belső részén



Fal mellett, félgömb felületre eső intenzitás vektorok falra merőleges összetevő megoszlása diffúz hangtérben

A diffúz hangtérből az R sugarú gömb felületére beeső hangteljesítmény számítása

A diffúz hangtér belső részén a teljes gömbfelületen áthaladó teljesítmény és a fal síkján elhelyezett félgömb felületre beeső hullámok falra merőleges összetevői által szállított hangteljesítmény hányadosa éppen a gömb és a gömb vetületi felület (ugyanolyan sugarú kör) területek hányadosa, egynegyed. Egy fiktív sugárzási felület (A) bevezetésével, a tökéletesen diffúz hangtér belső pontjában az átlagos visszavert hangintenzitás ( $I_v$ ) és a falra merőleges átlag intenzitás ( $I_{vmf}$ ) hányadosa,

$$\frac{P_{tg}/A}{P_{fgm}/A} = \frac{I_v}{I_{vmf}} = 4 \quad I_{vmf} = \frac{I_v}{4}$$

### Hangvisszaverő falakkal határolt térben elhelyezett pontszerű hangforrás hangtere:

A számítás célja egy hangvisszaverő falakkal határolt térben elhelyezett pontszerű hangforrás által kibocsátott hangteljesítményszint ( $L_w$ ) hatására a belső térben kialakuló hangnyomásszint ( $L$ ) meghatározása. Hangvisszaverő falakkal határolt térben működő hangforrás közvetlen és visszavert hangteret hoz létre. Tetszőleges megfigyelési pontban az eredő intenzitás ( $I_e$ ) a közvetlen hangtér és visszavert hangtér intenzitásainak ( $I_k$  és  $I_v$ ) összege,

$$I_e = I_k + I_v$$

A közvetlen hangtér esetében a pontszerű hangforrás által kibocsátott hangteljesítmény (P), a hangforrás és a megfigyelési pont közötti távolság (r), a sugárzási felület szűkítési tényező (D) és a közvetlen hangtér intenzitása ( $I_k$ ) közötti kapcsolat,

$$I_k = \frac{PD}{4\pi r^2} \quad \text{ahol,} \quad D = \frac{A_{gömb\ teljes}}{A_{gömb\ valós}}$$

A hangforrás bekapcsolását és az állandósult állapot kialakulását követően a visszavert hangtér számítását arra az egyszerű energetikai megfontolásra alapozzuk, hogy a visszavert hangtérbe bevezetett hangteljesítmény ( $P_{vbe}$ ) és a visszavert hangtérből kilépő hangteljesítmény ( $P_{vki}$ ) egymással egyenlő.

$$P_{vbe} = P_{vki}$$

A visszavert hangtérbe bevezetett teljesítmény a falakról, az első visszaverődés során a hangtérbe visszajutó hangteljesítmény a visszaverődési tényező ( $\bar{r}$ ) és a hangteljesítmény szorzata. (A hangforrásból közvetlenül kilépő teljesítmény ( $P$ ) értékét a közvetlen hangtér számításánál vettük figyelembe, így a visszavert hangtér bevezetett teljesítménye az első visszaverődés utáni rész.) A visszavert hangtérből kilépő teljesítmény ( $P_{vki}$ ) a falra merőlegesen beeső visszavert hangintenzitás ( $I_{vmf}$ ), a belső felület ( $A$ ) és a felülettel súlyozott átlagos hangelnyelési tényező ( $\bar{\alpha}$ ) szorzata,

$$P\bar{r} = P(1 - \bar{\alpha}) = I_{vmf}A\bar{\alpha} \quad \text{ahol,} \quad \bar{r} = 1 - \bar{\alpha}$$

A falra merőleges átlag intenzitás ( $I_{vmf}$ ) helyére a (10.1) összefüggés felhasználásával helyettesítsük be, és fejezzük ki az átlagos visszavert hangintenzitás ( $I_v$ ) értékét,

$$I_v = \frac{P(1 - \bar{\alpha})}{4A\bar{\alpha}} = \frac{4P}{\frac{A\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}} = \frac{4P}{R_T}$$

Ahol, a teremállandó:

$$R_T = \frac{A\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

illetve a felülettel súlyozott átlagos hangelnyelési tényező:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Ahol  $n$  a helyiség belső felületén a különböző hangelnyelési tényezőjű felület részek száma,  $\alpha_i$  az  $i$ -edik részfelület hangelnyelési tényezője,  $A_i$  az  $i$ -edik részfelület nagysága. A hangelnyelési tényező általában a frekvencia függvényében változik.  $P$  hangteljesítmény bevezetés hatására a hangvisszaverő falakkal határolt térben kialakuló eredő hangintenzitás,

$$I_e = I_k + I_v = \frac{PD}{4\pi r^2} + \frac{4P}{R_T} = P \left( \frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right)$$

Megfelelő mértékben eltávolodva a pontszerű hangforrástól, a gömb sugárzási felület közelítőleg síknak tekinthető, a hangnyomás és a részecskesebesség között a fáziskülönbség elhanyagolható, így az intenzitás és az effektív hangnyomás közötti kapcsolat,

$$\frac{p_{eff}^2}{\rho_0 a} = P \left( \frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right)$$

Szintes írásmódra áttérve (a kifejezés mindkét oldalát osszuk el  $10^{-12}$ -el és vegyük a 10 alapú logaritmusának a tízszeresét),

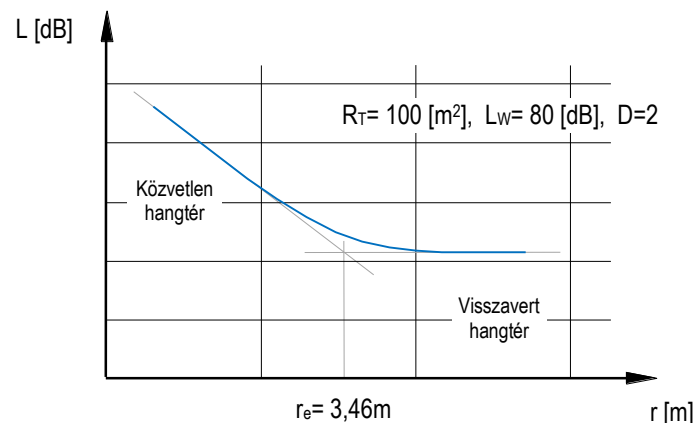
$$10\lg \frac{p_{eff}^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} + 10\lg \frac{400}{\rho_0 a} = 10\lg \frac{P}{10^{-12}} + 10\lg \left( \frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right)$$

Technikai normál állapotú levegőben ( $\rho_0 a \approx 408$  [kg/m<sup>2</sup>s]), hangvisszaverő falakkal határolt térben,  $R_T$  teremállandó esetén az  $L_W$  hangteljesítményszintű pontszerű hangforrástól  $r$  távolságban,  $D$  sugárzási felület szűkítési tényező esetén kialakuló hangnyomásszint ( $L$ ),

$$L = L_W + 10\lg \left( \frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right) \text{ [dB]}$$

### Megjegyzések:

- Hangvisszaverő falakkal határolt térben kialakuló hangnyomásszint ( $L$ ) a kibocsátott hangteljesítményszint ( $L_W$ ), a hangforrástól mért távolság ( $r$ ), a sugárzási felület szűkítési tényező ( $D$ ), és a teremállandó ( $R_T$ ) függvénye.
- Ugyanakkora hangteljesítmény és megfigyelési távolság esetén a visszavert hangtér jelenléte miatt hangvisszaverő falakkal határolt térben nagyobb zajterhelés alakul ki, mint szabad térben.
- Hangvisszaverő falakkal határolt térben a visszavert hangtér veszteségét elsősorban a falakon kialakuló hangelnyelés és nem a hangterjedés során kialakuló disszipáció okozza.
- A hangforrás közelében a közvetlen hangtér lesz meghatározó. Pontszerű hangforrás esetén a forrás és a megfigyelési pont közötti távolság kétszerezése esetén 6dB hangnyomásszint csökkenés jön létre.
- A hangforrástól távolabb a visszavert hangtér lesz meghatározó. A visszavert hangtérben a hangnyomásszint nagysága független a hangforrás és a megfigyelési pont közötti távolságtól.



Hangvisszaverő falakkal határolt helyiségben kialakuló hangnyomásszint a távolság ( $r$ ) függvényében (változatlan  $L_W$ ,  $D$  és  $R_T$  esetén) és az energia egyensúlyi félgömb felület sugara ( $r_e$ )

- A teremakusztikai energia egyensúlyi felületen (amely a hangvisszaverő alapszintre helyezett pontforrás esetén egy félgömb felület) a hangforrástól mért  $r_e$  távolságban a közvetlen- és a visszavert hangtér intenzitása egyenlő.

### 12.2. Gyakorló feladatok:

Gy.1. Határozza meg a tökéletesen diffúz visszavert hangtér fogalmát! Vezesse le egy nagy térfogatú, hangvisszaverő falakkal határolt térben elhelyezett pontszerű hangforrás által kisugárzott hangteljesítményszint és az ennek hatására a környezetében kialakuló hangtér hangnyomásszintje közötti összefüggést!

Gy.2. Határozza meg egy 20m x 13m alapterületű, 8m belmagasságú csarnokban a hangvisszaverő alapszintre helyezett hangforrástól 5m távolságban kialakuló A-hangnyomásszint értékét! A hangforrás által kisugárzott

hangteljesítmény ( $P_{\text{okt}}$ ), a terem belső felületére vonatkozó átlagos hangelnyelési tényező ( $\alpha_{\text{okt}}$ ), illetve az A-súlyozás relatív szintjei ( $\Delta L_{\text{Aokt}}$ ) az oktávsáv-középfrekvenciák ( $f_{\text{okt}}$ ) függvényében a következő táblázatban találhatóak.

$f_{\text{okt}}$ [Hz]	250	500	1k	2k	4k
$P_{\text{okt}}$ [W]	0,1	1	0,1	0,01	0,001
$\alpha_{\text{okt}}$ [-]	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02
$\Delta L_{\text{Aokt}}$ [dB]	-8,6	-3,2	0	1,2	1

Megoldás:

$f_{\text{okt}}$ [Hz]	250	500	1k	2k	4k
$L_{\text{Wokt}} = 10 \lg(P_{\text{okt}}/P_0)$ [dB]	110	120	110	100	90
$R_{\text{Tokt}} = A\alpha_{\text{okt}}/(1-\alpha_{\text{okt}}) = 1048 \cdot \alpha_{\text{okt}}/(1-\alpha_{\text{okt}})$ [m <sup>2</sup> ]	55,2	32,4	21,4	21,4	21,4
$L_{\text{okt}} = L_{\text{Wokt}} + 10 \lg(D/4\pi r^2 + 4/R_{\text{Tokt}}) = L_{\text{Wokt}} + 10 \lg(2/4\pi 5^2 + 4/R_{\text{Tokt}})$ [dB]	99,0	111,1	102,9	92,9	82,9
$L_{\text{okt}} + \Delta L_{\text{Aokt}}$ [dB]	90,4	107,9	102,9	94,1	83,9

$$A = 2 \cdot ((20+13) \cdot 8 + 20 \cdot 13) = 1048 \text{ m}^2$$

$$L_A = 10 \lg(10^{9,04} + 10^{10,79} + 10^{10,29} + 10^{9,41} + 10^{8,39}) \approx 109,3 \text{ [dB(A)]}$$

Gy.3. Visszavert hangtérben állandó teljesítményű hangforrás működésekor mérhető hangnyomásszint 84 dB. Ezt követően a helyiség belső felületének egyharmadát hangelnyelő anyaggal borítjuk be, amelynek hatására a hangnyomásszint 78 dB-re csökken. Határozza meg a hangelnyelő anyag hangelnyelési (veszteségi) tényezőjét, ha a helyiség eredeti felületének hangelnyelési tényezője,  $\alpha=0,05$ .

$$\Delta L = 6 = L_1 - L_2 = L_{W1} - L_{W2} + 10 \lg(4/R_{T1}) - 10 \lg(4/R_{T2}) = 10 \lg(R_{T2}/R_{T1}) =$$

$$10 \lg(\alpha_2 A(1 - \alpha_1)/\alpha_1 A(1 - \alpha_2)) = 10 \lg(\alpha_2(1 - 0,05)/0,05(1 - \alpha_2))$$

$$\text{Amelyből, } \alpha_2 \approx 0,1732$$

$$\text{illetve } \alpha_2 = (\alpha_1 2/3A + \alpha_{\text{hangelnyelő}} 1/3A)/A = 0,05 \cdot 2/3 + \alpha_{\text{hangelnyelő}} 1/3 \approx 0,1732$$

Amelyből, a hangelnyelő anyag hangelnyelési (veszteségi) tényező,  $\alpha_{\text{hangelnyelő}} \approx 0,42$

----