

Műszaki akusztika és zajcsökkentés (önálló felkészülést segítő tananyag)

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

11. előadás

Tartalom:

11. Hangvisszaverő falakkal határolt hangtér számítása (előadásvázlat)

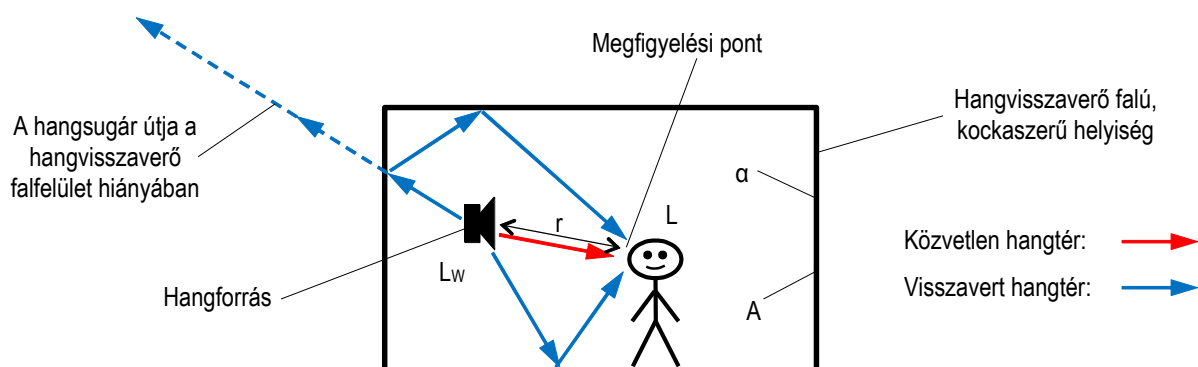
11.1. Hangvisszaverő falakkal határolt térben elhelyezett pontszerű hangforrás hangtere (előadás vázlat)

11.2. Gyakorló feladatok

11. Hangvisszaverő falakkal határolt hangtér számítása

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 „mindenható” hullámakusztikai modellezés (hullámegyenlet felírása és megoldás meghatározása) a falakkal határolt térben is alkalmazható. Használata azonban az analitikus és numerikus módszerek esetén egyaránt, még egyszerű esetekben is körülményes. Szükséges egy olyan modellezési módszer, amely egyszerű, gyors, képes kezelni az akusztikai szempontból bonyolult belső tereket és megfelelően pontos.

A számítás elvi alapja a korábban részletesen bemutatott sugár- (geometriai) akusztikai modell, amelyet most a határolófelületek jelenléte miatt kialakuló visszaverődésekből felépülő visszavert hangtérrel egészítünk. Sugárakusztikában a hang egy energiaszállító csóva, amely képes fókuszálódni (összetartani), divergálni (széttartani), illetve határolófelülethez érve visszaverődni és elnyelődni. Szabad térben, homogén, nyugvó közegben a hangsugarak egyenesek, így a hangforrástól távolodva a hangsugárcsatorna keresztmetszet bővülése és így a kialakuló hangtér könnyen számolható. 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 (ld.: ábra).



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 hangintenzitás, más megközelítésben a térfogati hangenergia sűrűség megnövekszik. Kockaszerű helyiségben, jó hangvisszaverő belső felület és minden irányban egyenletesen, időben folyamatosan sugárzó hangforrás esetén, a visszavert hangsugár összetevők terjedési iránya és a térfogati hangenergia sűrűség eloszlása kiegyenlített, úgynevezett

diffúz visszavert hangtér jön létre. Tökéletesen diffúz hangtér esetén a határoló felületről visszaverődő hanghullámok eredője, illetve a visszavert hangtérben kialakuló hangnyomásszint egyszerű energia mérleg alapján számítható.

A számítások során alkalmazott egyszerűsítő feltételek a lineáris akusztikai modellnél alkalmazott megkötések (homogén, sűrűdés- és hővetésmentes, kontinuum, izentropikus állapotváltozás, nyugvó közeg és kis amplitúdók), továbbá a hangforrás pontszerű, minden irányban egyenletesen sugároz, és a számítások a forrástól távol érvényesek. Kifejezetten a visszavert hangtér számításával kapcsolatos egyszerűsítések, 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 egyenletes (diffúz) kialakulása 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 élhossz esetében,

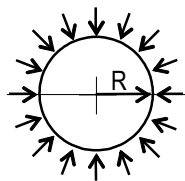
$$a \geq b \geq c \quad , \quad \text{a helyiség geometriája kockaszerű, ha} \quad 1 \leq a/c \leq 3$$

- A diffúz hangtér kialakulásához a belső felületek jó hangvisszaverő képessége is fontos. Ez a hagyományos épület szerkezeti elemek (pl.: vakolt téglafal, vasbeton födém) esetén rendszerint teljesül. Például egy festett vakolt téglafal esetén, közepes frekvencia tartományban a hangelnyelési tényező szokásos nagysága 0,06 (a visszaverődési tényező 0,94), így a hangsugár energiája még a tizenegyedik visszaverődés után is nagyobb, mint az elő beesés előtti energia fele ($0,94^{11} \approx 0,506$, szintekben kifejezve, a csökkenés nincs 3dB).

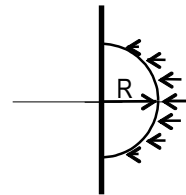
- Tökéletesen diffúz, azaz kiegyenlített és irányítástól mentes hangtérben, a térfogati energiasűrűség a tér bármely pontján ugyanakkora, és a pillanatnyi visszavert hang intenzitás vektorok időátlaga nulla (minden pillanatnyi intenzitás vektorhoz véges időn belül megjelenik az ellentett párja).

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

A későbbi számítások szempontjából fontos kérdés, hogy a tökéletesen diffúz hangtér belső pontjában az átlagos visszavert hangintenzitás (I_v) és a fal mentén a hangintenzitás vektorok falra merőleges összetevő átlaga (I_{vm}) hogyan viszonyul egymáshoz.



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

Az ábra alapján belátható, hogy a diffúz hangtér belső részén a teljes gömbfelületen áthaladó teljesítmény ($P_{tg} = 4\pi R^2 I'_v$) és a fal síkján elhelyezett félgömb felületre beeső hullámok falra merőleges összetevői által szállított hangteljesítmény ($P_{fgm} = \pi R^2 I'_v$) hányadosa éppen a gömb és a gömb vetületi felület (ugyanolyan sugarú kör) területek hányadosa, egynegyed. (A fal mentén csak a belső térfélből esnek be hullámok, és az elnyelés számításához azoknak is csak a merőleges vetületére van szükség.) 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_{vm}) hányadosa,

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

11.1. 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, ld.: előző ábra. 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 felületszűkítési tényező (D) és a közvetlen hangtér intenzitása (I_k) közötti kapcsolat,

$$I_k = \frac{PD}{4\pi r^2} \quad \text{ahol,} \quad D = \frac{A_{g\ddot{o}mb\ teljes}}{A_{g\ddot{o}mb\ val\acute{o}s}}$$

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 (P_{vbe}) a falakról, az első visszaverődés során a hangtérbe visszajutó hangteljesítmény a visszaverődési tényező (\bar{r}_v) és a hangteljesítmény (P) 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,

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

A falra merőleges átlag intenzitás (I_{vmf}) helyére az $I_{vmf} = I_v/4$ összefüggés felhasználásával helyettesítsük be, és fejezzük ki az átlagos visszavert hangintenzitás (I_v) értékét,

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

Ahol a teremállandó: $R_T = \frac{A\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$ és a felülettel súlyozott átlagos hangelnyelési tényező: $\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$

Az (n) a helyiség belső felületén a különböző hangelnyelési tényezőjű felület részek száma, α_i az i -edik részfelület hangelnyelési tényezője, A_i az i -edik részfelület nagysága. A hangelnyelési tényező általában a frekvencia függvényében változik, a számításokat a mérnöki gyakorlatban az oktávsváv középfrekvenciák függvényében végezzük el. A közvetlen hangtér és a visszavert hangtér intenzitások összegzésével, P hangteljesítmény bevezetés hatására a hangvisszaverő falakkal határolt térben kialakuló eredő hangintenzitás,

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

A közvetlen és a visszavert hangtérben egyaránt megfelelő mértékben eltávolodva a pontszerű hangforrástól, a gömb sugárzási felület a megfigyelési pont szűk környezetében közelítőleg síknak tekinthető, a hangnyomás és

a részecskesebesség között a fáziskülönbség elhanyagolható. A síkhullámokra vonatkozó intenzitás és az effektív hangnyomás közötti kapcsolat felhasználásával,

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

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

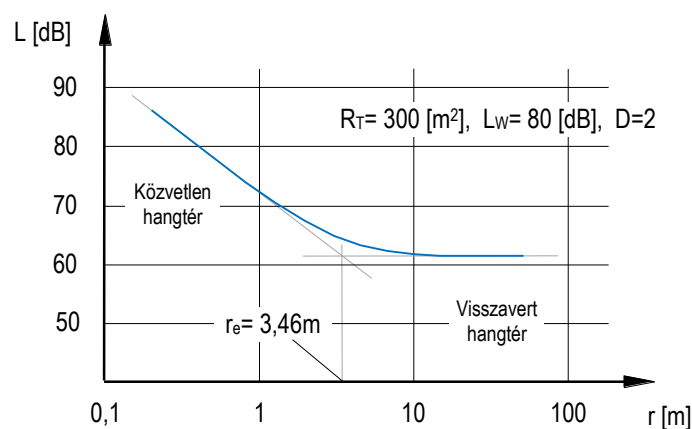
$$10 \lg \frac{p_{effe}^2}{(2 \cdot 10^{-5})^2} + 10 \lg \frac{400}{\rho_0 a} = 10 \lg \frac{P}{10^{-12}} + 10 \lg \left(\frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right)$$

Technikai normál állapotú levegőben ($\rho_0 a \approx 408$ [kg/m²s]), hangvisszaverő falakkal határolt térben, R_T teremállandó esetén az L_W hangteljesítményszintű pontszerű hangforrástól r távolságban, D sugárzási felületszűkítési 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 felületszűkítési tényező (D), és a teremállandó (R_T) függvénye.
- A teremállandó (R_T) a hangtérrel érintkező felület (helyiség belső felület, berendezési tárgyak, tartózkodó személyek) nagysága (A) és ugyanerre a felületre vonatkozó felülettel súlyozott átlagos hangelnyelési tényező ($\bar{\alpha}$) értékéből számítható.
- Ugyanakkora hangteljesítmény és hangforrástól mért távolság esetén a visszavert hangtér jelenléte miatt hangvisszaverő falakkal határolt térben nagyobb zajterhelés alakul ki, mint szabad térben.
- Hallható frekvencia tartományban 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 (ld.: ábra).



Hangvisszaverő falakkal határolt helyiségben kialakuló hangnyomásszint (L) a pontforrástól mért távolság (r) függvényében (változatlan L_W , D és R_T esetén) és az energiaegyensúlyi gömbfelület sugár (r_e)

- A hangforrástól távolabb a visszavert hangtér lesz meghatározó. A visszavert hangtérben a hangnyomásszint nagysága független a hangforrás és a megfigyelési pont közötti távolságtól (ld.: ábra).

- A teremakusztikai energiaegyensúlyi 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 (ld.: ábra). Hangvisszaverő falakkal határolt térben a beszélő személytől (hangforrástól) mért energiaegyensúlyi sugáron belül a beszédérthetőség jó, attól távolodva folyamatosan romlik.

11.2. 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_{okt}), a terem belső felületére vonatkozó átlagos hangelnyelési tényező (α_{okt}), illetve az A-súlyozás relatív szintjei (ΔL_{Aokt}) az oktávsvág-középfrekvenciák (f_{okt}) függvényében a következő táblázatban találhatóak.

f_{okt} [Hz]	250	500	1k	2k	4k
P_{okt} [W]	0,1	1	0,1	0,01	0,001
α_{okt} [-]	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02
ΔL_{Aokt} [dB]	-8,6	-3,2	0	1,2	1

Megoldás:

f_{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 ²]	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, $\alpha_{\text{hangelnyelő}} \approx 0,42$
