



SZÉCHENYI ISTVÁN
EGYETEM
GYŐR

Hangtan III.

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

2006. szeptember 29.

Magyarország célba ér



Készült a HEFOP 3.3.1-P.-2004-09-0102/1.0 pályázat támogatásával



A hang gyengülése, elnyelődése

- Bevezetés

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A hang gyengülése, elnyelődése



A hang gyengülése,
elnyelődése

• **Bevezetés**

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

A gyakorlat szempontjából igen fontos, hogyan gyengül a hang

- **közeghatárokon** áthaladva
- **falakon, rétegeken** áthaladva
- **közegek belsejében**



A hang gyengülése,
elnyelődése

• **Bevezetés**

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

A gyakorlat szempontjából igen fontos, hogyan gyengül a hang

- **közeghatárokon** áthaladva
- **falakon, rétegeken** áthaladva
- **közegek belsejében**

A gyengülés okai:

- szétszóródás (geometria ok)
- hangelnyelődés (fizikai ok)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés nagy méretű közeghatáron
- A reflexió és az abszorpció tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpció együttható

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagy méretű közeghatáron



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- A reflexiós és az abszorpciós tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagyméretű közeghatáron

Nagyméretű = a méretek sokkal nagyobbban λ -nál.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- A reflexiós és az abszorpciós tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

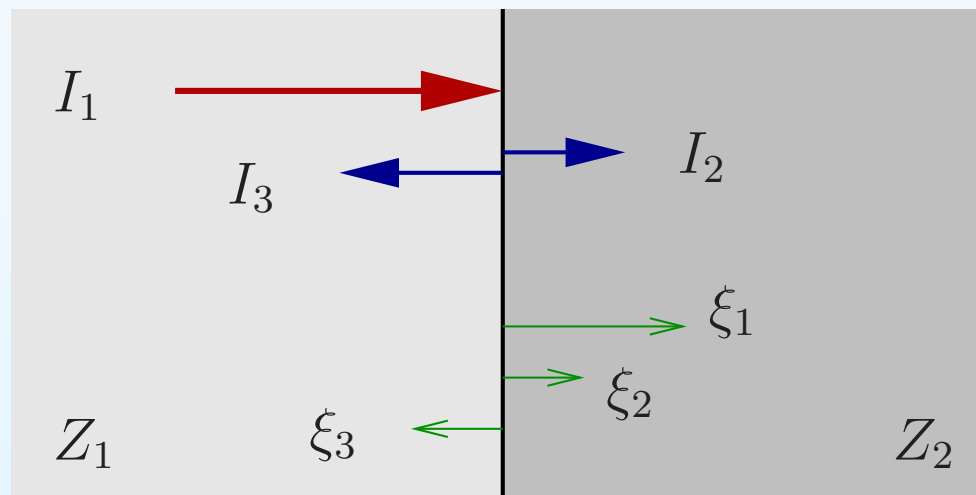
Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagyméretű közeghatáron

Nagyméretű = a méretek sokkal nagyobbban λ -nál.

Vizsgáljuk először a közeghatárra **merőlegesen beeső hang** esetét!

Közeghatáron a hang egy része visszaverődik, más része behatol az új közegbe.





A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- A reflexió és az abszorpció tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

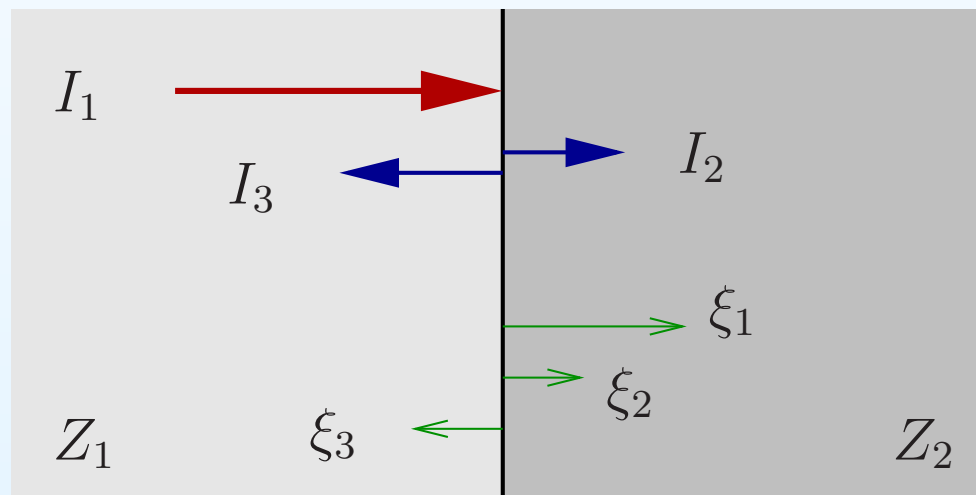
Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagymeretű közeghatáron

Nagymeretű = a méretek sokkal nagyobbak λ -nál.

Vizsgáljuk először a közeghatárra **merőlegesen beeső hang** esetét!

Közeghatáron a hang egy része visszaverődik, más része behatol az új közegbe.



Energiamegmaradás: $I_1 = I_2 + I_3$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- A reflexió és az abszorpció tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

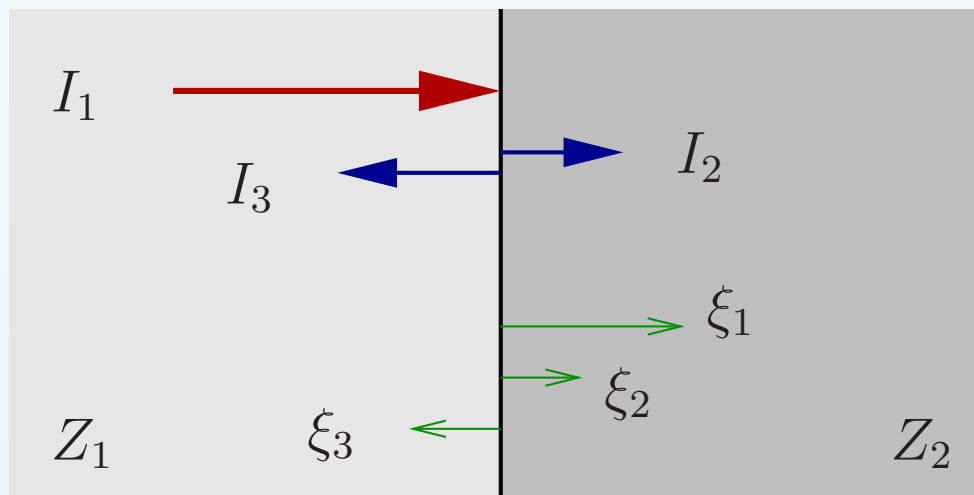
Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagyméretű közeghatáron

Nagyméretű = a méretek sokkal nagyobbak λ -nál.

Vizsgáljuk először a közeghatárra **merőlegesen beeső hang** esetét!

Közeghatáron a hang egy része visszaverődik, más része behatol az új közegbe.



Energiamegmaradás: $I_1 = I_2 + I_3$.

$I = Zv_m^2/2$ miatt ez átírható: $Z_1v_{m,1}^2 = Z_2v_{m,2}^2 + Z_1v_{m,3}^2$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- A reflexiós és az abszorpciós tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

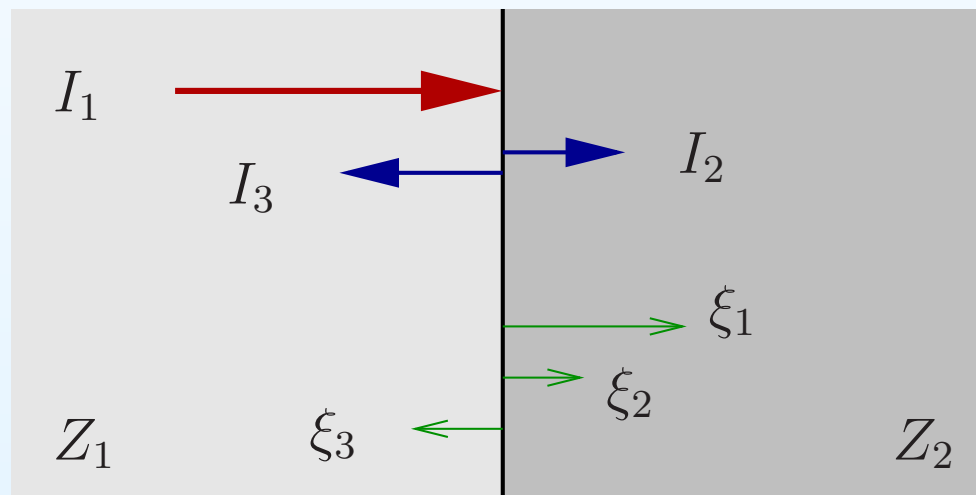
Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagyméretű közeghatáron

Nagyméretű = a méretek sokkal nagyobbban λ -nál.

Vizsgáljuk először a közeghatárra **merőlegesen beeső hang** esetét!

Közeghatáron a hang egy része visszaverődik, más része behatol az új közegbe.



Energiamegmaradás: $I_1 = I_2 + I_3$.

$I = Z v_m^2 / 2$ miatt ez átírható: $Z_1 v_{m,1}^2 = Z_2 v_{m,2}^2 + Z_1 v_{m,3}^2$.

$v_m = \xi_m \omega$ alapján viszont: $Z_1 (\xi_{m,1}^2 - \xi_{m,3}^2) = Z_2 \xi_{m,2}^2$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- A reflexiós és az abszorpciós tényező
- Hangvisszaverődés a gyakorlatban
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés nagyméretű közeghatáron (folyt.)

A közeghatáron a két közeg nem válik szét, ezért:

$$\xi_1(0,t) + \xi_3(0,t) = \xi_2(0,t).$$

Harmonikus hanghullámok esetén ez az ismert módon a rezgések összeadását jelenti. Jogos feltenni, hogy a továbbmenő hang azonos fázisú, mint az eredeti.

$\xi_{m,2}$ és $\xi_{m,1}$ viszonya függvényében $\xi_{m,3}$ kétféleképpen számolandó:

a) Ha $\xi_{m,1} > \xi_{m,2}$, akkor $\xi_{m,3} = \xi_{m,1} - \xi_{m,2}$.

b) Ha $\xi_{m,1} < \xi_{m,2}$, akkor $\xi_{m,3} = \xi_{m,2} - \xi_{m,1}$.

Elemi számításokkal megmutatható, hogy a két esetben:

$$\text{a) } \frac{\xi_{m,3}}{\xi_{m,1}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad \text{ha } \xi_{m,1} > \xi_{m,2}.$$

$$\text{b) } \frac{\xi_{m,3}}{\xi_{m,1}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \text{ha } \xi_{m,1} < \xi_{m,2}.$$

A reflexió és az abszorpció tényező

A gyakorlatban az intenzitások a lényegesek.

Reflexió tényező: a visszavert és a beeső hangintenzitások aránya.

$$R = \frac{I_3}{I_1} = \frac{\frac{1}{2} Z_1 \omega^2 \xi_{m,3}^2}{\frac{1}{2} Z_1 \omega^2 \xi_{m,1}^2} = \left(\frac{\xi_{m,3}}{\xi_{m,1}} \right)^2.$$

Könnyű belátni, hogy az előző két eset mindegyikében ugyanazt az eredményt kapjuk:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

A reflexió és az abszorpció tényező

A gyakorlatban az intenzitások a lényegesek.

Reflexió tényező: a visszavert és a beeső hangintenzitások aránya.

$$R = \frac{I_3}{I_1} = \frac{\frac{1}{2} Z_1 \omega^2 \xi_{m,3}^2}{\frac{1}{2} Z_1 \omega^2 \xi_{m,1}^2} = \left(\frac{\xi_{m,3}}{\xi_{m,1}} \right)^2.$$

Könnyű belátni, hogy az előző két eset mindegyikében ugyanazt az eredményt kapjuk:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Abszorpció tényező: a behatoló és a beeső hangintenzitások aránya.

$$a = \frac{I_2}{I_1} = 1 - R = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A reflexió és az abszorpció tényező (folyt.)

Néhány fontos eset:

- $Z_1 = Z_2$. Ekkor $R = 0$, $a = 1$, azaz nincs visszaverődés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A reflexió és az abszorpció tényező (folyt.)

Néhány fontos eset:

- $Z_1 = Z_2$. Ekkor $R = 0$, $a = 1$, azaz nincs visszaverődés.
- $Z_2 \gg Z_1$. Ekkor $R \approx 1$, $a \approx 0$, azaz majdnem teljes a visszaverődés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- **A reflexió és az
abszorpció tényező**

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A reflexió és az abszorpció tényező (folyt.)

Néhány fontos eset:

- $Z_1 = Z_2$. Ekkor $R = 0$, $a = 1$, azaz nincs visszaverődés.
- $Z_2 \gg Z_1$. Ekkor $R \approx 1$, $a \approx 0$, azaz majdnem teljes a visszaverődés.
- $Z_2 \ll Z_1$. Ekkor is $R \approx 1$, $a \approx 0$, azaz majdnem teljes a visszaverődés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

- **A reflexió és az
abszorpció tényező**

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A reflexió és az abszorpció tényező (folyt.)

Néhány fontos eset:

- $Z_1 = Z_2$. Ekkor $R = 0$, $a = 1$, azaz nincs visszaverődés.
- $Z_2 \gg Z_1$. Ekkor $R \approx 1$, $a \approx 0$, azaz majdnem teljes a visszaverődés.
- $Z_2 \ll Z_1$. Ekkor is $R \approx 1$, $a \approx 0$, azaz majdnem teljes a visszaverődés.

Érdekes, hogy ekkor elemi számításokkal bebizonyítható, hogy:

$$\frac{\xi_{m,2}}{\xi_{m,1}} \approx 2$$

Ez nem ellentmondás: bár az új közegben sokkal kisebb a hangintenzitás, az amplitúdó lehet nagyobb, mert ekkor az új közeg sokkal „gyengébb”. (Kisebb akusztikus impedanciájú.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: *Hány decibellel csökken a hang hangnyomásszintje, miközben merőlegesen levegőből vízbe hatol? Hányadrésze verődik vissza a hangintenzitásnak?*



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron
- A reflexió és az
abszorpció tényező
- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban
- Néhány tapasztalati
érték
- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: *Hány decibellel csökken a hang hangnyomásszintje, miközben merőlegesen levegőből vízbe hatol? Hányadrésze verődik vissza a hangintenzitásnak?*

Megoldás: A levegő akusztikus impedanciája 20°C-on:
 $Z_l = 416 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$, a vízé: $Z_v = 1,48 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$.
Az abszorpció tényező tehát:

$$a_{l,v} = \frac{4Z_v Z_l}{(Z_v + Z_l)^2} = 0,00112.$$

Ez intenzitásarányt jelent. Ebből egyszerűen kiszámolható a hangnyomásszint-különbség:

$$\Delta n = n_2 - n_1 = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg a_{l,v} = -29,5 \text{ dB}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: *Hány decibellel csökken a hang hangnyomásszintje, miközben merőlegesen levegőből vízbe hatol? Hányadrésze verődik vissza a hangintenzitásnak?*

Megoldás: A levegő akusztikus impedanciája 20°C-on:
 $Z_l = 416 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$, a vízé: $Z_v = 1,48 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$.

Az abszorpció tényező tehát:

$$a_{l,v} = \frac{4Z_v Z_l}{(Z_v + Z_l)^2} = 0,00112.$$

Ez intenzitásarányt jelent. Ebből egyszerűen kiszámolható a hangnyomásszint-különbség:

$$\Delta n = n_2 - n_1 = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg a_{l,v} = -29,5 \text{ dB}$$

A hangintenzitás R -ed része verődik vissza: $R = 1 - a = 0,9989$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Még egy példa

Példa: Az ultrahang tartományban az emberi izom akusztikus impedanciája $Z_i = 1,7 \cdot 10^6$, a zsír pedig $Z_z = 1,33 \cdot 10^6$. (SI-egységekben kifejezve.)

Hányadrésze verődik vissza a hangintenzitásnak az izom-zsír határról?



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

- **A reflexiós és az
abszorpciós tényező**

- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Még egy példa

Példa: Az ultrahang tartományban az emberi izom akusztikus impedanciája $Z_i = 1,7 \cdot 10^6$, a zsír pedig $Z_z = 1,33 \cdot 10^6$. (SI-egységekben kifejezve.)

Hányadrésze verődik vissza a hangintenzitásnak az izom-zsír határról?

Megoldás: Itt pusztán a reflexiós tényezőt kell meghatároznunk:

$$R = \left(\frac{Z_i - Z_z}{Z_i + Z_z} \right)^2 = 0,0149.$$

Tehát a hangintenzitás mintegy 1,5%-a verődik csak vissza az izom-zsír határról.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- **Hangvisszaverődés a
gyakorlatban**

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés a gyakorlatban

A gyakorlatban sokszor nem teljesülnek a korábbi feltételek:

- nem merőleges a beesés
- nem sík felületről történik a visszaverődés
- nem mélyebb a hullámhossznál a visszaverő anyag



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

- A reflexió és az
abszorpció tényező

- **Hangvisszaverődés a
gyakorlatban**

- Néhány tapasztalati
érték

- Az átlagos
abszorpció együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés a gyakorlatban

A gyakorlatban sokszor nem teljesülnek a korábbi feltételek:

- nem merőleges a beesés
- nem sík felületről történik a visszaverődés
- nem mélyebb a hullámhossznál a visszaverő anyag

Ezeket számításokkal igen nehéz követni. Pár dolgot azonban sejthetünk a korábbiakból.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés nagyméretű közeghatáron
- A reflexiós és az abszorpciós tényező
- **Hangvisszaverődés a gyakorlatban**
- Néhány tapasztalati érték
- Az átlagos abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

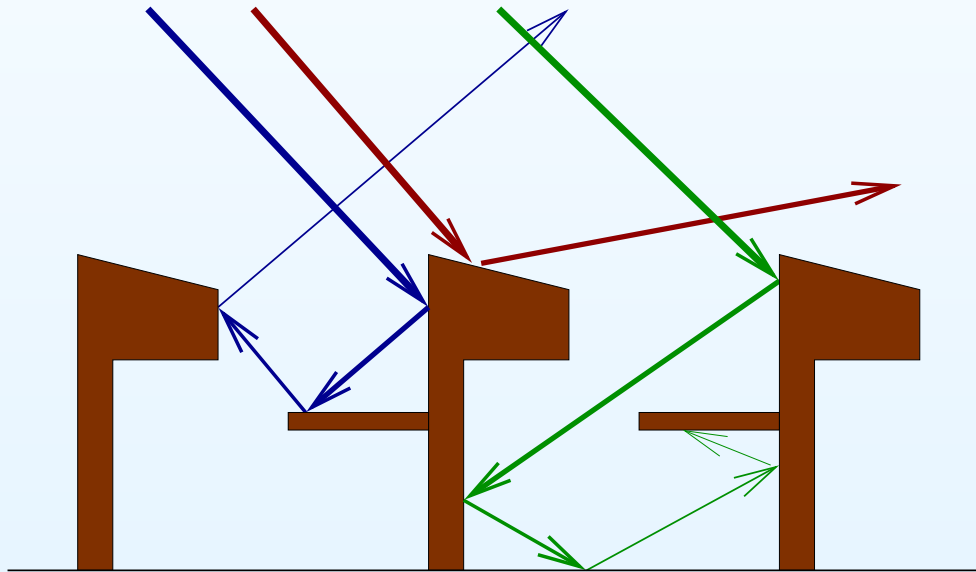
Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hangvisszaverődés a gyakorlatban (folyt.)

- Nagy akusztikus impedancia-különbség nagy reflexiós tényezőt jelent.
- Egyenetlen felületek reflexiós tényezője kisebb lesz, mert az egyenetlenségeken többszörös visszaverődések zajlanak le, mindig egy kis elnyeléssel.



- Vékony réteg mögötti nagy akusztikus impedanciájú felület csökkenti az eredő abszorpciós tényezőt.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

● Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

● A reflexiós és az
abszorpciós tényező

● Hangvisszaverődés a
gyakorlatban

● **Néhány tapasztalati
érték**

● Az átlagos
abszorpciós együttható

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Néhány tapasztalati érték

felület típusa	$\alpha(250 \text{ Hz})$	$\alpha(1 \text{ kHz})$	$\alpha(4 \text{ kHz})$
akuszt. burkolat, merev szerelés	0,4	0,8	0,4
akuszt. burkolat, függesztett	0,7	0,7	0,7
akuszt. vakolat	0,2	0,6	0,7
normál vakolat	0,15	0,05	0,05
gipszkarton (12 mm)	0,1	0,04	0,1
farostlemez (6 mm)	0,3	0,1	0,1
beton falazóelem, festett	0,05	0,07	0,1
beton falazóelem, festetlen	0,4	0,3	0,3
öntött beton (sima)	0,01	0,02	0,03
tégla	0,03	0,04	0,07
vastag szőnyeg betonon	0,06	0,4	0,6
vastag szőnyeg alátéttel	0,3	0,5	0,7
fa padló	0,3	0,2	0,1
normál ablaküveg	0,2	0,1	0,04
vastag síküveg	0,06	0,03	0,02
kárpitozott szék, üres	0,4	0,7	0,6
kárpitozott szék, foglalt	0,6	0,9	0,9
fa szék, üres	0,03	0,06	0,05
fa szék, foglalt	0,4	0,7	0,7



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

- Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron
- A reflexió és az
abszorpció tényező
- Hangvisszaverődés a
gyakorlatban
- Néhány tapasztalati
érték
- **Az átlagos
abszorpció együttható**

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az átlagos abszorpció együttható

Egy terem belső felülete általában különböző anyagokból áll.

Átlagos abszorpció együttható: az egyes burkolóanyagok területtel súlyozott átlaga.

Ha az i . anyagtípus területe A_i , akkor egy terem átlagos abszorpció együtthatója n fajta anyag esetén:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i a_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

**Hang elnyelődés
közegek belsejében**

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hang elnyelési tényezője
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hang elnyelődés közegek belsejében



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

● **Bevezetés**

● Az elnyelés
teljesítménye

● Síkhullám
csillapodása

● Gömbhullám
csillapodása

● Vonalsugárzó
hangjának csillapodása

● A levegő
hangelnyelési tényezője

● Néhány közeg
hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

Közegek belsejében a hang által szállított összenergia fokozatosan csökken.

Ennek oka a közegek belső súrlódása, ami a hang energiájának egy részét hővé alakítja át.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

● **Bevezetés**

● Az elnyelés
teljesítménye

● Síkhullám
csillapodása

● Gömbhullám
csillapodása

● Vonalsugárzó
hangjának csillapodása

● A levegő
hang elnyelési tényezője

● Néhány közeg
hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

Közegek belsejében a hang által szállított összenergia fokozatosan csökken.

Ennek oka a közegek belső súrlódása, ami a hang energiájának egy részét hővé alakítja át.

Jogos feltételezés: az abszorpció miatti energiasűrűség-csökkenés arányos a pillanatnyi e energiasűrűséggel és a vizsgált időszakasz hosszával:

$$\Delta e_a = -\alpha e \Delta t$$

(Az a alsó index azért kell, mert más hatás is van, ami csökkenti az energiasűrűséget.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- **Az elnyelés teljesítménye**
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt térben

Hangelnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az elnyelés teljesítménye

Korábbról tudjuk, hogy $I = ec$, ezért:

$$\Delta e_a = -\alpha \frac{I}{c} \Delta t.$$

Egy ΔV térfogatú tartomány energiacsökkenése $E = e\Delta V$ miatt:

$$\Delta E_a = -\frac{\alpha}{c} I \Delta V \Delta t$$

Az elnyelődés teljesítménye tehát:

$$P_a = \frac{\Delta E_a}{\Delta t} = -\frac{\alpha}{c} I \Delta V = -m I \Delta V$$

m neve: **lineáris abszorpciós tényező**.

Ez egy, a közegre jellemző mennyiség, mely függ a közeg adataitól és a hang frekvenciájától.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- **Síkhullám csillapodása**
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

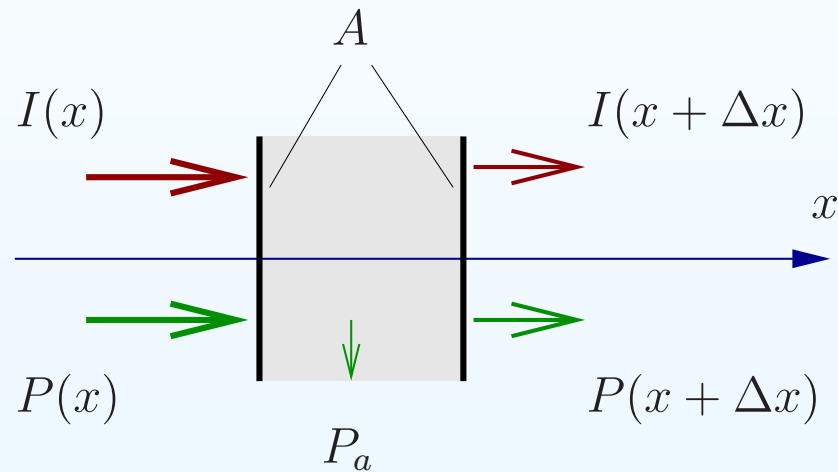
Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Síkhullám csillapodása

Az x -tengely mutasson a terjedés irányába és vizsgáljunk egy A keresztmetszetű, x és egy $x + \Delta x$ közé eső térfogatot:



Nyilván: $\Delta V = A\Delta x$, és $I(x + \Delta x) < I(x)$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- **Síkhullám csillapodása**
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

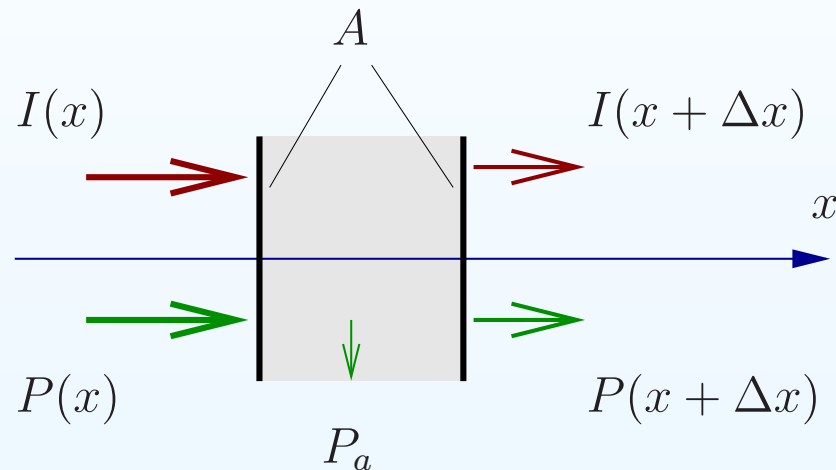
Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Síkhullám csillapodása

Az x -tengely mutasson a terjedés irányába és vizsgáljunk egy A keresztmetszetű, x és egy $x + \Delta x$ közé eső térfogatot:



Nyilván: $\Delta V = A\Delta x$, és $I(x + \Delta x) < I(x)$.

A be- és kilépő teljesítmény különbsége az elnyelt teljesítmény:

$$P(x + \Delta x) = P(x) + P_a = P(x) - mI\Delta V$$

$P = IA$ és $\Delta V = A\Delta x$ miatt:

$$I(x + \Delta x)A = I(x)A - mI(x)\Delta V = I(x)A - mI(x)A\Delta x$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- **Síkhullám csillapodása**
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt térben

Hangelnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

...

Innen:

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = -mI(x)$$

ami $\Delta x \rightarrow 0$ esetben:

$$\frac{dI}{dx} = -mI(x)$$

Ez egy egyszerű, szétválasztható változójú közönséges differenciálegyenlet, mellyel a fizikában gyakran találkozunk.

Megoldása igen egyszerű:

Átrendezve és integrálva mindkét oldalt:

$$\int \frac{1}{I} \frac{dI}{dx} dx = - \int m dx$$

amiből: $\ln I = -mx + C$.

Itt C egy egyelőre ismeretlen jelentésű integrálási állandó.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- **Síkhullám csillapodása**
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt térben

Hangelnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

...

Ebből egyszerű átrendezéssel: $I(x) = e^{-mx+C} = e^C \cdot e^{-mx}$.
 C jelentése kitalálható, ha ide $x = 0$ -t írunk be: $I(0) = e^C \cdot 1$.
Tehát a síkhullám intenzitásának gyengülése:

$$I(x) = I(0)e^{-mx}$$

Decibel-skálán:

$$n(x) = 10 \lg \frac{I(x)}{I_0} = 10 \lg \left(\frac{I(0)}{I_0} e^{-mx} \right) = 10 \lg \frac{I(0)}{I_0} + 10 \lg e^{-mx}$$

azaz

$$n(x) = n(0) - \frac{10m}{\ln 10} x$$

Méterenként tehát $(10/\ln 10)m \approx 4,34m$ dB a csökkenés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- **Gömbhullám csillapodása**
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

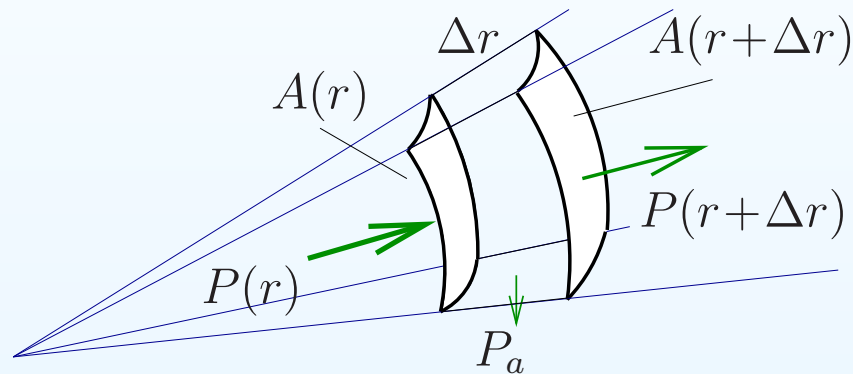
Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Gömbhullám csillapodása

Vizsgáljunk egy gömbhullámból kimetszett r és $r + \Delta r$ közti vékony réteget:



Az r és az $r + \Delta r$ sugarú gömbök felszíne:

$$A(r) = 4\pi r^2, \quad A(r + \Delta r) = 4\pi (r + \Delta r)^2$$

A $P = IA$ összefüggés szerint az előbbi gömbfelületeken mérhető teljes hangteljesítmény:

$$P(r) = I(r)A(r), \quad P(r + \Delta r) = I(r + \Delta r)A(r + \Delta r)$$

...

Az elnyelődés miatt: $P(r + \Delta r) = P(r) + P_a = P(r) - mI\Delta V$

...

Az elnyelődés miatt: $P(r + \Delta r) = P(r) + P_a = P(r) - mI\Delta V$

A két közeli gömb által behatárolt térfogat felfogható úgy, mint az r sugarú gömb felszínén levő Δr vastagságú réteg, így ha $\Delta r \ll r$, akkor

$$\Delta V \approx 4\pi r^2 \Delta r = A(r) \Delta r$$

...

Az elnyelődés miatt: $P(r + \Delta r) = P(r) + P_a = P(r) - mI\Delta V$

A két közeli gömb által behatárolt térfogat felfogható úgy, mint az r sugarú gömb felszínén levő Δr vastagságú réteg, így ha $\Delta r \ll r$, akkor

$$\Delta V \approx 4\pi r^2 \Delta r = A(r) \Delta r$$

Ezt beírva a teljesítményeket leíró egyenletbe:

$$P(r + \Delta r) = P(r) - mIA(r)\Delta r = P(r) - mP(r)\Delta r,$$

ahonnan:

$$\frac{P(r + \Delta r) - P(r)}{\Delta r} = -mP(r), \quad \Delta r \rightarrow 0 \text{ esetén: } \frac{dP}{dr} = -mP(r)$$

...

Az elnyelődés miatt: $P(r + \Delta r) = P(r) + P_a = P(r) - mI\Delta V$

A két közeli gömb által behatárolt térfogat felfogható úgy, mint az r sugarú gömb felszínén levő Δr vastagságú réteg, így ha $\Delta r \ll r$, akkor

$$\Delta V \approx 4\pi r^2 \Delta r = A(r) \Delta r$$

Ezt beírva a teljesítményeket leíró egyenletbe:

$$P(r + \Delta r) = P(r) - mIA(r)\Delta r = P(r) - mP(r)\Delta r,$$

ahonnan:

$$\frac{P(r + \Delta r) - P(r)}{\Delta r} = -mP(r), \quad \Delta r \rightarrow 0 \text{ esetén: } \frac{dP}{dr} = -mP(r)$$

Ugyanilyen egyenletet oldottunk meg az előbb.

$$P(r) = P(0)e^{-mr}$$

...

Ezt összevetve a korábbi $P(r) = I(r)A(r)$ egyenlettel egyszerű számítással adódik, hogy

$$I(r) = \frac{P(0)}{4\pi} \frac{e^{-mr}}{r^2}$$

Itt az $1/r^2$ -es tag írja le a geometriai okokból származó gyengülést (egyre nagyobb felületeken oszlik el a hang), e^{-mr} pedig a hangelnyelődésből adódót.

...

Ezt összevetve a korábbi $P(r) = I(r)A(r)$ egyenlettel egyszerű számítással adódik, hogy

$$I(r) = \frac{P(0)}{4\pi} \frac{e^{-mr}}{r^2}$$

Itt az $1/r^2$ -es tag írja le a geometriai okokból származó gyengülést (egyre nagyobb felületeken oszlik el a hang), e^{-mr} pedig a hangelnyelődésből adódót. Decibel-skálán:

$$n(r) = 10 \lg \frac{I(r)}{I_0} = 10 \lg \frac{P(0)}{4\pi r^2 I_0} + 10 \lg e^{-mr} = 10 \lg \frac{P(0)}{4\pi r^2 I_0} - \frac{10m}{\ln 10} r$$

...

Ezt összevetve a korábbi $P(r) = I(r)A(r)$ egyenlettel egyszerű számítással adódik, hogy

$$I(r) = \frac{P(0)}{4\pi} \frac{e^{-mr}}{r^2}$$

Itt az $1/r^2$ -es tag írja le a geometriai okokból származó gyengülést (egyre nagyobb felületeken oszlik el a hang), e^{-mr} pedig a hangelnyelődésből adódót. Decibel-skálán:

$$n(r) = 10 \lg \frac{I(r)}{I_0} = 10 \lg \frac{P(0)}{4\pi r^2 I_0} + 10 \lg e^{-mr} = 10 \lg \frac{P(0)}{4\pi r^2 I_0} - \frac{10m}{\ln 10} r$$

Áttekinthetőbb két helyen vett értékek különbségét venni:

$$n(r) - n(r_0) = -\frac{10m}{\ln 10} (r - r_0) - 20 \lg \frac{r}{r_0}$$

Elnyelődésből: méterenként $(10/\ln 10)m \approx 4,34m$ dB csökkenés.

Geometriából: a távolság duplázásakor pedig $20 \lg 2 \approx 6,02$ dB csökkenés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- **Vonalsugárzó hangjának csillapodása**
- A levegő hang elnyelési tényezője
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Vonalsugárzó hangjának csillapodása

Nagy felületű sugárzó: síkhullám.

Pontszerű sugárzó: gömbhullám.

Vonalsugárzó: hengerhullám.

Ilyen pl. egy hosszú, egyenes autópálya hangja.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közégek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- **Vonalsugárzó hangjának csillapodása**
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt térben

Hangelnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Vonalsugárzó hangjának csillapodása

Nagy felületű sugárzó: síkhullám.

Pontszerű sugárzó: gömbhullám.

Vonalsugárzó: hengerhullám.

Ilyen pl. egy hosszú, egyenes autópálya hangja.

Az előzőekhez teljesen hasonlóan levezethető:

$$I(r) = \frac{Q}{2\pi} \frac{e^{-mr}}{r}$$

($Q = P/l$ a hosszegységenkénti hangteljesítmény.)

$$n(r) - n(r_0) = -\frac{10m}{\ln 10} (r - r_0) - 10 \lg \frac{r}{r_0}$$

Elnyelődésből: méterenként $(10/\ln 10)m \approx 4,34m$ dB csökkenés.

Geometriából: a távolság duplázásakor pedig $20 \lg 2 \approx 6,02$ dB csökkenés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- **A levegő hang elnyelési tényezője**
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A levegő hang elnyelési tényezője

A számításokhoz szükséges m számszerű értéke.

Ennek meghatározása elméleti módszerekkel igen nehéz.

Az sejthető, hogy nagyobb frekvencián ez nagyobb lesz, mert ez nagyobb gázréteg-sebességeket jelent, ami nagyobb belső súrlódást.

A páratartalomtól is függni fog m .



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hang elnyelési tényezője
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

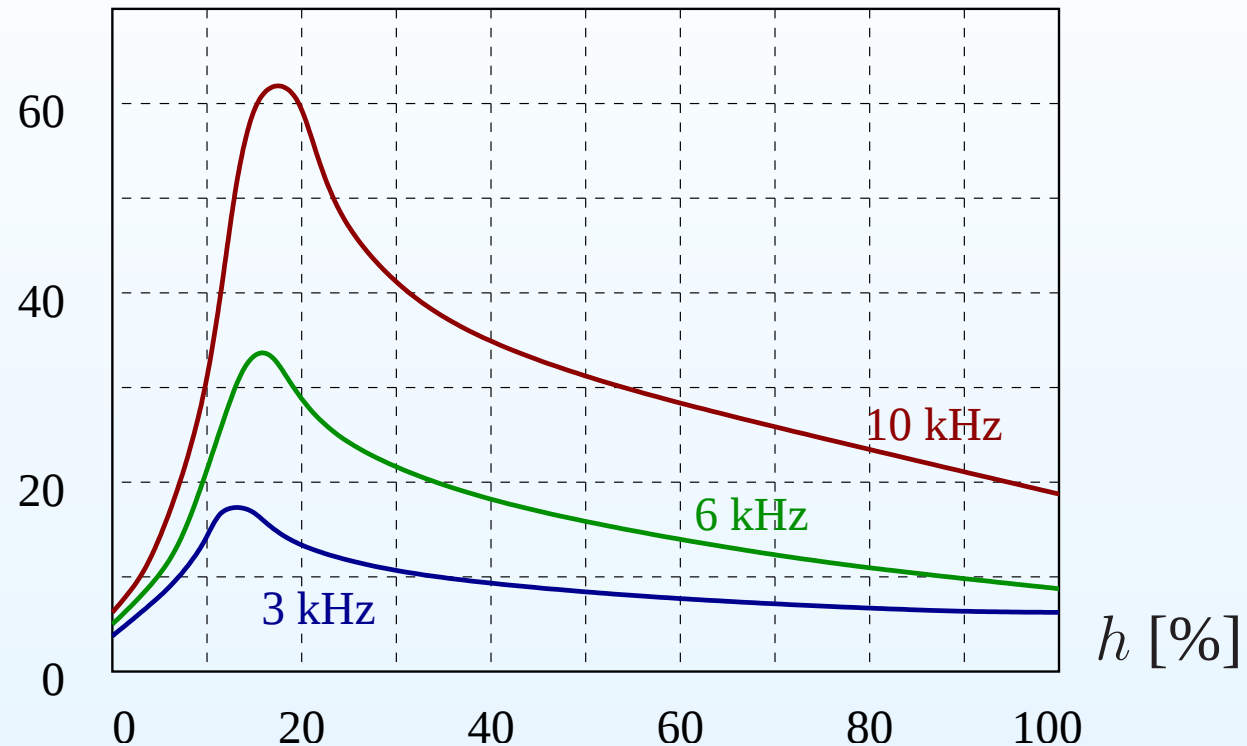
Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

$m \cdot 1000$



Közelítő formula: ($20 < h < 70$ esetére.)

$$m = 5,5 \cdot 10^{-4} \frac{50}{h} \left(\frac{f}{1000 \text{ Hz}} \right)^{1,7} \frac{1}{\text{m}}$$

h a páratartalom %-ban, f a frekvencia.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonal sugárzó hangjának csillapodása
- **A levegő hang elnyelési tényezője**
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: *Hányszor nagyobb a hang elnyelési tényező egy 2 kHz-es hangra, mint egy 200 Hz-esre?*



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- **A levegő hang elnyelési tényezője**
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: *Hányszor nagyobb a hang elnyelési tényező egy 2 kHz-es hangra, mint egy 200 Hz-esre?*

Megoldás: Az előző közelítő formula szerint azonos páratartalom mellett

$$\frac{m(2000)}{m(200)} = \left(\frac{2000}{200} \right)^{1,7} = 50,1.$$

A 2 kHz-es hangok elnyelési tényezője tehát kb. 50-szer nagyobb, mint a 200 Hz-esé.

Még egy példa

Példa: Szabad területen egy kisméretű hangforrástól 50 m-re állva annak hangját 75 dB-esnek halljuk. Hány decibeleles hangot fogunk hallani 1 km-ről, ha terepakadályok nincsenek és a hang frekvenciája 200 Hz? Mi lenne az eredmény 5 kHz-es hangokra? (A relatív páratartalmat vegyük 70%-osnak.)

Még egy példa

Példa: Szabad területen egy kisméretű hangforrástól 50 m-re állva annak hangját 75 dB-esnek halljuk. Hány decibeles hangot fogunk hallani 1 km-ről, ha terepakadályok nincsenek és a hang frekvenciája 200 Hz? Mi lenne az eredmény 5 kHz-es hangokra? (A relatív páratartalmat vegyük 70%-osnak.)

Megoldás: A hangelnyelési tényezők: ($f_1 = 200 \text{ Hz}$, $f_2 = 5000 \text{ Hz}$.)

$$m_1 = 2,55 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{m}}, \quad m_2 = 6,06 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$$

Még egy példa

Példa: Szabad területen egy kisméretű hangforrástól 50 m-re állva annak hangját 75 dB-esnek halljuk. Hány decibeles hangot fogunk hallani 1 km-ről, ha terepakadályok nincsenek és a hang frekvenciája 200 Hz? Mi lenne az eredmény 5 kHz-es hangokra? (A relatív páratartalmat vegyük 70%-osnak.)

Megoldás: A hangelnyelési tényezők: ($f_1 = 200$ Hz, $f_2 = 5000$ Hz.)

$$m_1 = 2,55 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{m}}, \quad m_2 = 6,06 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$$

Gömbhullámok gyengülésénél a hangelnyelésből származó gyengülés:

$$\Delta n_a = (10 / \ln 10) m (r - r_0).$$

Most $r = 1000$ m, $r_0 = 50$ m. A két esetben:

$$\Delta n_{a,1} = 0,11 \text{ dB}, \quad \Delta n_{a,2} = 25,0 \text{ dB}$$

Érdekes: $\Delta n_{a,1}$ elhanyagolható, $\Delta n_{a,2}$ jelentős.

...

A geometriai csökkenés a két esetben egyforma:

$$\Delta n_s = 20 \lg \frac{r}{r_0} = 26,0 \text{ dB}$$

A két esetben az észlelt hangnyomásszint:

$$n_1 = 75 - 0,11 - 26,0 = 48,9 \text{ dB}$$

$$n_2 = 75 - 25,0 - 26,0 = 24 \text{ dB}$$

...

A geometriai csökkenés a két esetben egyforma:

$$\Delta n_s = 20 \lg \frac{r}{r_0} = 26,0 \text{ dB}$$

A két esetben az észlelt hangnyomásszint:

$$n_1 = 75 - 0,11 - 26,0 = 48,9 \text{ dB}$$

$$n_2 = 75 - 25,0 - 26,0 = 24 \text{ dB}$$

Megjegyzés: Ez mutatja, miért nem hallatszanak több kilométerre a magas hangok, míg a mélyek még hallhatóak maradnak. (Pl. villámcsapás hangja távolról morajlás, közelről csattanás.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- **A levegő hang elnyelési tényezője**
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy harmadik példa

Példa: Egy autópálya sík terepen levő szakaszától 100 m-re 70 dB-es hangnyomásszintet mérünk. Milyen messzire kell mennünk, hogy a hangnyomásszint 50 dB alá csökkenjen? A páratartalmat vegyük 30%-osnak, a vizsgált hang frekvenciáját 200 Hz-nek.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt térben

Hangelnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy harmadik példa

Példa: Egy autópálya sík terepen levő szakaszától 100 m-re 70 dB-es hangnyomásszintet mérünk. Milyen messzire kell mennünk, hogy a hangnyomásszint 50 dB alá csökkenjen? A páratartalmat vegyük 30%-osnak, a vizsgált hang frekvenciáját 200 Hz-nek.

Megoldás: A korábban használt jelölésekkel: $r_0 = 100$ m, $n(r_0) = 70$ dB, $n(r) = 30$ dB, így:

$$50 - 70 = -\frac{10m}{\ln 10}(r - 100) - 10 \lg \frac{r}{100}$$

A hangelnyelési együttható $m = 5,94 \cdot 10^{-5}$ 1/m. Így az egyenlet:

$$20 = 2,58 \cdot 10^{-4}(r - 100) + 10 \lg \frac{r}{100}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hangelnyelési tényezője
- Néhány közeg hangelnyelése

Hangelnyelődés zárt térben

Hangelnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy harmadik példa

Példa: Egy autópálya sík terepen levő szakaszától 100 m-re 70 dB-es hangnyomásszintet mérünk. Milyen messzire kell mennünk, hogy a hangnyomásszint 50 dB alá csökkenjen? A páratartalmat vegyük 30%-osnak, a vizsgált hang frekvenciáját 200 Hz-nek.

Megoldás: A korábban használt jelölésekkel: $r_0 = 100$ m, $n(r_0) = 70$ dB, $n(r) = 30$ dB, így:

$$50 - 70 = -\frac{10m}{\ln 10}(r - 100) - 10 \lg \frac{r}{100}$$

A hangelnyelési együttható $m = 5,94 \cdot 10^{-5}$ 1/m. Így az egyenlet:

$$20 = 2,58 \cdot 10^{-4}(r - 100) + 10 \lg \frac{r}{100}$$

Ebből nem lehet r -et kifejezni. Csak közelítő megoldás lehetséges. Számoljuk ki a jobb oldalt több r -re.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hang elnyelési tényezője
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

...

Előzetes becslés: hang elnyelés nélkül az egyenlet:

$$20 = 10 \lg \frac{r^*}{100}$$

Ennek megoldása könnyen megkapható: $r^* = 10^4$ m. Nyilván $r < r^*$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- **A levegő hang elnyelési tényezője**
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

...

Előzetes becslés: hang elnyelés nélkül az egyenlet:

$$20 = 10 \lg \frac{r^*}{100}$$

Ennek megoldása könnyen megkapható: $r^* = 10^4$ m. Nyilván $r < r^*$.

Készítsünk táblázatot a fenti egyenlet jobb oldaláról:

r [m]	2000	4000	6000	8000	10000
jobb oldal	13,5	17,0	19,3	21,1	22,6

$$6000 < r < 8000 \text{ m.}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- **A levegő hang elnyelési tényezője**
- Néhány közeg hang elnyelése

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

...

Előzetes becslés: hang elnyelés nélkül az egyenlet:

$$20 = 10 \lg \frac{r^*}{100}$$

Ennek megoldása könnyen megkapható: $r^* = 10^4$ m. Nyilván $r < r^*$.

Készítsünk táblázatot a fenti egyenlet jobb oldaláról:

r [m]	2000	4000	6000	8000	10000
jobb oldal	13,5	17,0	19,3	21,1	22,6

$$6000 < r < 8000 \text{ m.}$$

Számítógéppel: $r = 6741$ m.

(A gyakorlatban sokszor előfordul csak közelítőleg megoldható probléma.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

- Bevezetés
- Az elnyelés teljesítménye
- Síkhullám csillapodása
- Gömbhullám csillapodása
- Vonalsugárzó hangjának csillapodása
- A levegő hang elnyelési tényezője
- **Néhány közeg hang elnyelése**

Hang elnyelődés zárt térben

Hang elnyelődés falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Néhány közeg hang elnyelése

A szemléletesség kedvéért nem m -et, hanem annak reciprokát adjuk meg, ami azt a távolságot jelenti, mely alatt a hangintenzitás a hang elnyelése miatt e -ad részére csökken.

közeg	$1/m(100 \text{ Hz})$	$1/m(10 \text{ kHz})$	$1/m(1 \text{ MHz})$
levegő	10 km	5 m	6 mm
tengervíz	2000 km	1 km	3 m
üveg	1500 km	15 km	150 m
alumínium	15 000 km	150 km	1,5 km

Nagyobb frekvencián m nő.

Tengervízben távolra csak a mély hangok hallatszanak. (A bálnák infrahanggal kommunikálnak.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

**Hang elnyelődés zárt
térben**

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utószegési formula
- Ajánlott utószegési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hang elnyelődés zárt térben



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

● **Bevezetés**

● Az átlagos szabad
úthossz

- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózengési formula
- Ajánlott utózengési
idők

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

Az előzőekben a szabad térben vizsgáltuk a hang gyengülését.

Zárt termekben a folyamat a visszaverődések miatt teljesen másképp zajlik.

Általában a hang 1 s alatt többször ide-oda verődik a falak között, így a falakon történő elnyelődés is jelentős lesz.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

● **Bevezetés**

● Az átlagos szabad
úthossz

- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózungési formula
- Ajánlott utózungési
idők

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

Az előzőekben a szabad térben vizsgáltuk a hang gyengülését.

Zárt termekben a folyamat a visszaverődések miatt teljesen másképp zajlik.

Általában a hang 1 s alatt többször ide-oda verődik a falak között, így a falakon történő elnyelődés is jelentős lesz.

Egyszerűsítés: feltesszük, hogy a többszörösen visszavert hang **véletlenszerű irányokban** terjed.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- **Az átlagos szabad úthossz**
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózengetési formula
- Ajánlott utózengetési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az átlagos szabad úthossz

Átlagos szabad úthossz: Az a távolság, melyet a hang két visszaverődés között átlagosan megtesz.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- **Az átlagos szabad úthossz**
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózengetési formula
- Ajánlott utózengetési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az átlagos szabad úthossz

Átlagos szabad úthossz: Az a távolság, melyet a hang két visszaverődés között átlagosan megtesz.

V térfogatú, A belső felületű teremben ez:

$$L = \frac{4V}{A}$$

(Egyszerű formula, de a bizonyítás bonyolult.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózengetési formula
- Ajánlott utózengetési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az átlagos szabad úthossz

Átlagos szabad úthossz: Az a távolság, melyet a hang két visszaverődés között átlagosan megtesz.

V térfogatú, A belső felületű teremben ez:

$$L = \frac{4V}{A}$$

(Egyszerű formula, de a bizonyítás bonyolult.)

A véletlenszerű irányokban terjedő hang tehát átlagosan

$$\Delta t_a = \frac{L}{c} = \frac{4V}{Ac}$$

időnként szenved a falon (mennyezeten, ...) abszorpciót.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz

- **A falak hatása**

- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózungési formula
- Ajánlott utózungési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A falak hatása

Levegőbeli hang elnyelés nélkül Δt_a időnként $1 - \bar{a}$ -szorosára csökkenne a hangintenzitás.

t idő alatt $t/\Delta t_a$ ilyen csökkenés következik be, ezért:

$$I(t) = I(0) \cdot (1 - \bar{a})^{t/\Delta t_a}$$

Az időegység alatti változás a falak miatt:

$$\left. \frac{dI}{dt} \right|_{fal} = I(0) \cdot \ln(1 - \bar{a}) \cdot (1 - \bar{a})^{t/\Delta t_a} \cdot \frac{1}{\Delta t_a} = I(t) \cdot \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a}$$

($0 < a < 1$, ezért $\ln(1 - \bar{a}) < 0$, tehát ez intenzitás csökkenését ír le.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz

- A falak hatása

- **A levegő hatása**

- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózungési formula
- Ajánlott utózungési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A levegő hatása

Alkalmazzuk a fejezet eleji $P_a = -mI\Delta V$ összefüggést a terem teljes V térfogatára:

$$\frac{dE}{dt} = -mI(t)V$$

Használjuk ki, hogy $I = ec = E/V \cdot c$, tehát $E = I \cdot V/c$:

$$\left. \frac{dI}{dt} \right|_e = -mcI(t)$$

Ez adja meg a levegőbeli elnyelődés miatt időegységenkénti intenzitás-csökkenést.

A teljes csökkenés

A falak és a levegő elnyelésének hatása egyszerre jelentkezik:

$$\frac{dI}{dt} = \left. \frac{dI}{dt} \right|_e + \left. \frac{dI}{dt} \right|_{fal} = \left(-mc + \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a} \right) I(t)$$

A teljes csökkenés

A falak és a levegő elnyelésének hatása egyszerre jelentkezik:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI}{dt}\Big|_e + \frac{dI}{dt}\Big|_{fal} = \left(-mc + \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a} \right) I(t)$$

Nem kell megijedni! Ez $dI/dt = -kI$ alakú, ahol k egy adott szobára állandó. Ennek megoldása ismert:

$$I(t) = I(0)e^{-kt}$$

ahol

$$k = mc - \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a}$$

A teljes csökkenés

A falak és a levegő elnyelésének hatása egyszerre jelentkezik:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI}{dt}\Big|_e + \frac{dI}{dt}\Big|_{fal} = \left(-mc + \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a} \right) I(t)$$

Nem kell megijedni! Ez $dI/dt = -kI$ alakú, ahol k egy adott szobára állandó. Ennek megoldása ismert:

$$I(t) = I(0)e^{-kt}$$

ahol

$$k = mc - \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a}$$

Szemléletesebb k helyett a $\tau = 1/k$ mennyiséget, az un. **időállandót** használni:

$$I(t) = I(0)e^{-t/\tau}, \quad \text{ahol } \tau = \frac{1}{mc - \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\Delta t_a}}$$

...

Δt_a fenti kifejezésével:

$$\tau = \frac{1}{mc - \frac{\ln(1-\bar{a})}{4V}Ac} = \frac{4}{c(4m - A/V \cdot \ln(1 - \bar{a}))}.$$

Az időállandó jelentése: ez adja meg, mennyi idő alatt csökken a hangintenzitás az eredeti $1/e$ -ed részére.

...

Δt_a fenti kifejezésével:

$$\tau = \frac{1}{mc - \frac{\ln(1-\bar{a})}{4V} Ac} = \frac{4}{c(4m - A/V \cdot \ln(1 - \bar{a}))}.$$

Az időállandó jelentése: ez adja meg, mennyi idő alatt csökken a hangintenzitás az eredeti $1/e$ -ed részére.

Szemléletesebb mennyiség: 60 dB-nyi csökkenés ideje, **utózengési idő**.
Könnyű belátni, hogy $T_{60} = \tau \cdot \ln 10^6 \approx 13,82\tau$.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- **Az Eyring-Norris
utózengetési formula**
- Ajánlott utózengetési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az Eyring-Norris utózengetési formula

Az előzők összegzése:

$$T_{60} = \frac{4 \ln 10^6}{c(4m - A/V \cdot \ln(1 - \bar{a}))}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz

- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- **Az Eyring-Norris
utószegési formula**
- Ajánlott utószegési
idők

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az Eyring-Norris utószegési formula

Az előzők összegzése:

$$T_{60} = \frac{4 \ln 10^6}{c(4m - A/V \cdot \ln(1 - \bar{a}))}$$

Speciális esetek:

- Ha $m \approx 0$ (pl. alacsony frekvencia):

$$T_{60, fal} \approx \frac{4 \ln 10^6 V}{-cA \cdot \ln(1 - \bar{a})}.$$

Csak V/A számít, ezért ha egy terem minden 2-szeresére
növeljük T_{60} duplázódik.

- Ha a falak $\bar{a} \approx 0$, akkor

$$T_{60, e} = \frac{\ln 10^6}{mc}$$

azaz ekkor a terem méretei nem számítanak.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris utószengési formula
- Ajánlott utószengési idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Ajánlott utószengési idők

T_{60} alatt a hangnyomásszint 60 dB-t csökken, azaz a jól hallhatóból érzékelhetetlenné válik.

Ha T_{60} kicsi: kevés a visszhang, de a hangok gyorsan elnyelődnek, azaz csak a hangforrás közelében hallunk jól.

Ha T_{60} nagy: a terem visszhangos, de a hangok a forrástól távol is jól hallatszanak.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris utózengési formula
- Ajánlott utózengési idők

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Ajánlott utózengési idők

T_{60} alatt a hangnyomásszint 60 dB-t csökken, azaz a jól hallhatóból érzékelhetetlenné válik.

Ha T_{60} kicsi: kevés a visszhang, de a hangok gyorsan elnyelődnek, azaz csak a hangforrás közelében hallunk jól.

Ha T_{60} nagy: a terem visszhangos, de a hangok a forrástól távol is jól hallatszanak.

Ajánlott értékek: (közelítő adatok)

- Akusztikai mérések: $T_{60} < 0,1$ s.
- Előadótermek (próza): $T_{60} = 0,3-1$ s.
- Koncerttermek: $T_{60} = 2-5$ s.

Egy terem pontos akusztikus tervezése ennél sokkal bonyolultabb, de ez fontos adat.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózungési formula
- Ajánlott utózungési
idők

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: Egy templom légtere $140\,000\text{ m}^3$, falainak belső felülete $25\,000\text{ m}^2$, falainak átlagos abszorpciós tényezője $0,1$. Számolja ki az utózungési időt 200 Hz , 1 kHz és 5 kHz frekvenciák esetére. Állapítsa meg azt is, melyik esetben fog a falak illetve a levegő hangelnyelése dominálni! (A páratartalmat vegyük 30% -osnak.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utózungési formula
- Ajánlott utózungési
idők

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: Egy templom légtere $140\,000\text{ m}^3$, falainak belső felülete $25\,000\text{ m}^2$, falainak átlagos abszorpciós tényezője $0,1$. Számolja ki az utózungési időt 200 Hz , 1 kHz és 5 kHz frekvenciák esetére. Állapítsa meg azt is, melyik esetben fog a falak illetve a levegő hangelnyelése dominálni! (A páratartalmat vegyük 30% -osnak.)

Megoldás: Az Eyring-Norris formula nevezője:

$4m - A/V \ln(1 - \bar{\alpha})$. $4m$ jellemzi a levegő hangelnyelésének, a másik tag a falakból származónak az erősségét.

A $4m$ -es tag erősen frekvenciafüggő. A vizsgált 3 frekvencián:

$$4m_1 = 2,38 \cdot 10^{-4}, \quad 4m_2 = 3,66 \cdot 10^{-3}, \quad 4m_3 = 5,66 \cdot 10^{-2}.$$

A falakból származó tag nem frekvenciafüggő:

$$-A/V \ln(1 - \bar{\alpha}) = 1,88 \cdot 10^{-2}$$

200 Hz-en és 1 kHz-en a falak hatása, 5 kHz-en a levegő elnyelése



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

- Bevezetés
- Az átlagos szabad
úthossz
- A falak hatása
- A levegő hatása
- A teljes csökkenés
- Az Eyring-Norris
utószögési formula
- Ajánlott utószögési
idők

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egyszerű behelyettesítéssel megkapható a három eset utószögési ideje:

$$T_{60,1} = 8,8 \text{ s} , \quad T_{60,2} = 7,5 \text{ s} , \quad T_{60,3} = 2,2 \text{ s} .$$

(A hang sebességét 330 m/s-nak vettük.)

A mély hangok tehát igen lassan csengenek le, a magasak már jóval gyorsabban, ahogy azt a fenti elméleti megfontolások alapján vártuk is.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

**Hang elnyelődés
falakban**

- Bevezetés
- Falak rezgéstípusai

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Hang elnyelődés falakban



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

● **Bevezetés**

● Falak rezgéstípusai

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Bevezetés

Ez a gyakorlat szempontjából fontos probléma.

A főbb fizikai folyamatokra fogunk koncentrálni egyrétegű falak esetén:

Egy tömbben rezgés. A fal minden pontja a fal síkjára merőlegesen azonos fázisban rezeg.

Hajlítási hullámok. Ha a beeső hang nem pontosan merőleges a falra, képes „behullámoztatni” a falat. (Lásd korábban.)

Vastagsági állóhullámok. A fal síkjára merőlegesen a hang képes állóhullám formában rezegni, ha a falvastagság és a hullámhossz megfelelő viszonyban van egymással.



Falak rezgéstípusai

A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

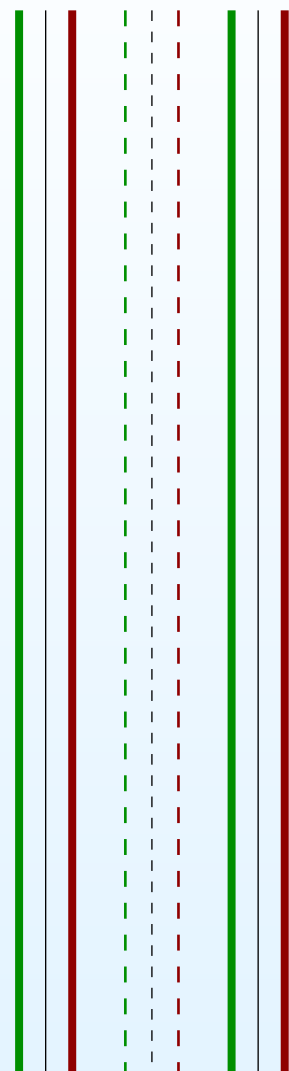
● Bevezetés

● Falak rezgéstípusai

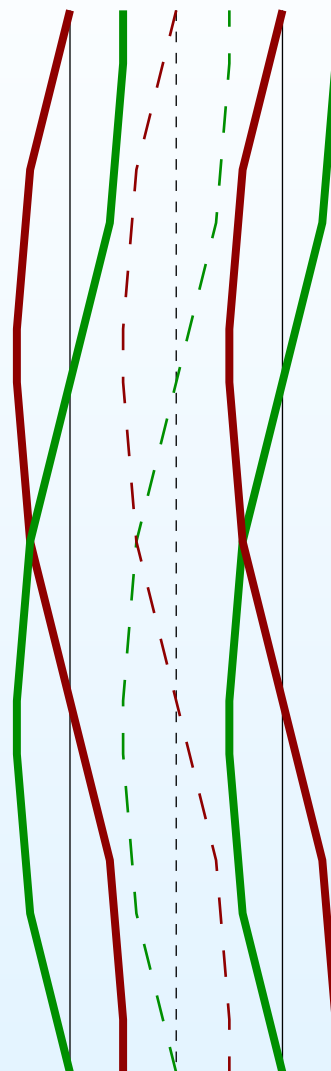
Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

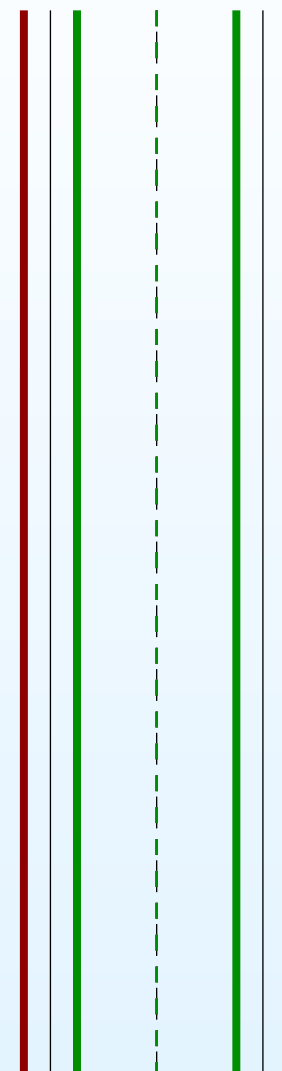
Vastagsági állóhullám



Egy tömb



hajlítási hullám



mélységi állóhullám



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy tömbben rezgés



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy tömbben rezgés (a vékony fal közelítés)

Az alacsony frekvenciákra jellemző, amikor a falvastagság sokkal kisebb, mint hullámhossz: **vékony fal közelítés**.

Az intenzitás csökkenés oka: a sűrű falat a hang nem tudja úgy rezgetni, mint a levegőt, ezért annak túloldalán csak kisebb amplitúdójú hullámok keletkeznek.

(A hangenergia különbsége pedig visszaverődik a falról.)



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közégek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

● Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy tömbben rezgés (a vékony fal közelítés)

Az alacsony frekvenciákra jellemző, amikor a falvastagság sokkal kisebb, mint hullámhossz: **vékony fal közelítés**.

Az intenzitás csökkenés oka: a sűrű falat a hang nem tudja úgy rezgetni, mint a levegőt, ezért annak túloldalán csak kisebb amplitúdójú hullámok keletkeznek.

(A hangenergia különbsége pedig visszaverődik a falról.)

A fal részletei nem számítanak ekkor, csak felületegységenkénti tömege:

Felületi sűrűség: A fal tömegének és felületének hányadosa:

$$\varrho_s = \frac{m}{A} =$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közégek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

● Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

● A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
● Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy tömbben rezgés (a vékony fal közelítés)

Az alacsony frekvenciákra jellemző, amikor a falvastagság sokkal kisebb, mint hullámhossz: **vékony fal közelítés**.

Az intenzitás csökkenés oka: a sűrű falat a hang nem tudja úgy rezgetni, mint a levegőt, ezért annak túloldalán csak kisebb amplitúdójú hullámok keletkeznek.

(A hangenergia különbsége pedig visszaverődik a falról.)

A fal részletei nem számítanak ekkor, csak felületegységenkénti tömege:

Felületi sűrűség: A fal tömegének és felületének hányadosa:

$$\varrho_s = \frac{m}{A} = \frac{Ad\varrho}{A} = \varrho \cdot d$$

ahol ϱ a fal anyagának sűrűsége, d a fal vastagsága.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

- **A hanggátlás a
vékony fal közelítésben**

- Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A hanggátlás a vékony fal közelítésben

Bebizonyítható, hogy I_1 -es beeső hang esetén a fal túloldalán megjelenő I_3 intenzitásra igaz lesz, hogy:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega \rho_s}{2Z}\right)^2}$$

ahol Z a levegő akusztikus impedanciája, ω a hang körfrekvenciája.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

- **A hanggátlás a
vékony fal közelítésben**

- Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

A hanggátlás a vékony fal közelítésben

Bebizonyítható, hogy I_1 -es beeső hang esetén a fal túloldalán megjelenő I_3 intenzitásra igaz lesz, hogy:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega \rho_s}{2Z}\right)^2}$$

ahol Z a levegő akusztikus impedanciája, ω a hang körfrekvenciája.

A gyakorlatban falak esetén szinte mindig $\omega \rho_s \gg 2Z$. Ekkor:

$$\frac{I_3}{I_1} \approx \left(\frac{2Z}{\omega \rho_s}\right)^2$$

A hangnyomásszint esése dB-ben:

$$TL_0 = 10 \lg \frac{I_1}{I_3} = 20 \lg \frac{\omega \rho_s}{2Z}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

- **A hanggátlás a
vékony fal közelítésben**

- Diffúz hang elnyelése

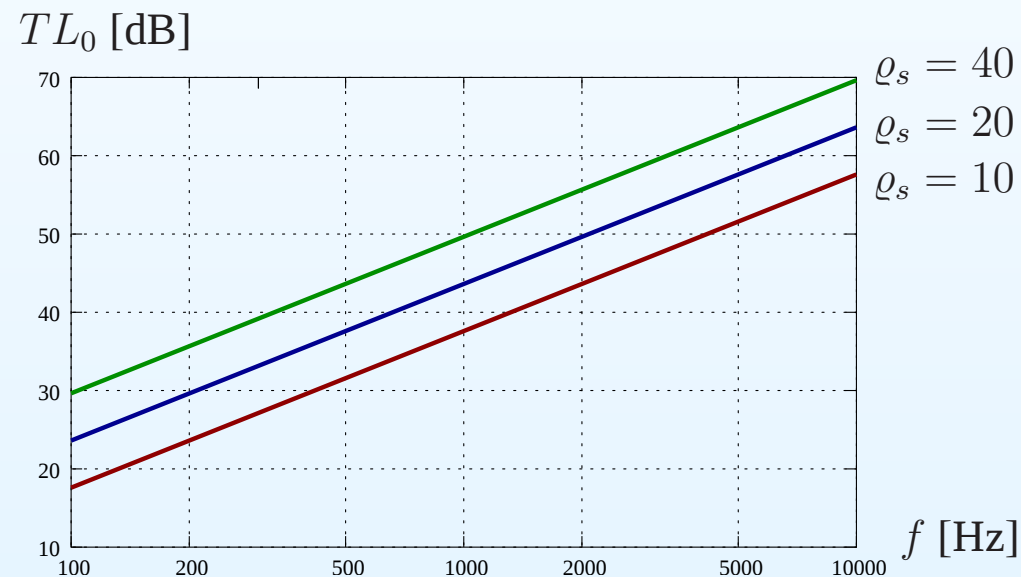
Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Az átlagos $Z = 415$ értékkel számolva:

$$TL_0 = 20 \lg \frac{\pi f \rho_s}{Z} = 20 \lg(f \rho_s) - 42,4 \text{ dB}$$

Logaritmikus skálán ábrázolva:





A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)

- **A hanggátlás a
vékony fal közelítésben**

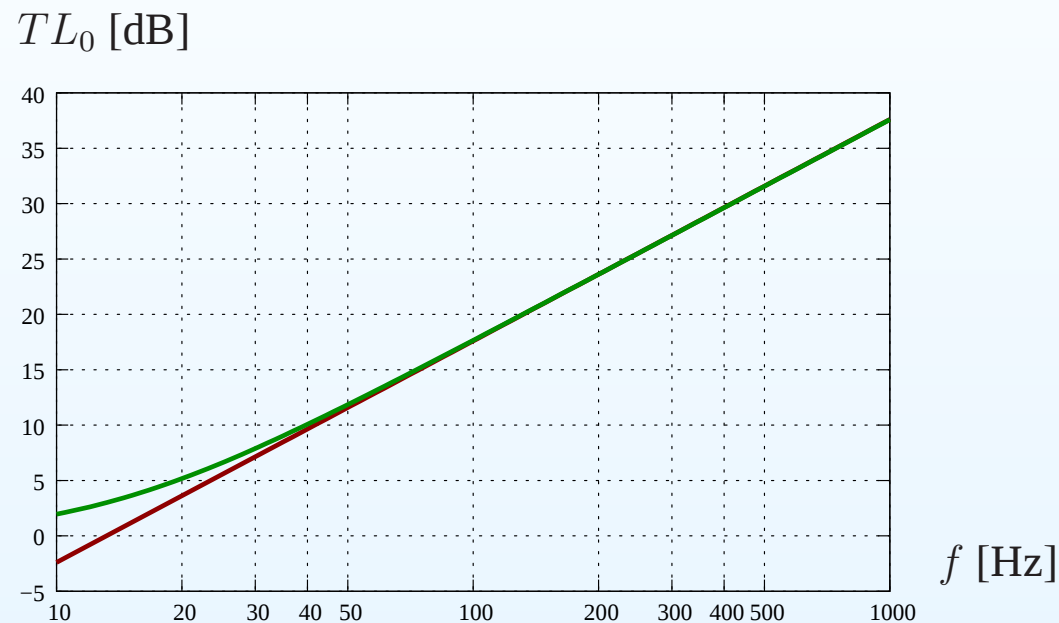
- Diffúz hang elnyelése

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

nagyon vékony rétegek esete

Igen kis ρ_s esetén ez a közelítés nem alkalmazható, hanem az eredeti I_3/I_1 -et magadó formulát kell használni.



Pontos formula: zöld görbe. Közelítő formula: piros görbe.

Praktikus szabály: ha a közelítő formula 10 dB-nél kisebb gyengítést ad, akkor a pontosat kell használnunk, különben jó a közelítés.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közterek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- **Diffúz hang elnyelése**

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Diffúz hang elnyelése

Véletlenszerű irányokból érkező (diffúz) hangra:

$$TL_d = TL_0 - 4,8 \text{ dB}$$

azaz a gyakorlatban használható közelítő összefüggés:

$$TL_d = 20 \lg(f \rho_s) - 47,2 \text{ dB}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- **Diffúz hang elnyelése**

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: Egy gipszkarton elem anyagának sűrűsége 800 kg/m^3 , vastagsága 25 mm . Hány dB-el csökkenti ez a diffúz, 400 Hz -es hangok hangnyomásszintjét?



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- **Diffúz hang elnyelése**

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: Egy gipszkarton elem anyagának sűrűsége 800 kg/m^3 , vastagsága 25 mm . Hány dB-el csökkenti ez a diffúz, 400 Hz -es hangok hangnyomásszintjét?

Megoldás: A feladat szerint a gipszkarton felületi sűrűsége:

$$\rho_s = 800 \cdot 0,025 = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A diffúz hangra vonatkozó összefüggés szerint a csökkenés:

$$TL_d = 20 \lg(400 \cdot 20) - 47,2 = 30,9 \text{ dB}.$$

Egy 25 mm vastag gipszkarton lemez tehát mintegy 31 dB csökkenést okoz 400 Hz -en.

Ez az érték nagyobb 10 dB -nél, jogos volt tehát a közelítés használata.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagymeretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- **Diffúz hang elnyelése**

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Még egy példa

Példa: Egy papírlapot tartunk fülünk elé, melynek csomagolásán azt láttuk, hogy „80 g/m²”. Hány dB-lel halljuk halkabban az 1 kHz-es és a 10 kHz-es hangokat, ha azok merőlegesen esnek be a papírra?



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagyméretű
közeghatáron

Hangelnyelődés
közegek belsejében

Hangelnyelődés zárt
térben

Hangelnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- **Diffúz hang elnyelése**

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Még egy példa

Példa: Egy papírlapot tartunk fülünk elé, melynek csomagolásán azt láttuk, hogy „80 g/m²”. Hány dB-lel halljuk halkabban az 1 kHz-es és a 10 kHz-es hangokat, ha azok merőlegesen esnek be a papírra?

Megoldás: A közelítő formula szerint 1 kHz-en:

$$TL_0 = 20 \lg(1000 \cdot 0,08) - 42,4 = -4,33 \text{ dB.}$$

Ez nyilván elfogadhatatlan, ezért a pontos formulát kell használnunk:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega \rho_s}{2Z}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{502,7}{830}\right)^2} = 0,73$$

Decibelben ez igen csekély csökkenést jelent:

$$TL_0 = 10 \lg \frac{I_1}{I_3} = 1,4 \text{ dB}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

- Egy tömbben rezgés
(a vékony fal közelítés)
- A hanggátlás a
vékony fal közelítésben
- **Diffúz hang elnyelése**

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

...

Kicsit más a helyzet 10 kHz-en. Itt:

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{1}{1 + \left(\frac{5027}{830}\right)^2} = 0,027 ,$$

azaz

$$TL_0 = 10 \lg \frac{I_1}{I_3} = 15,8 \text{ dB.}$$

Ez a gyengülés már jól hallható.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A koincidencia jelensége
- A koincidencia-frekvencia közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

Hajlítási hullámok



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

● Hajlítási hullámok

● A koincidencia
jelensége

● A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

Hajlítási hullámok

Fentebb már ismertettük, hogy a hajlítási hullámok sebessége:

$$c_h = \sqrt[4]{\frac{1}{3(1 - \mu^2)}} \sqrt{\pi f d c_d},$$

ahol $c_d = \sqrt{E/\rho_0}$ a tágulási hullámok terjedési sebessége a fal anyagában, d a falvastagság, f a frekvencia, μ pedig a fal anyagának Poisson-száma.

Ezek a hullámok a falon

$$\lambda_h = \frac{c_h}{f} = \sqrt[4]{\frac{1}{3(1 - \mu^2)}} \sqrt{\frac{\pi d c_d}{f}}$$

hullámhosszúságot jelentenek.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

• Hajlítási hullámok

• **A koincidencia
jelensége**

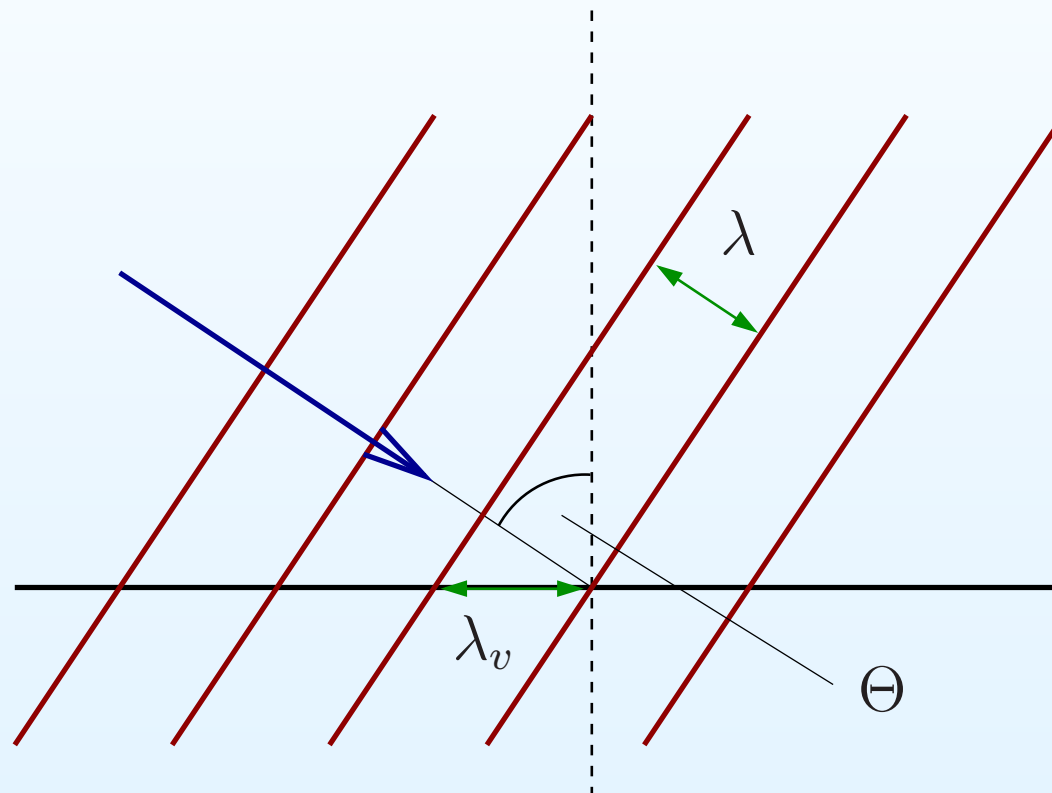
• A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

A koincidencia jelensége

A ferdén beeső hangok hullámhosszának vetülete:

$$\lambda_v = \lambda / \sin \Theta$$





A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- **A koincidencia jelensége**

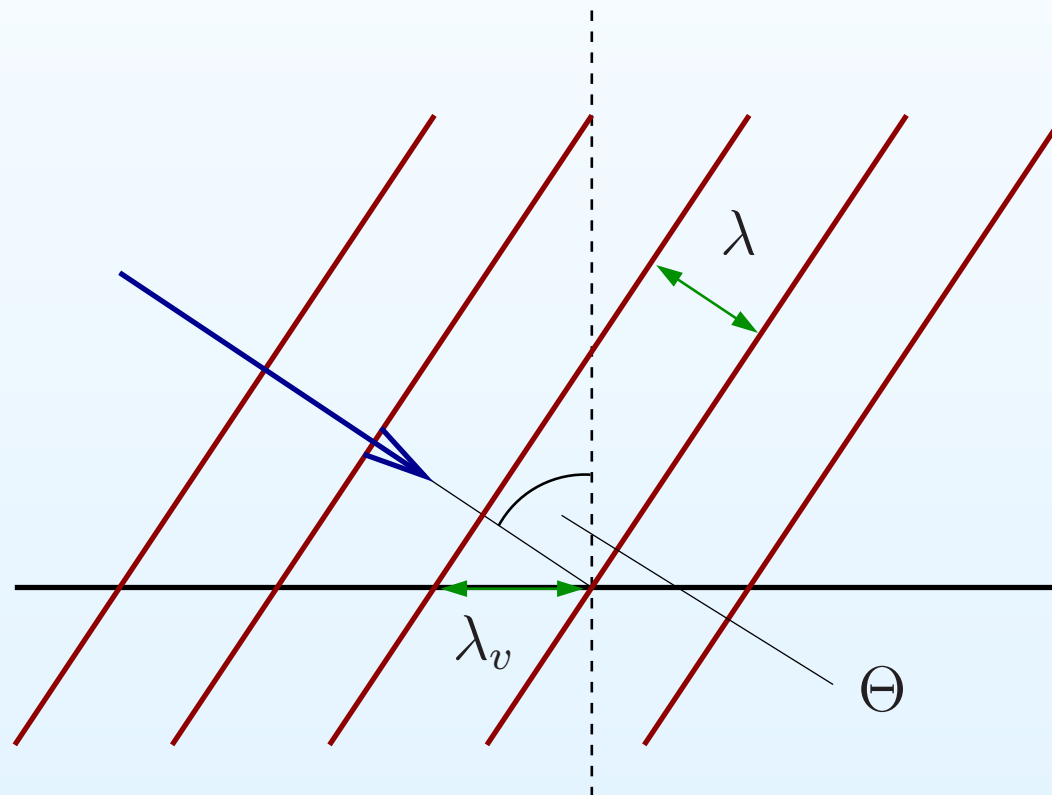
• A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

A koincidencia jelensége

A ferdén beeső hangok hullámhosszának vetülete:

$$\lambda_v = \lambda / \sin \Theta$$



Amennyiben $\lambda_h = \lambda_v$, speciális rezonancia-jelenség történik, és a hajlítási hullámok igen felerősödnek.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok

- A **koincidencia**
jelensége

- A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

...

Könnyen kiszámolható, hogy az ehhez tartozó frekvencia:

$$f = \frac{\sqrt{3(1 - \mu^2)}c^2}{\pi c_d d \sin^2 \Theta}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A **koincidencia**
jelensége

- A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

...

Könnyen kiszámolható, hogy az ehhez tartozó frekvencia:

$$f = \frac{\sqrt{3(1 - \mu^2)}c^2}{\pi c_d d \sin^2 \Theta}$$

A legkisebb frekvencia, amikor ez bekövetkezhet:

$$f_c = \frac{\sqrt{3(1 - \mu^2)}c^2}{\pi c_d d}$$

Elnevezés: **koincidencia-frekvencia**.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A **koincidencia**
jelensége

- A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

...

Könnyen kiszámolható, hogy az ehhez tartozó frekvencia:

$$f = \frac{\sqrt{3(1 - \mu^2)}c^2}{\pi c_d d \sin^2 \Theta}$$

A legkisebb frekvencia, amikor ez bekövetkezhet:

$$f_c = \frac{\sqrt{3(1 - \mu^2)}c^2}{\pi c_d d}$$

Elnevezés: **koincidencia-frekvencia**.

f_c környékén a hanggátlás jelentősen csökken a vékony fal közelítéséhez képest. A pontos csökkenés anyagfüggő, de tipikusan 10–20 dB nagyságrendű.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

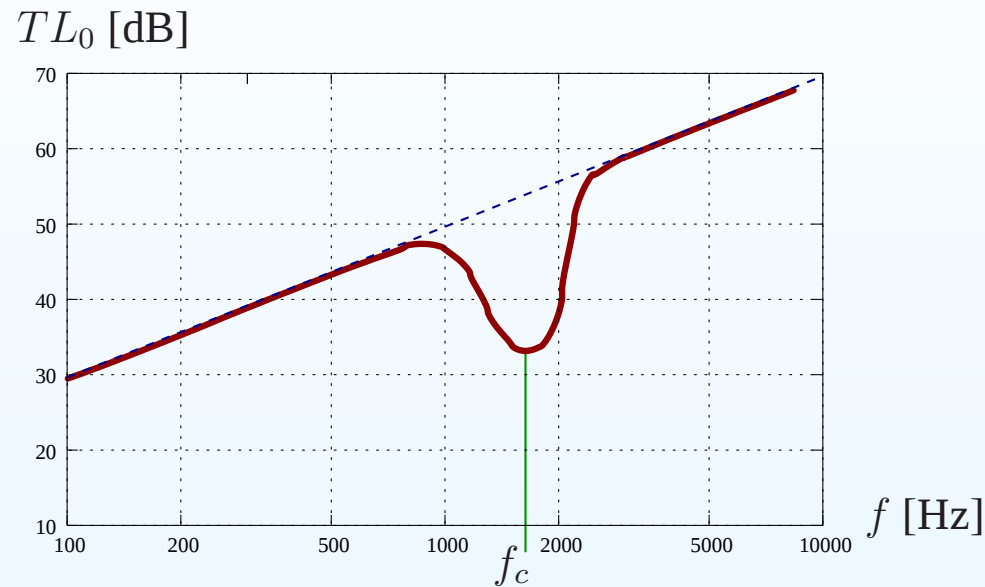
Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A koincidencia
jelensége

● A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

A koincidencia-frekvencia közelítő formulája



Közelítő számításokban $c = 340$ m/s-ot és egy átlagos $\mu = 0,33$ -as értéket szokás használni. Ekkor:

$$f_c = \frac{60\,160}{c_d d}$$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

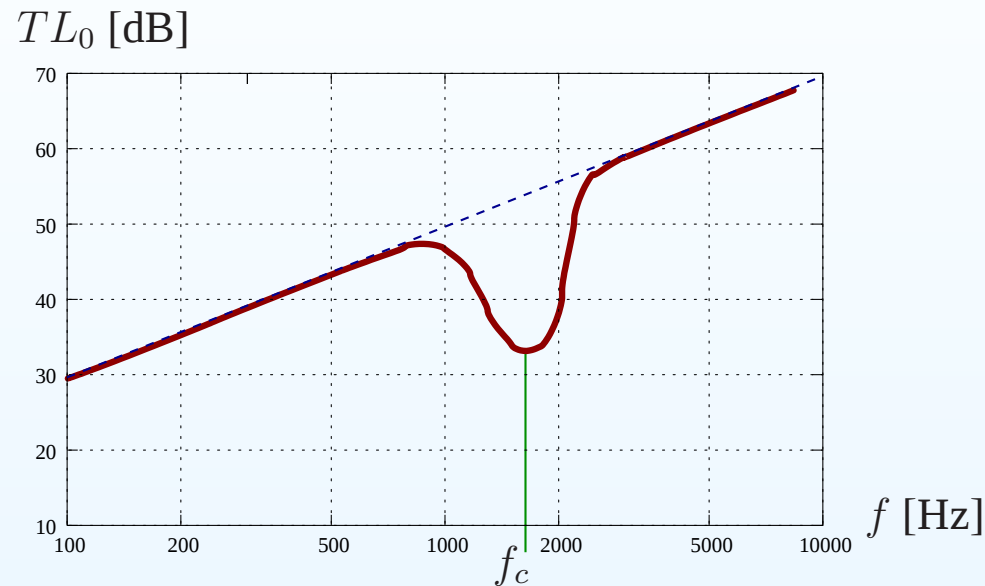
Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A koincidencia
jelensége

● A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

A koincidencia-frekvencia közelítő formulája



Közelítő számításokban $c = 340$ m/s-ot és egy átlagos $\mu = 0,33$ -as értéket szokás használni. Ekkor:

$$f_c = \frac{60\,160}{c_d d}$$

Érdekes: f_c fordítottan arányos d -vel. Azaz vastagabb falak koincidencia-frekvenciája kisebb.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A koincidencia
jelensége

- A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: Egy 25 mm vastag gipszkarton esetén mennyi a koincidencia-frekvencia?



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

- Hajlítási hullámok
- A koincidencia
jelensége

• A
koincidencia-frekvencia
közelítő formulája

Vastagsági állóhullám

Egy példa

Példa: Egy 25 mm vastag gipszkarton esetén mennyi a koincidencia-frekvencia?

Megoldás: Táblázatból: $c_d = 2000$ m/s. Így az előző formula alapján

$$f_c = \frac{60160}{2000 \cdot 0,025} = 1200 \text{ Hz}$$

1000 Hz felett tehát a vékony réteg közelítéshez képest a hanggátlás lecsökken, ami kellemetlen, mert az emberi fül épp ezen a frekvencián a legérzékenyebb.



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám



Vastagsági állóhullám



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

Ha a fal vastagságában állóhullámok alakulnak ki, a fal hanggyengítése igen alacsony lesz, mert erősen rezegni fog a túloldala is.

Az állóhullámokról korábban tanultak alapján ez olyan λ_k hullámhosszakon következik be, amikor:

$$d = k \frac{\lambda_k}{2} \quad (k \text{ egész})$$

Az ehhez tartozó frekvenciák:

$$f_k = \frac{c_l}{\lambda_k} = \frac{c_l}{2d} k$$

A legkisebb frekvencia, aminél ez bekövetkezik:

$$f_1 = \frac{c_l}{2d}$$

Belátható: $f_1 \gg f_c$



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám



Egy példa

Példa: A hang sebessége a betonban 3100 m/s . Számolja ki, mi a legkisebb frekvencia, melynél a vastagsági állóhullámok bekövetkeznek egy 20 cm vastag betonfal esetében! Számolja ki a koincidenciafrekvenciát is!



A hang gyengülése,
elnyelődése

Hangvisszaverődés
nagy méretű
közeghatáron

Hang elnyelődés
közegek belsejében

Hang elnyelődés zárt
térben

Hang elnyelődés
falakban

Egy tömbben rezgés

Hajlítási hullámok

Vastagsági állóhullám

•

Egy példa

Példa: A hang sebessége a betonban 3100 m/s. Számolja ki, mi a legkisebb frekvencia, melynél a vastagsági állóhullámok bekövetkeznek egy 20 cm vastag betonfal esetében! Számolja ki a koincidencia-frekvenciát is!

Megoldás:

Az állóhullámok közül a legkisebb frekvenciájú:

$$f_1 = 3100 / (2 \cdot 0,2) = 7750 \text{ Hz.}$$

Ugyanakkor a koincidencia-frekvencia:

$$f_c = 60160 / (3100 \cdot 0,1) = 194 \text{ Hz.}$$

200 Hz környékén tehát relatíve magas az áteresztés (koincidencia).

A vastagsági állóhullámokból következő csökkenés 7750 Hz-en nem ennyire zavaró, mert itt már fülünk érzékenysége is kisebb és a fal anyaga is elnyelő ilyen frekvencián.