

SZAKDOLGOZAT

AZ L1-120 LABORHELYISÉG AKUSZTIKAI TERVEZÉSE

HAJMA PÉTER

2005

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
1 Bevezetés	4
2 A teremakusztika elméleti alapjai.....	5
2.1 Teremakusztika.....	5
2.2 Az utózungési idő	7
2.3 Az utózungési idő számítása.....	8
2.3.1 Sabine formula.....	8
2.3.2 Eyring-formula	10
2.4 Az utózungési idő mérése	11
2.4.1 Impulzusválaszos utózungési idő mérés	11
2.4.2 Megszakításos (zajgenerátoros) RT mérés	11
2.5 Az elnyelési tényező mérése.....	13
2.5.1 Zengőszobában	13
2.5.2 Állóhullám módszer	13
2.6 Hangszigetelés	14
2.7 Hangenergia-eloszlás különböző jellegű zárt terekben	15
2.7.1 Kockaszerű tér[6].....	16
3 A terem adottságai	17
3.1 A terem határoló felületek	17
3.2 Berendezési tárgyak.....	18
3.3 Képek a teremről.....	18
4 A terem hangszigetelése, zajvédelme	19
4.1 Az utcafront zajszigetelése	19
4.2 Belső falak zajszigetelése	20
4.3 Födémek szigetelése	20
5 A labor teremakusztikai jellemzése	21
5.1 Az utózungési idő és az egyenértékű elnyelési felület elméleti számítása	22
6 Az utózungési idő mérése a teremben	23
6.1 A mérés eszközei:	23
6.2 A mérés menete	23
6.3 A mérési eredmények feldolgozása	25
7 A terem egyenértékű elnyelési felülete.....	27
8 A számolt és mért eredmények összehasonlítása	28
8.1 A mérési eredmények értékelése	28
9 Adott frekvencián hatékony hangcsillapító burkolatok.....	29
9.1 Hullámhosszon alapuló megoldások	29
9.2 Vékony perforált lemezzel takart nyitott pórusú anyag.....	29
9.3 Rezonátorok.....	30
9.3.1 Lemezrezonátor	30
9.3.2 Helmholtz rezonátor	33
10 A kivitelezés lehetséges megoldásai az L1-120 labor akusztikai kialakításához	35
10.1 Kereskedelmi forgalomban kapható akusztikai álmennyezet.....	35
10.2 Nem előregyártott elemekből építkező megoldás.....	36
10.3 Lemezrezonátorok	36
10.3.1 Lemezrezonátorok elhelyezése.....	37
10.4 Perforált lemezes megoldások elhelyezése.....	37
10.4.1 „Rezonátor-doboz”	37
10.5 A rezonátorok adatai:.....	39

10.5.1 1-es számú lemezrezonátor	39
10.5.2 2-es számú lemezrezonátor	40
10.6 Soklyukú rezonátorok	41
10.6.1 3. számú rezonátor	41
10.6.2 4. számú burkolat	42
10.7 Az 1kHz feletti frekvenciatartományban hatásos burkolat	44
10.7.1 Félnehéz függöny [6]	44
10.8 A hangelnyelő ék elve szerint működő műanyaghab burkolat	45
11 A kívánt utózungési idő tercsávonkénti határértékei	46
12 A hangelnyelő felületek mennyisége	47
13 Az utózungési idő becslése a tervezett hangelnyelő felületekkel	48
14 A kivitelezett hangelnyelő burkolatok	49
14.1 Konstrukció	49
15 A burkolat kivitelezési költsége és annak összehasonlítása egy kereskedelmi forgalomba kapható álmennyezet rendszerrel	52
15.1 A burkolat anyagköltsége	52
15.2 Az ISOVER OWAcooustic álmennyezetek költségei	52
15.3 A mennyezetburkolatok összehasonlítása	53
16 Mérés az elkészült burkolatokkal ellátott teremben és az eredmények értékelése ...	54
16.1 Mérési eredmények	54
16.2 Az eredmények értékelése	54
17 Összefoglalás	57
Irodalomjegyzék	59
Függelék	60
18 Utózungési idő mérése a Brüel&Kjær 2260 Observer típusú precíziós moduláris zaj analizátorral. [4]	60
18.1 BZ7220 Reverberation Time Software kiválasztása:	60
18.2 A méréshatár beállítása	61
18.3 A Beállítások menü	61
18.3.1 <Define Job> menü:	61
18.3.2 A <Meas. Options> almenü:	61
18.3.3 Az utózungési idő mérés beállításai	62
18.3.4 A mérési adatok tárolásának helye	62
18.3.5 A mérési eredmények tárolása	63
18.4 A mérés menete	63
18.5 Mérési eredmények másolása személyi számítógépre	66
18.6 Az adatok elemzése <i>Qualifier Type 7830</i> programmal	67

1 Bevezetés

Egy terem akusztika kialakításának legfontosabb meghatározója a terem felhasználási területe - ez határozza meg, hogy a tervezés során milyen határértékeket kell figyelembe venni az utózengési idő és a zajcsillapítás terén.

A terem akusztika kialakításánál figyelembe kell venni, hogy általában nem az a cél, hogy minden hangvisszaverődést megszüntessünk, hanem hogy a célnak megfelelően legyen kialakítva a terem. A természetes komfortérzet kialakításához kell egy bizonyos mennyiségű visszhang a teremben, főleg ha hangszeres zenéről vagy énekről van szó. Ezért általában a stúdiótérnek kialakított helyiségekben két szomszédos fal jelentősen hangenergia elnyelő tulajdonságú, a másik kettő fal inkább a beérkező hangenergiából nagyobb részt ver vissza, kialakítva ezzel az emberi hallásnak megfelelő lecsengést és visszhangot. De nem csak zenei felhasználású célú termekben van nagy jelentősége a megfelelő kialakításnak, hanem például egy orvosi rendelőben is nagyon fontos, hogy ne legyen teljes az elnyelés, de törekedni kell az utózengési idő alacsony szinten (0,5 s) tartására, hogy növeljük az otthonosság érzetét. Az utózengési idő alacsonyan tartása közvetve javítja a helyiségek közötti hangszigetelést is.

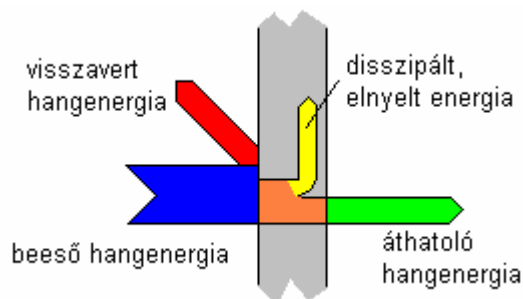
Az L1-120 labor akusztikai kialakítása során egy olyan terem megvalósítása a cél, melynek utózengési ideje ismert és sávonként kiegyenlített, alkalmas akár többszörös hanganyagok lehallgatására, akár oktatási célú hangfelvételek készítésére.

2 A teremakusztika elméleti alapjai

2.1 Teremakusztika

A teremakusztika külön a termék akusztikájával, hangzásával foglalkozik. A tervezés során a cél egyrészt a jobb hangzás, másrészt a hangszigetelés: zajmentesség ki- és befelé.

Egy akadályba (fal) ütköző hanghullám energiájának (incident energy) egy része visszaverődik (reflected energy), kisebb része áthatol azon (transmitted energy), a legkisebb része pedig hő formájában melegíti azt (absorbed energy).



Ha a hullámhossz jóval kisebb a fal felületénél, a beesési- és visszaverődési szögekre, a hangutak kiszámításához alkalmazhatók a fénytörési törvények (pld. beesési szög = visszavert szög).

Az 50ms-nál található a visszhang-küszöb (ez kb. 17 méteres távolságnak felel meg), e felett visszhangot fogunk érzékelni. A visszhang káros jelenség, rontja a beszédérthetőséget és a hangzást is. Ugyanakkor a jó hangzáshoz visszaverődésekre szükség van, a süketszobának zeneileg nem jó az akusztikája (nem is ez a célja). Többutas hangterjedéskor a visszaverődések hozzátartoznak a zenei élményhez.

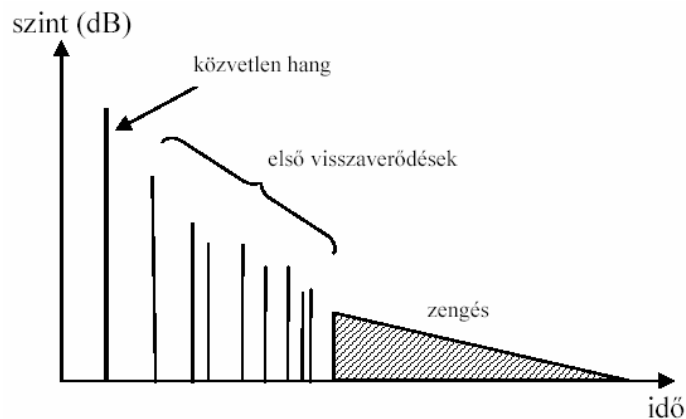
A hangenergia egy pontban a direkt és a visszavert hullámok energiájának az összege. Ez lehet erősítés és kioltás is (interferencia). A terem komplex rezonátor, természetes rezgő módosukkal. A kialakuló hullámtér elsősorban a hullámhossz és a terem geometriájától függ – a módusai ugyanúgy tárgyalhatók, ahogy egy húr rezgései. A terem természetes módusai (rezonanciái) helyi maximumokat és minimumokat hoznak létre, amelyek a geometriai alaktól és mérettől és a hullámhossztól függ. Érdekessége, hogy nyomás duplázódása lép fel a reflektív

felületeknél és nyomásmaximum a sarkokban. Gyakorlatilag a konkurensen, időben eltolódva megjelenő módusok azok, amelyek létrehozzák a diffúz teret.

A falban elnyelt hangenergiát általában állandónak tekinthetjük és hő formájában szabadul fel. Mivel tökéletes visszaverődés csak elméletben van, a betáplált hangenergia egy teremben fokozatos elvész, ezért ha ott állandó energiaszintet akarunk tartani, akkor a veszteségeknek megfelelően azt állandóan pótolni kell. Ha ez a betápláló forrás leáll, az energia exponenciálisan esni kezd. Ennek mértéke függ az anyagtól, a frekvenciától és a beesési szögtől is.

2.2 Az utózengési idő

A legfontosabb paramétere egy teremnek az utózengési idő (reverberation time). Az az időtartam, ami alatt adott, kezdeti hangnyomásszint szint 60 dB-t esik (1000-ed részére csökken a nyomás). [9]



Az utózengési időről elmondhatjuk, hogy

- nagy, ha sok a reflexió (pl. fürdőszobában)
- kicsi, ha kevés a reflexió (pl. bútorok, könyvek között)
- frekvenciafüggő: kis frekvenciáknál hosszabb (nehezebb elnyelni)
- meghatározza a terem felhasználhatóságát
- a nagy utózengési idő rontja a beszédérthetőséget és a zene élvezhetősége is csökken

- zenéhez kb. maximum 1...3 s szükséges

Diagrammal is megadhatjuk értékét.

Az utózengési idő megadja a terem felhasználhatóságát. Egy TV stúdió, rádió stúdió 1 s alatti utózengési idővel rendelkezik, koncerttermek 1-2 s közöttivel, nagyobb templom belső tere 3s-nál hosszabb idővel is rendelkezhet.

2.3 Az utózengési idő számítása

Létezik két empirikus (megfigyelésen alapuló, tapasztalati, azaz nem egzakt matematikai levezetésből adódó) formula. Az utózengési idő értéke függ a terem térfogatától (V) és az ún. abszorpciótól (elnyelés).

2.3.1 Sabine formula

Nem túl kicsi utózengési idő esetén alkalmazzuk a Sabine formulát, amely teljes formájában a következő:

$$RT = \frac{0,161 \cdot V}{4mV + S \cdot \alpha} \text{ ahol}$$

V = a terem térfogata

$4 \cdot m \cdot V$ = hangelnyelés

S = a szoba felületeinek teljes nagysága

α = a hangelnyelési együttható középértéke

A levegő elnyelését a $4mV$ -vel vesszük figyelembe egy teremben. Ezt nagy termekben kell tenni, de elhanyagolható a kis termekben. Ha a hangelnyelés elhanyagolható mértékű, akkor az utózengési idő meghatározható a terem hangelnyelésének összegéből a terem térfogata arányában.

$$RT = \frac{0,161 \cdot V}{A}$$

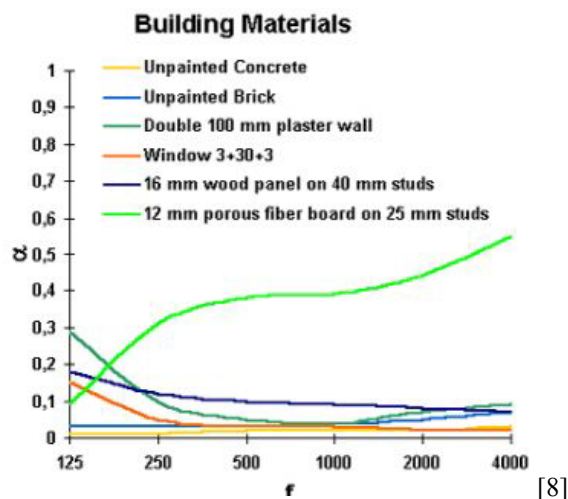
Ahol az utózengési időt sec-ban kapjuk meg, ha V -t köbméterben, A -t négyzetméterben helyettesítjük, a 0,161-es konstansnak pedig [s/m] a dimenziója.

Az A itt nem a felületet jelenti közvetlenül, hanem az abszorpciót:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i$$

Ebben a képletben az S változó már ténylegesen egy adott felületet jelent négyzetméterben, a hozzá tartozó elnyelési tényezővel (α). Az elnyelési tényező általában adott, táblázatból kikereshető, vagy diagrammról leolvasható.

Néhány általában használt építőanyag jellemzői grafikonon ábrázolva:



és a szokványos felületképzési anyagok jellemzői táblázatba foglalva:

	Oktávsvávok középfrekvenciái Hz					
A felület jellege	125	250	500	1000	2000	4000
Nyers beton	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Glettel betonfelület	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Vakolatlan téglafal, fugák kikenve	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
Cementtel javított mészhabarcs vakolat	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
Glettel vakolat	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
Tapéta vakolt felületen	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08
Olajmázolás merev Szerkezeten	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Egyrétegű ablak 3 mm vastag üveggel	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Kétrétegű ablak 3-3 mm vastag üveggel	0,02	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02
PVC, vagy linóleum	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
Padlóburkolat	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
Gumi padlóburkolat	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
Hajópadló (párnafákra szegezett fenyőfa lécek)	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Parketta nem úsztatott Aljazaton	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Parketta úsztatott Aljzatbetonon	0,10	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06

Gyakorlatilag arról van szó, hogy a különböző anyagú felületeket súlyozzuk. Így ha van egy betonszoba adott felülettel és alfával, akkor az azon nyitott faajtó felületét is a fa alfájával kell súlyozni.

Alfa mérhető is, és számolható is.

α = elnyelt energia/beeső energia.

Az elnyelési tényező frekvenciafüggő.

Ez a képlet nagy utózengési időknél használatos, és egyenletes terjedést feltételez minden irányban (izotróp), a terem módusait elhanyagoljuk. Nagyobb A esetén az eredmény egyre pontatlanabb lesz, és egyre kisebb utózengési idő esetén is.

2.3.2 Eyring-formula

Kisebb termek esetén a másik használatos képlet az Eyring-formula:

$$RT = \frac{0,161 \cdot V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

ahol egy átlagos alfával dolgozunk:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{\sum_i S_i} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_i}$$

és

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_i$$

Akkor a legpontosabb ez a formula, ha az alfák kb. egyelők (hátrány), ugyanakkor matematikailag korrektebb, mert süketszobára, ahol alfa értéke egy, utózengési időre zérus jön ki.

2.4 Az utózengési idő mérése

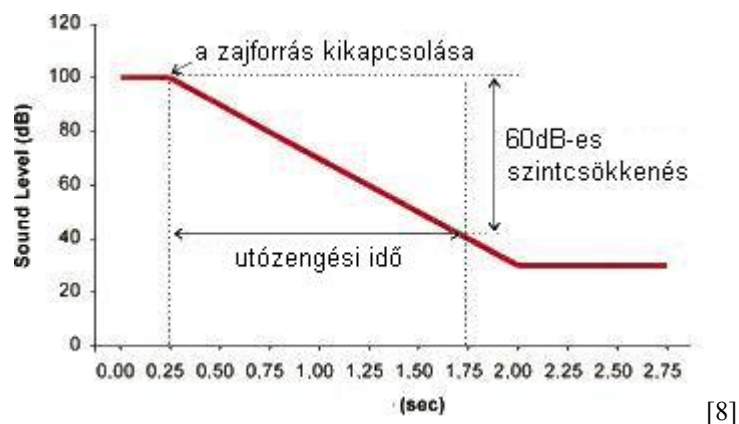
2.4.1 Impulzusválaszos utózengési idő mérés

A legjobb az impulzusválaszos mérés, amikor impulzussal gerjesztjük a termet (létezik kimondottan erre készült pisztoly-hangforrás, de egyszerű papírzacskó durrantás is megfelel). Majd mérjük azt az időt, amikor a kezdeti „bumm” szintje 60dB-t esik.

Hátránya a módszernek, hogy kevés hangenergiát közöl kis frekvenciákon, nem reprodukálható és nem biztos, hogy elég sokáig tart az impulzus.

2.4.2 Megszakításos (zajgenerátoros) RT mérés

A zajgenerátor fehérzajt ad ki magából (esetleg rózsaszín zajt, ami a fehérzajnak -3dB/oktávval csökkenő verziója). A rózsaszín zajt akkor használjuk, ha az átvitel olyan szűrőn keresztül történik, melynek sáv szélessége a frekvenciával arányosan nő, dupla sáv szélességű lesz oktávonként. Ilyen szűrőbe egyre kevesebb energia kell ahhoz, hogy a közölt energia konstans maradjon, méghozzá pontosan 3dB/oktávval kevesebb energia a frekvenciában felfele haladva. Az ilyen szűrők sáv szélessége a logaritmikus tengelyen egyforma csak. Ezek tipikus oktáv- vagy tercésáv szűrők, melyek értelemszerűen változó szélességűek, ahogy egyre nagyobb frekvenciákon állítjuk elő. A hangforrás legyen hangos, mely általában hangszóró vagy ún. referencia zajgenerátor, Miután ezt bekapcsoltuk és feltöltöttük a hangteret energiával beáll egy állandó szint, majd kikapcsoljuk, és mérjük mennyi idő alatt esik az a szint 60dB-t.



Az így mért értéket T60-al jelöljük. Azonban ekkor csökkenés nem mindig mérhető az alapzaj miatt.

Ha ez a helyzet, akkor a -40dB-es pontot vagy csak a -20dB-es pontot mérjük meg, és ebből interpolációval számítjuk ki a hatvanashoz tartozót. Ilyenkor T40-el ill. T20-al jelöljük az értékeket.

Ettől függetlenül a T a -60dB-es ponthoz tartozik, az index a mérés határát mutatja (tehát T40 nem a -40dB-es pont ideje, hanem annak a -60dB-es pontnak, amihez a mérést csak -40dB-ig végeztük).

Lehetőség van arra is, hogy a zajforrással impulzust adunk ki, de ekkor a grafikus eredmény nem elég, számításokra is szükség van. Ezen (ún. Schroeder) módszer előnye, hogy pontos és reprodukálható eredményeket ad, ráadásul gyorsabban mint a fenti „kikapcsolós” módszer.

Az ilyen méréshez tehát nem csak pontos hangszintmérés szükséges hanem pontos időmérésre is szükség van. A mikrofon és a hangforrás helyzete is befolyásolja a mérést a terem-módusok miatt, ezért érdemes a forrást a sarok felé tenni, ahol a terem-módusoknak nyomásmaximuma van, illetve több helyen is mérni, majd átlagolni.

Gyakran a mérés az utózungési idő változására irányul. Ilyenkor a hangelnyelő anyagok mennyiségét kell kiszámítani, ami adott csillapítást okoz egy teremben. Először ki kell számolni alfa segítségével, hogy mekkora felületre van szükség, azt be kell vinni a terembe majd folyamatos mérés mellett annak méretét lehet változtatni (in situ mérés). [9]

2.5 Az elnyelési tényező mérése

2.5.1 Zengőszobában

Elnyelési tényezőt tipikusan zengőszobában mérünk. Adott felületű (10 négyzetméteres) mintát vizsgálva, majd mérés után a Sabine-formulából visszaszámolva (ismert, megmért utózengési idejű zengőszobában):

$$\alpha = \frac{0,161 \cdot V}{S} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_e} \right)$$

A képletben α a keresett változó, S a mintaanyag felülete, V a terem térfogata, T_s az utózengési idő a mintaanyaggal, T_e pedig a zengőszoba üres utózengési ideje (a minta nélkül). Ezért van szükség zengőszobára, hogy annak nagy legyen a T_e ideje és ezzel pontosabb méréseket lehessen végezni.

A mérést általában a szabvány által előírt oktávsváiban vagy tercsávokban végezzük és így frekvenciafüggő diagramot rajzolhatunk.

2.5.2 Állóhullám módszer

Létezik egy másik, az állóhullám módszer is. Ekkor egy csőre van szükség, egyik végében hangszóró, a másik végében a minta zárja le azt. A hangszóró állóhullámokat hoz létre a csőben, és az alfa kiszámítható a létrejövő nyomás maximumok és a minimumok arányából (összehasonlítva a tökéletes reflektorral való lezárás esetével) Ehhez egy mozgó mikrofont kell végigvinni a cső hosszában. Előnye, hogy gyors módszer, reprodukálható és csak kis méretű mintára van szükség. Hátránya, hogy alfa a normál merőleges beesés esetére jön ki és csak akkor lesz igaz, ha az a kis mintadarab jellemző a nagyobb felületre is.

Némileg bonyolultabb módszerrel a beesési irányoktól függő módszer is létezik, ekkor szinuszos hullám burstját bocsátják ki meghatározott helyekről és abból végeznek számítást, melyhez speciális mérőszobára sincs szükség, de sokáig tart és nem olyan pontos. [9]

2.6 Hangszigetelés

A levegőben terjedő hangok hangszigetelésének (Sound Insulation) számszerűsítő adata a falra vonatkozik, jele R (Sound Reduction Index). Mértékegysége dB, a beeső hangteljesítmény és az átjutott teljesítmény hányadosa. Függ a frekvenciától és a beesési szögtől.

$$R = 10 \log \frac{W_i}{W_t}$$

ahol i az incident (beérkező), míg t a transmitted (átjutott) jele. Egy homogén falfelület indexének diagramja a frekvencia függvényében felosztható részekre. Ez attól függ, hogy a fal mely tulajdonsága fejt ki éppen hatását: merevség, rezonancia, tömeg vagy koincidencia effektus. A tömeg-tartományban érvényes szabály, hogy az index 6 dB-el nő a frekvencia duplázásával (oktávonként), ha a tömeget változatlanul hagyjuk, vagy akkor is, ha a tömeget (a vastagságát) kétszerezzük meg a falnak egy adott frekvencián.

A tömeg-törvény magasabb frekvenciákon megváltozik, a koincidencia hatás következtében. Ez akkor fordul elő, ha a beeső hang hullámhossza megegyezik a fal elhajlásának hullámhosszával. Ezek a hajlító hullámok a falban fel-le terjednek (hullámszik a fal), és mivel a beeső frekvenciák minden irányból érkeznek, lesz olyan kitüntetett irány és frekvencia, amikor ezek oszcillálni kezdenek és hangenergia fog átjutni, gyakorlatilag erősítés nélkül. Keletkezik egy vékony frekvenciatartomány, ahol a fal akusztikailag transzparens lesz. Azt a legkisebb frekvenciát, ahol a koincidencia fellép kritikus frekvenciának nevezzük – ez akkor lép fel, ha a beeső hang éppen csak súrolja (majdnem párhuzamosan esik be) a falat. Pld. egy 3 cm vastag furnérlemez kritikus frekvenciája 500 Hz, ami éppen a beszéd tartomány közepe, így alkalmatlan beszédhang szigetelésére. Ha növelni akarjuk a kritikus frekvenciát anélkül, hogy a szigetelés változzon, dupla falat kell létrehozni. Ilyen esetben a két elem vastagsága meghatározó a frekvencia értékében, ugyanakkor eleve növeli az R -t a tömeg-törvény következtében. Érdekes két különböző vastagságú elemet használni, hogy azok kritikus frekvenciája ne egyezzen meg. Ez a módszer azonban a rezonanciafrekvencián nem okoz változást a görbében. A

rezonancia tartomány csak akkor használható ki előnyösen, ha a feladat a mélyfrekvenciák elnyelése erősen visszhangos teremben.

2.7 Hangenergia-eloszlás különböző jellegű zárt terekben

Zárt terekben a hangforrás által kisugárzott energia térbeli eloszlását - a hangteljesítményszint és a hangnyomásszint közötti összefüggést számos tényező befolyásolja. A legfontosabbak:

- a térfogat nagysága és a tér alakja,
- a térhatároló felületek hangvisszaverő és hangelnyelő tulajdonságai,
- a térben lévő tárgyak (pl. gépek, bútorok, anyagok) hangelnyelő és energiaszóró tulajdonságai,
- a levegő hangelnyelése, amely csak nagy terek és nagy frekvenciák esetén játszik meghatározó szerepet.

A hangterjedés törvényszerűségei és gyakorlati szempontok alapján a következők szerint csoportosítjuk a zárt tereket.

Kis tér, 200 m^3 -nél nem nagyobb térfogattal, amelyben a térhatároló felületek között lejátszódó többszörös hangvisszaverődések - többé-kevésbé egyenletesen - szétszórják a hangforrás által kisugárzott hangenergiát. Kockaszerű 200 m^3 -nél nagyobb térfogattal, amelyben a hangforrás közelében a hangforrásból közvetlenül érkező távolságfüggő energia-, a térhatároló felületek közelében pedig a visszaverődések szórt (diffúz) energiája van túlsúlyban. Lapos tér, a belmagassághoz viszonyítva rendkívül nagy, vízszintes irányú méretekkel, amelyben - a padló és a födém közötti hangvisszaverődések következtében - a hangforrástól távolodva folytonosan csökken a hangenergia-sűrűség.

2.7.1 Kockaszerű tér[6]

A feladatban szereplő terem kiterjedései alapján ebbe a csoportba tartozik.

A kockaszerű jelzővel arra utalunk, hogy a tér három irányú méretei minél kevésbé térjenek el egymástól. A szakirodalom szerint kockaszerűnek tekinthetjük a 200 m^3 -nél nagyobb térfogatú üres helyiségeket, ha belmagasságuk nagyobb, mint a legnagyobb vízszintes irányú méretük $1/3$ -a. A térfogat felső határát nehezen lehet definiálni, mert 21500 m^3 térfogatú sportcsarnokban is kimutattuk a kockaszerű terekre jellemző hangterjedési törvényszerűséget. A kockaszerű tér átmenetet képez a szabad tér és a diffúz hangterű kis tér között: a hangforrás közelében a hangforrásból közvetlenül érkező - az r távolságtól függő - w_r energiasűrűség van túlsúlyban, a térhatároló felületek közelében pedig a w_d diffúz komponens. A tér bármely pontjában fennáll az összefüggés:

$$w = w_r + w_d \text{ [J/m}^3\text{]}, \text{ ahol}$$

w összes energiasűrűség a tér valamely pontjában J/ m^3 ,

w_r a hangforrásból közvetlenül érkező összetevő J/ m^3 ,

w_d a térhatároló felületekről visszaverődő összetevő J/ m^3 .

3 A terem adottságai

A Széchenyi István Egyetem L1-120-as laborjának adottságai a következők:

3.1 A terem határoló felületek

A terem egy fala (az egyik rövidebb, lépcsőház felőli) merev vasbeton szerkezetű. A folyosó felőli (hosszú) és a szomszédos labor felőli (rövid) fal kéthéjú gipszkarton lemez hang és hőszigetelő anyaggal kitöltött légréssel. A falak csak festéssel vannak ellátva. A folyosó felőli falon 1 db 3m^2 felületű kétszárnyú furnérozott fa ajtó található. A padló és mennyezeti födém azonosan alulbordás vasbeton nyersfödém. A mennyezet a terem eredeti állapotában burkolatlan, csak festett. A padló 8mm vastag padlószőnyeg borítású. Az utcafront felőli fal nagy része üvegfelület, 2 x 3mm-es üveg 12mm-es légréssel alumínium-acél keretben. Az ablakok alatt lamellás kialakítású faforgácslapokkal burkolt fűtőtestek találhatóak.

A terem jellemzésekor mindenképpen említést érdemel, hogy a mennyezet felülete a gerendák jelentős (540mm-es függőleges) méretének köszönhetően sokkal nagyobb, mint egy azonos alapterületű sík felületű födémmel fedett terem esetében.



A mennyezet ilyen jellegű bordázottsága megítélésem szerint jótékony hatást gyakorol a terem akusztikájára, a gerendákra merőleges hullámok kialakulását és terjedését gátolja, a többszörös visszaverődés hangenergia csökkenést idéz elő (bár csak kis mértékben a kicsi elnyelési tényező miatt), ezzel kismértékben csökkentve a terem utózungési idejét. A későbbiekben ismertetésre kerülő akusztikai burkolatok számára is jelentős mennyiségű elhelyezési felületet biztosít.

3.2 Berendezési tárgyak

A teremben található bútorok: 4 db íróasztal a számítógépeknek és multimédiás eszközöknek, 1 db televízió-állvány (ezek mind bútorlapból kialakítottak), 1 db lemez-szekrény és 2 db kárpitozott szék. A terem világítását 6 x 4 db neon világítótest szolgálja, fényterelő lamellás borítással, mely utóbbinak kis mértékben van hangterjedést/hangelnyelést befolyásoló hatása. Ezen felül még a műszaki berendezések: 7 db különböző méretű televíziókészülék és számítógépes monitor, 2 db számítógép-ház, 5 db hasonló méretű AV eszköz az asztalokon és 6 db hangsugárzó-doboz. Az előbb felsorolt tárgyak felülete már nem elhanyagolható, ha kismértékben is, de befolyásolja a terem akusztikáját.

3.3 Képek a teremről



Berendezési tárgyak és falfelületek a teremben

4 A terem hangszigetelése, zajvédelme

A labor zajszigetelése nem értékelhető jónak. A beltér felőli falak túlnyomó többségének léghangszigetelési képessége és a meglévő nyílászárók hangszigetelési képessége a kialakításuk alapján nem elegendő ahhoz, hogy a beltérben az elvárásoknak megfelelő alacsony zajszint legyen. Az utcafront felőli nyílászárók vékony tömítései előregedtek, felkeményedtek, az így kialakult tömítetlen rések vonalsugárzóként közvetítik a beltérbe a zajokat. Az egybefüggő üvegfelületek táblaméretéből és vastagságából adódóan sem várható el jó hangszigetelő képesség (vékony üveg – nagy felület). A gipszkarton falak illesztései rendkívül rosszak, közel centiméteres méretű rések találhatóak a földem és ezen falak találkozásánál. A terem ajtajának illesztései nem tömítettek. Ezek a tömítetlen rések is mind vonalsugárzóként viselkednek.

Ezen szakdolgozat csak röviden tér ki a labor zajszigetelésének lehetőségeire, mivel azok nagymértékű szerkezeti átalakítást igényelnének. Tehát a következőkben csak néhány alapvető lehetőség kerül ismertetésre a terem zajszigetelésének megoldására.

4.1 Az utcafront zajszigetelése

Az előbbieken ismertetetteknek megfelelően az utcafront zajszigetelésére többek között a következő három lehetőség van, a zajszigetelő képességük szerinti növekvő sorrendben:

1. a meglévő nyílászárók szigeteléseinek cseréje (ez a megoldás csak a rések hangszigetelését javítja)
2. az 1. lehetőségen felül egy további, nehéz (vastag) üveggel ellátott nyílászáró-réteg felszerelése a jelenlegi üvegfelületek külső vagy belső oldalára – ez a megoldás javítja az üvegtáblákkal elérhető hangszigetelést; vagy részben kéthéjű gipszkarton fal felszerelése és részben üvegezett nyílászárók felszerelése az eredeti nyílászárók elé a teremben.
3. hangszigetelés szempontjából legjobb megoldásnak tekinthető a meglévő nyílászáró-felületek kiváltása kevesebb és jobb hangszigetelésű nyílászárókra és hajlításmerev szerkezetű falkiképzésre (tömör téglavagy kéthéjű

falkiképzésre, ami jelentős javulást eredményezne az utcai zajok csillapítása szempontjából. A mostani nyílászárók súlyozott léghanggátlási száma szerkezetükből adódóan – mivel a tanszéken nem áll rendelkezésre eszköz a mérésre – 25-32dB, a javasolt megoldásban a falfelületre (például 12cm-es mészhomok-tégla fal + 2x1,5cm vakolat) 50dB és egy modern (például a Kömmerling EuroFutur Classic profilú ablak 9-16-4-es üvegezés esetében) 43dB, ami minimum egy nagyságrendnyi javulást eredményez.

4.2 Belső falak zajszigetelése

A terem belső falszigetelésének megoldására az egyik legkézenfekvőbb megoldás az illesztési hézagok megfelelő tömítése mindenhol és még egy falréteg kialakítása légréssel elválasztva az eredeti falszerkezettől – az egyszerű kivitelezhetőség kedvéért kéthéjús gipszkarton falként a légrésemben hangelnyelő anyaggal kitöltve.

4.3 Födémek szigetelése

A mennyezet és a padló hangszigetelő tulajdonságainak javítása nem indokolt, mivel azok jelen esetben is megfelelőek (felülről nem kell számítani lépéshangokra, mivel nincs több emelet, a labor alatt pedig csendes helyiség található).

5 A labor teremakusztikai jellemzése

A vizsgált teremben található felületek és azok elnyelési tulajdonságainak megismerése után és a felületük ismeretében kiszámolható a helyiség várható utózengési ideje adott frekvenciákon. A felületek közül kiterjedésben a legjelentősebb és épp ezért a hangenergia elnyelését a legjobban befolyásolók:

- a mennyezet vakolt és festett vasbeton felülete – minden frekvenciatartományban visszaverő tulajdonságú

- vakolt és festett hajlításmerev betonfal

- gipszkarton festett falak

- üvegfelületek

- padlószőnyeg

ezen felül pedig a berendezési tárgyak, úgymint:

asztalok, székek, szekrények, műszaki berendezések, burkolatok, mint például a radiátor faburkolata.

A fent felsoroltak közül csak a padlószőnyeg jó hangelnyelő képességű, a többi jelentős felület inkább hangvisszaverő tulajdonságú. Jelentős felületet képviselnek ezeken az anyagokon felül még a bútorok lapjainak szabad felületei.

A terem jelenlegi állapotában a hangelnyelést nem a magas hangelnyelő képességű anyagok okozzák, sokkal inkább a felületek mennyisége.

5.1 Az utózengési idő és az egyenértékű elnyelési felület elméleti számítása

A továbbiakban kétféle módszerrel – a Sabine és az Eyring formulával közelítem a terem utózengési idejét.

A következő táblázat tartalmazza az anyagok nevét (anyag), a valós felületét (A), a tercsávokban mérhető elnyelési tényezőket (α), az egyenértékű felületeket (S) és a számított utózengési időket. A táblázatban a vaslemez megnevezés a lemezszekekrényeket és a berendezések burkolatát foglalja magába, a pvc megnevezés pedig a monitorok burkolatát.

ANYAG	VALÓS FELÜLET	ELNYELÉSI TÉNYEZŐ					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
festett vakolt vasbeton	59,1	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
festett vakolt merev fal	14,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
festett gipszkarton	35,9	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
padlószőnyeg	29,6	0,02	0,03	0,06	0,15	0,3	0,4
ablaküveg	13,6	0,02	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02
ablak keret fém	1,2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
vaslemez	5,5	0,15	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01
bútorlap	11,7	0,3	0,2	0,15	0,1	0,15	0,1
tömör fa	2,5	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
pvc	5,5	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
székek (db)	2	0,49	0,66	0,8	0,88	0,82	0,82
személyek (fő)	2	0,15	0,23	0,61	0,97	1,14	1,14
EGYENÉRTÉKŰ FELÜLET							
festett vakolt vasbeton		1,182	1,182	1,773	1,773	2,364	3,546
festett vakolt merev fal		0,29	0,29	0,435	0,435	0,58	0,87
festett gipszkarton		0,718	0,718	1,077	1,077	1,436	2,154
padlószőnyeg		0,592	0,888	1,776	4,44	8,88	11,84
ablaküveg		0,272	0,816	0,408	0,408	0,272	0,272
ablak keret fém		0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
vaslemez		0,825	0,44	0,11	0,055	0,055	0,055
bútorlap		3,51	2,34	1,755	1,17	1,755	1,17
tömör fa		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
pvc		0,11	0,165	0,165	0,22	0,33	0,275
székek (db)		0,98	1,32	1,6	1,76	1,64	1,64
személyek (fő)		0,3	0,46	1,22	1,94	2,28	2,28

EGYENÉRTÉKŰ FELÜLET TERCSÁVONKÉNT					
8,941	8,781	10,481	13,44	19,754	24,264

SABINE KÉPLETTEL RT					
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
2,02	2,06	1,73	1,35	0,92	0,75

EYRING KÉPLETTEL RT					
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1,95	1,98	1,65	1,28	0,85	0,69

6 Az utózengési idő mérése a teremben

6.1 A mérés eszközei:

Brüel&Kjær 2260 Observer precíziós moduláris zajanalizátor

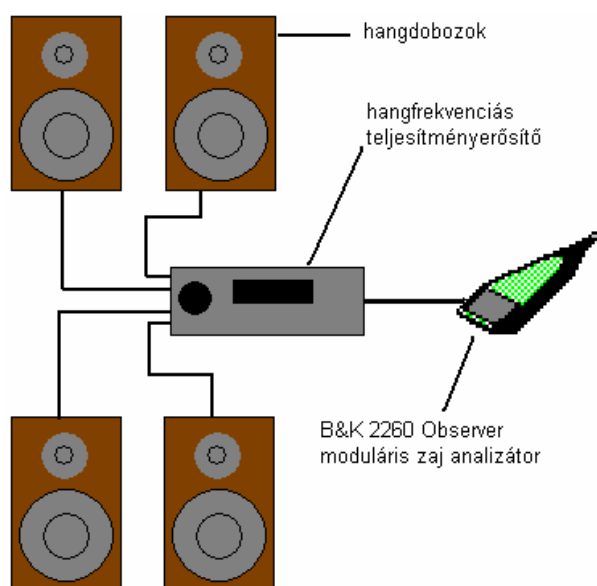
Denon AVR 3803 hangfrekvenciás erősítő

JMLab hangdobozok

Szükséges kábelek

6.2 A mérés menete

Az utózengési időt a helyiségben kétféle módszerrel mértem, azaz impulzusválasz módszerrel és zajgerjesztéses módszerrel. Mindkét méréshez a tanszék által a rendelkezésemre bocsátott Brüel&Kjær 2260 Observer típusú precíziós moduláris zajanalizátort használtam a BZ 7220 számú utózengési idő mérő szoftverrel (Reverberation Time Software). Az impulzusgerjesztést léggömbök illetve nagyméretű papírzacskók durrantásával értem el. A zajgerjesztéses mérési módszer esetében a precíziós moduláris zajanalizátor beépített zajgenerátorát használtam. Hangfrekvenciás teljesítményerősítőként a laboratóriumban található Denon AVR 3803 rádióerősítőt alkalmaztam és a labor felszereléséhez tartozó JMLab hangdobozokat használtam zajforrásként.



Az említett hangdobozok csak kis frekvenciákon tekinthetők körsugárzónak a frekvencia növekedésével szűkül az iránykarakterisztikája, tehát csak megkötésekkel alkalmas ilyen mérés elvégzésére. A hangdobozok (hangszórók) ilyen tulajdonságát úgy kompenzáltam, hogy a mérés során 4 db hangsugárzó egyszerre sugározta a zajjelet a lehető legegyenletesebb hangenergia-eloszlás érdekében. Ez a megoldás a terem egyik fő felhasználása - a többcsatornás hangrendszeren történő lehallgatás - során fellépő állapothoz is a legjobban hasonlít, így a mérési pontban jó közelítéssel ugyanolyanok voltak a körülmények, mint abban az esetben.

A mérés helyéül annak helynek a környezetét választottam, ahol a lehallgatást végző személy ülhet. A mérés során változtattam a mérőmikrofon irányát és elhelyezését, hogy a tér több pontjában is megmérjem az utózungési időt, amelyből aztán átlagolással számolható az egyenértékű elnyelési felület.

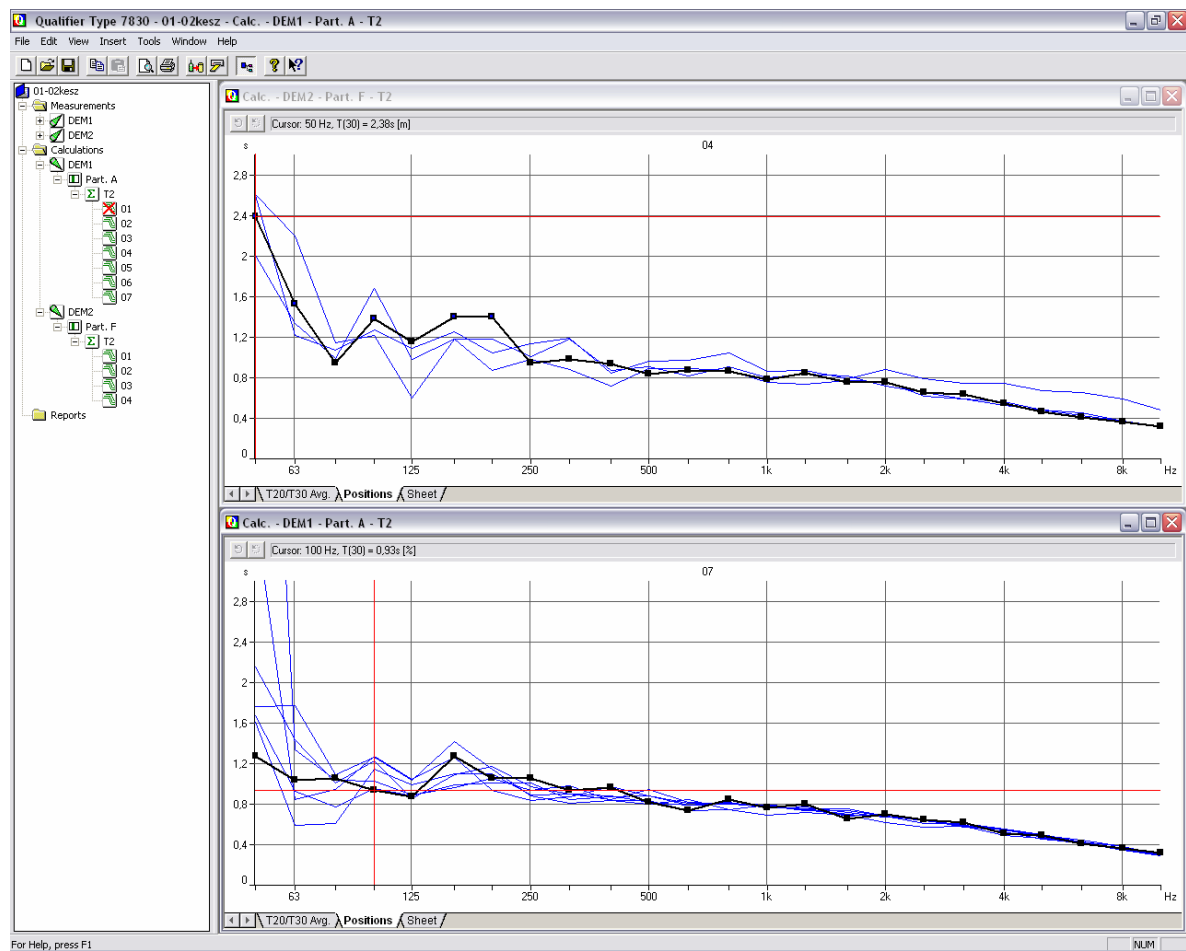
Az impulzusgerjesztéses mérés esetében az impulzus kialakításának helyéül a terem hosszanti irányának kétharmadát a keleti falhoz közelebb és a keresztirányának közepét választottam.

A mérés során 2 személy tartózkodott a teremben.

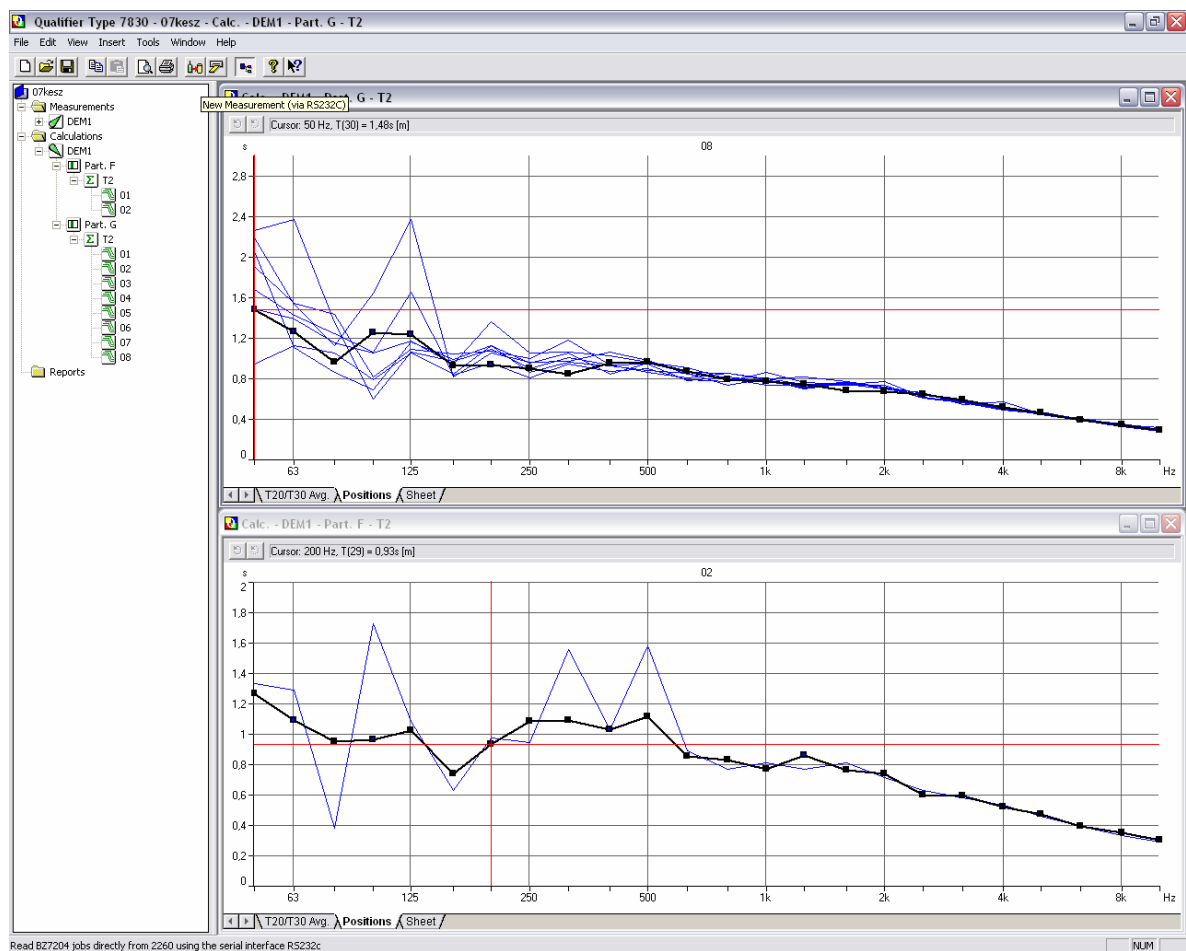
6.3 A mérési eredmények feldolgozása

Az Observer-rel készített mérések adatainak feldolgozását személyi számítógépen a Brüel&Kjær 7830 Qualifier programjával végeztem.

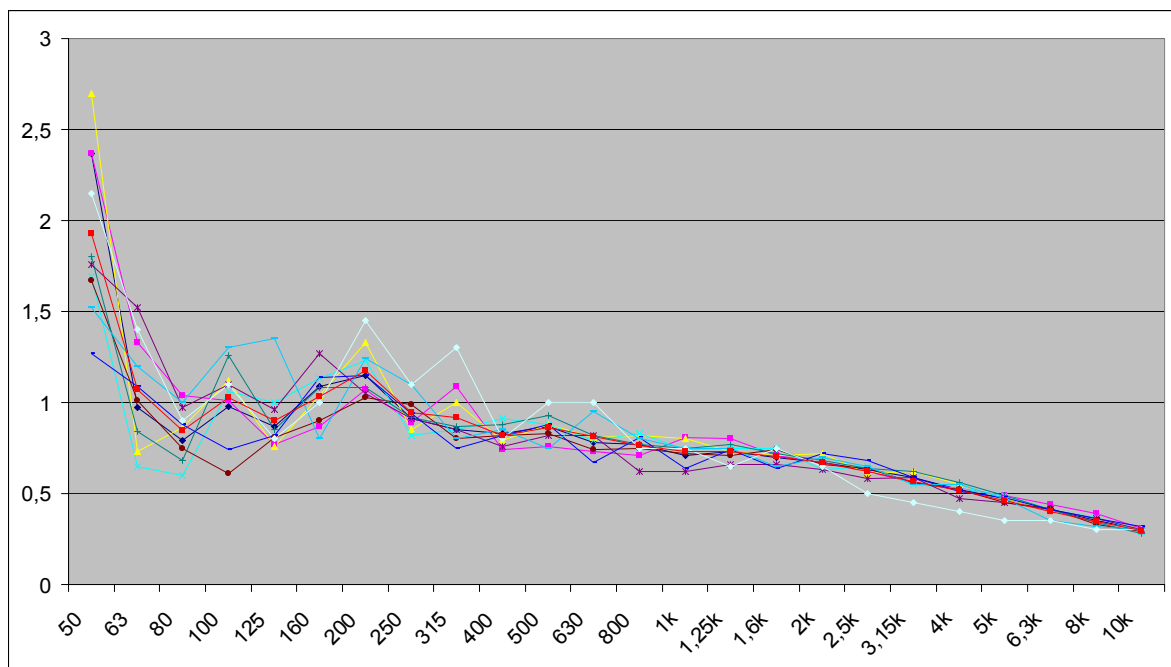
A programban lehetőség van a műszer által készített mérési eredmények importálására, azok diagramjainak megjelenítésére és azokból kalkulációk készítésére. A program használatával lehetőség van a lecsengési (decay) görbék elemzésére, lehetőség van a program által meghatározott, az utózungési idő számításához szükséges egyenes módosítására, ami a magas háttérzaj miatt szükségessé vált.



Mérési eredmények diagramjai (1)



Mérési eredmények diagramjai (2)



A mérési eredmények közös diagramban ábrázolva

7 A terem egyenértékű elnyelési felülete

A térhatároló felületek egyenértékű elnyelési felülete a Sabine formula átrendezésével:

$$A = \frac{0,161V}{RT}$$

Ezzel a képlettel számolva a terem egyenértékű elnyelési felületei tercsávonként:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
18,11862	17,65328	21,52268	24,13913	26,86022	34,74595

8 A számolt és mért eredmények összehasonlítása

A számolt eredmények minden esetben magasabbak a mért értékeknél.

Ennek oka, hogy a képletek nem veszik figyelembe a felületek elrendezését, mint például jelen esetben a mennyezeti födém bordázottságát, ami befolyásolja az utózengési időt. A számolás esetében a felület sokkal nagyobb, mint más ugyanekkora alapterületű terem esetében.

8.1 A mérési eredmények értékelése

A mérési eredmények elemzése és az esetleges mérési hibák kiértékelése után a következőket láthatjuk:

1. a terem alacsonyfrekvenciás utózengési ideje magas, ami terem méreteiből, így a terem sajátfrekvenciáiból adódik;
2. a teremben a 100Hz-től 630 Hz-ig több helyi maximum található az utózengési idő függvényben;
3. 1000Hz feletti mérési eredmények azt mutatják, hogy itt megfelelően alacsony az utózengési idő, azonban ezeket a mérési eredményeket befolyásolja, hogy itt már kisebb hangenergiával lett feltöltve a terem és a hangdobozok ezen a frekvencián tapasztalható irányítottsága miatt nem egyenletes a hangenergia eloszlás a magasabb frekvencia tartományokban.

9 Adott frekvencián hatékony hangcsillapító burkolatok

Egy adott frekvenciatartományban a hangcsillapítást többféle módszerrel is elérhetjük.

9.1 Hullámhosszon alapuló megoldások

Az egyik út az, ha alapul vesszük, hogy a hang hullám, tehát van a térben olyan hely ahol rezgésebbességének minimuma és olyan hely ahol maximuma van. A leghatékonyabb csillapítást úgy érhetjük el ebben az esetben, hogy tudjuk, hogy a merev felület előtt állóhullámok alakulnak ki, amiknek a minimum pontja egybeesik a felület síkjával, tehát ha egy nyitott pórusú anyagot az adott hullámhosszúságú hang negyedhullámhosszának megfelelő távolságra rögzítünk. Így megközelítőleg $\alpha=0,8$ -as hangelnyelési tényezőt is elérhetünk. Ennek a megoldásnak a hátránya hogy alacsony frekvenciákon túl nagy a hullámhossz, tehát nagy rögzítési távolságokat kell alkalmazni (például a 100Hz-en hatékony megoldás rögzítési távolsága 850mm, a 200Hz-é 425mm), ami kisebb termek esetében nem praktikus. Azonban ez a megoldás a jelen esetben a 315Hz-es középfrekvenciájú sávon belüli kiemelés csökkentéséhez megfelelő, mivel így a faltól való távolság $269\approx 270$ mm, tehát könnyen kivitelezhető.

9.2 Vékony perforált lemezzel takart nyitott pórusú anyag

A következő megoldási lehetőség, ha a nyitott pórusú anyagot vékony perforált lemezzel takarva alakítunk ki hangcsillapító burkolatot. Így a perforált lemezzel módosítjuk az eltakart anyag elnyelési frekvenciafüggését, a lyukak átmérőjének és távolságának függvényében. Előnye, hogy ezzel a megoldással nagy csillapítású burkolatok készíthetők. Azonban ez a megoldás rendelkezik egy jelentős hátránnyal, mégpedig, hogy a hangcsillapítás frekvenciafüggése nem számítható, elméleti úton ilyen burkolat nem tervezhető, tehát csak laboratóriumi mérések alapján állapítható meg ez a jellemzője.

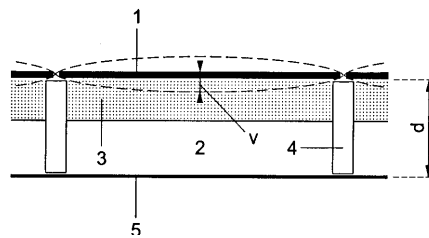
9.3 Rezonátorok

Rezonáns burkolatokat teremakusztikai megfontolásokból alkalmazunk.

Ha a kialakított burkolat koncentrált mechanikai elemekből áll akkor tekinthetjük rezgő rendszernek, másképp tömeg-rugó rendszernek. Ilyen a lemezzrezonátor.

9.3.1 Lemezzrezonátor

Hatásmechanizmus:



lemezzrezonátor metszete [3]

Az ábra szerint kialakított szerkezetet koncentrált mechanikai elemekből álló rezgő rendszernek tekinthetjük, amelyre érvényesek a rezgéstani alapok alapján megállapított törvényszerűségeik, ha teljesülnek a következő feltételek:

- Az 1 jelű, rezgő tömegként működő hajlékony lemez (pl. 3 mm vastag kemény farostlemez, vastag PVC fólia), mint hajlított rugó rugómerevsége elhanyagolható a mögötte lévő S felületű és d vastagságú zárt légtér rugómerevségéhez képest. Vagyis: a tömeg - rugó rendszerben gyakorlatilag a zárt légtér töltse be a rugó szerepét.

- A lemez mögötti légtérben ne jöjjön létre a lemez síkjával párhuzamos hangterjedés (erre szolgál a kazettázás).

- A légtérben legyen nyitott pórusú anyag, amely a mechanikai ellenállás szerepét tölti be.

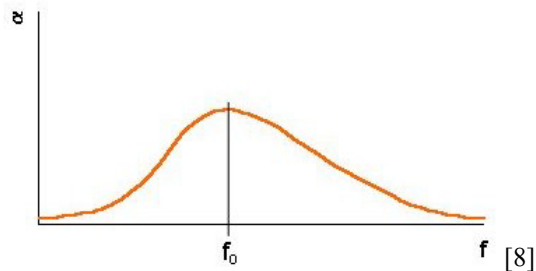
A fenti feltételek teljesülése esetén az ábra szerinti szerkezet sajátfrekvenciáját a összefüggéssel számíthatjuk:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \text{ ahol}$$

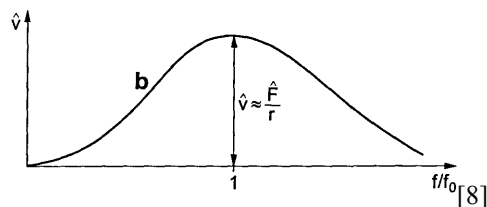
m' a lemez négyzetméterenkénti tömege kg/m^2 ,

d a lemez mögötti légtér vastagsága m .

Az elnyelési tényező pedig a következő függvény szerint változik:



A léghangok által kényszerrezgésre gerjesztett hajlékony lemezrezonátor rezgésjellemzői a gerjesztő frekvencia (f) és a sajátrezgésszám arányától függően, az ábra szerint változnak.



Rezonancia esetén ($f = f_0$) valamennyi rezgésjellemzőnek, így a hangelnyelés szempontjából legfontosabb rezgésebességnek is maximuma van, ezért a rezonancia környezetében a hangelnyelési tényező értéke maximális. A hatás összetevői:

- Külső súrlódás a pórusokban rezgő levegő részecskéi és a nyitott pórusú anyag felülete között
- Belső súrlódás a kényszerrezgést végző lemez részecskéi között.

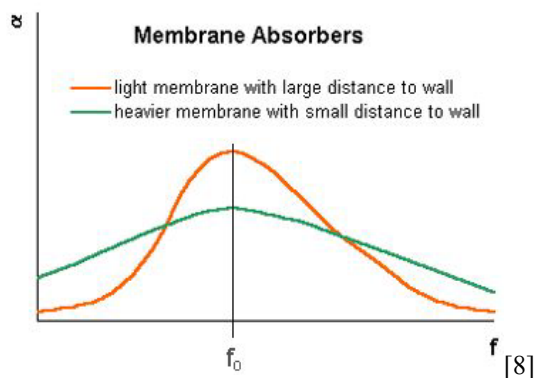
A hajlékony lemezrezonátor hangelnyelési tényezője elméletileg kisebb, mint 1, mert a légtér irányában is rezgő lemez hangenergiát sugároz vissza a gerjesztési oldalra.

Lemezrezonátor esetében nem követelmény, hogy a lemez és a merev felület párhuzamos legyen egymással.

A megvalósítás során figyelembe kell venni a következő összefüggést:

A tömeg és a faltól mért távolság különböző kombinációjával ugyanaz a rezonancia frekvencia érhető el. Az abszorpciós görbe magassága és szélessége azonban változhat. Egy könnyű membrán nagy távolságban a faltól, magasabb és

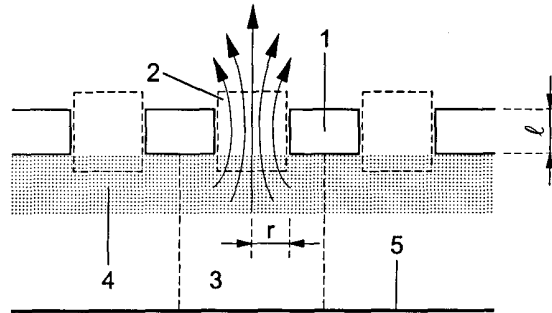
keskenyebb abszorpciós görbét mutat, mint egy nehezebb membrán közelebb a falhoz, de a rezonancia frekvencia ugyanaz.



Ugyanez a változás érhető el abban az esetben, ha az üregben hangcsillapító anyagot helyezünk el. Egy telítetlen membrán hangelnyelő anyag magas és keskeny abszorpciós görbét mutat. Ha az üreg részben ásványgyapottal töltött, a görbe kisebb lesz, de szélesebb. A legtöbb teremakusztikai alkalmazásnál a szélesebb abszorpciós görbét részesítik előnyben.

9.3.2 Helmholtz rezonátor

Rezgő rendszer még a Helmholtz rezonátor. Ez a megoldás fizikai szempontból tömegből, rugóból és ellenállásból felépülő rezgő rendszer. A kis felületű, viszonylag hosszú lyukakban és a lyukak szűk környezetében lévő levegő tömege együtt rezeg a gerjesztő hanghullámokkal, míg az üregben lévő, viszonylag nagy térfogatú levegő lágy rugóként működik.



6.33. ábra

A soklyukú rezonátor sematikus keresztmetszete

- 1 perforált vastag lemez
- 2 tömegként viselkedő levegő
- 3 rugóként működő üregrész
- 4 nyitott pórusú anyag
- 5 merev felület

[3]

A rezgő rendszer sajátfrekvenciája:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{r^2 \pi}{V(\ell + 0,5\pi r)}}$$

Ahol

c_0 hangterjedési sebesség levegőben,

($c_0 \sim 340$ m/s),

r a kör alakú lyuk sugara m,

ℓ a nyak hossza m,

V az üreg térfogata m^3 .

Az összefüggés szerint a lyukfelület ($r^2\pi$) csökkentésével (a tömegjelleg növelésével) és a lyuk mögötti üreg V térfogatának növelésével (a rugómerevség

csökkentésével) csökkenthetjük α értékét. A nyitott pórusú anyag fontos szerepet játszik a hangelnyelésben, mert lehetőséget teremt a rezgő levegő részecskéinek sűrűlődsére.

A soklyukú rezonátort egymás mellett sorakozó Helmholtz-rezonátoroknak tekinthetjük. A szerkezet sajátfrekvenciájának közelítő értékét a Helmholtz-rezonátorra érvényes képlettel számíthatjuk, a hangelnyelési tényező frekvenciafüggvényét pedig laboratóriumi méréssel határozhatjuk meg.

A soklyukú rezonátor külső megjelenése hasonló a vékony perforált lemezzel takart, nyitott pórusú anyagból készített burkolathoz. Lényeges eltérés, hogy rezonanciahatást csak vastag lemez és kevés, kis átmérőjű lyuk alkalmazásával érhető el.

10 A kivitelezés lehetséges megoldásai az L1-120 labor akusztikai kialakításához

10.1 Kereskedelmi forgalomban kapható akusztikai álmennyezet

A Saint-Gobain csoport által gyártott Isover OWAcoustic vagy Ecophon lapok felhasználásával esztétikus álmennyezet készíthető előregyártott rendszerelemekből, amelyeknek súlyozott hangelnyelési tényezőjük magas. Azonban megvizsgálva ezek hangelnyelési tényező-függvényét, azt láthatjuk, hogy csak a magasabb frekvenciatartományokban magas a hangelnyelésük anyaguk tulajdonságaiból adódóan. Nényzetméter-tömegük (például az OWAcoustic lapok esetében) 6kg/m^2 , tehát amennyiben a lapok a födémgerendák alá kerülnek felszerelésre a távolságból és a tömegből adódó (lemezrezonátor-elv) elnyelési maximumuk nagyon alacsony (a lemezrezonátor képlettel számolva 34Hz) frekvenciára adódik. Így kivitelezve változnának a teremmodusok is a belmagasság csökkenése miatt, azonban csak kis mértékben, tehát az álmennyezetten kívül szükség lenne alkalmazni lemezrezonátorokat is. Költség oldalról megközelítve az álmennyezet felszerelését, nem csak az álmennyezet és a rögzítéséhez szükséges szerelvények költségét kell figyelembe venni, hanem, hogy ebben az esetben a világítótestek cseréje/átalakítása is szükségessé válik növelve a kivitelezés költségeit.

10.2 Nem előregyártott elemekből építkező megoldás

A terem kiemelését a leghatékonyabban az adott frekvenciára hangolt rezgő rendszerrel, azaz lemezrezonátorral illetve Helmholtz-rezonátorral lehet csillapítani. Az alacsonyabb frekvenciatartományokban lemezrezonátorral valósítható meg nagy hatásfokkal az elnyelési tényező növelése, közepes frekvenciákon a Helmholtz-rezonátoros megoldás a célravezető.

A 100 és 200Hz-es frekvenciasávban hatékony lemezrezonátorok kialakítása: Ebben a két sávban nagy összes felületre (több mint 10m²-re) van szükség a mérésekből számított egyenértékű elnyelési felületek alapján. Ezek a burkolatok kialakíthatóak közvetlenül merev felületen vagy kialakítható olyan merev hátfalú „doboz”, ami bármilyen felületre felszerelhető. A terem adottságai alapján ezen burkolatok nagy része a mennyezeten kerülhet kialakításra, ahol a mennyezet anyaga alkotja a hátfalat.

A terem adottságait és a labor vezetőjének kérését figyelembe véve a hangelnyelő burkolatok tervezését és kivitelezését az alacsonyfrekvenciás tartományban hatásos elnyelő burkolatokkal kezdtem.

10.3 Lemezrezonátorok

A lemezrezonátorok tervezésekor olyan megoldás(ok) kialakítása volt a cél, melyek könnyen kivitelezhetőek és ismert az abszorpciós tényezőjüknek függvénye a frekvenciától.

A lemezrezonátorok tervezésekor figyelembe vettem, hogy olyan megoldásra van szükség, amely optimális megoldást biztosít a sáv szélesség és a maximális elnyelési tényező tekintetében is. Ezért a lemezrezonátorok kialakítása során könnyű membrán-anyakokat használtam, hogy magas legyen a maximális elnyelési tényező illetve a rezonátorok üregeibe ásványgyapot helyezek, hogy ezzel szélesítsem frekvenciatartományukat.

10.3.1 Lemezrezonátorok elhelyezése

Egy hangelnyelő burkolat – elsősorban az alacsonyfrekvenciás elnyelés szempontjából – legmegfelelőbb helye a terem sarka(i), mivel a sarkokban nyomásmaximum lép fel, tehát itt nyelheti el a legtöbb energiát a burkolat. Azonban a kialakítás helyével szemben megfogalmazott követelmények és a számított elhelyezendő felület-mennyiségnek megfelelően a lemezrezonátorok elhelyezéséhez legalkalmasabb felületnek a mennyezet bizonyult, felhasználva annak adottságait. A merev hátfal szerepét a mennyezet vízszintes felülete adja, az üregeket két oldalról határolhatja a gerendák anyaga, így egyszerűsítve a kivitelezést, amiben már csak a gerendák szálirányára merőleges elválasztó-felületeket kell kialakítani. Így a mennyezet kialakítását figyelembe véve meghatározható a membrán rögzítésének távolsága. A kialakítást nehezítette a hosszanti irányban felszerelt trapéz alakú – a födém illesztéseit eltakaró – üreges lemez-burkolat, ami a légrések miatt tömítetlenséget okoz az egyes cellák és a légtér között. Ennek kiküszöbölésére alkalmazásra került öntáguló térkitöltő anyag (pur-hab) az egyes cellák határán, amely teljes mértékben elszigetelte egymástól a cellák által körbezárt légtömeget. A rezonátor-lemezek az előre elkészített 1x2m-es keretekre kerültek felszerelésre, mely keretek részét képezte az üregeket elválasztó lapok is. Az egyes modulok megfelelő rögzítése után sor került a rések tömítésére, a gerendák anyaga és a modul faszerkezete között szilikon alapú rugalmas tömítőanyag felhasználásával, illetve az üregek határán öntáguló habbal kitöltve a réseket.

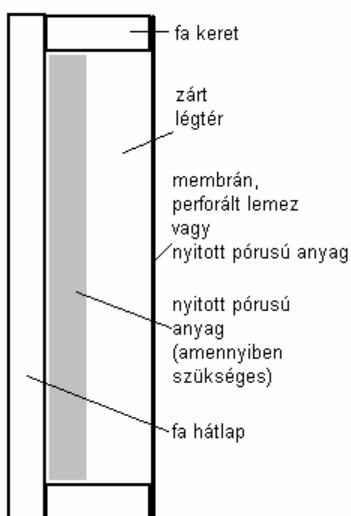
10.4 Perforált lemezes megoldások elhelyezése

10.4.1 „Rezonátor-doboz”

Az előzőekben részletezett hangcsillapító burkolatokhoz egy olyan megoldásra van szükség, ahol a rezonátor a teremben bárhova felszerelhető, függetlenül a felületképzés anyagától. Egy-egy rezonátor-modul önálló, előre elkészített egységet alkot és a terem bármely pontjába elhelyezhető.

10.4.1.1 Kialakítás

A tömeg-rugó rendszer megfelelő működéséhez a már leírtak értelmében arra van szükség, hogy a rezgő rendszernek legyen merev hátfala, merev anyagú oldalfalai, legyen ebben a „dobozban” nyitott pórusú anyag és ezek előtt a funkcionális előlap. Az előlap lehet akár lemezrezonátor, perforált lemez vagy akár nyitott pórusú anyag. Ez a konstrukció egy könnyen kivitelezhető megoldás, amelynek előnye még, hogy bármilyen tulajdonságú felületre illetve a térben szabadon is rögzíthető adott esetben. A megoldás kivitelezhető fa alapanyagokból, hátlapként táblásított fenyőfalap használható, amely megfelelő vastagság esetén kellően merev felületet alkot hangfrekvenciás szempontból. Az oldalfalak anyagául is megfelelő keresztmetszetű fa alapanyag használható. Az előlap a hangfrekvenciás szempontból meghatározó és funkcionális része a konstrukciónak. Ennek anyaga, tömege, merevsége, a hátlaptól mért távolsága (soklyukú rezonátor esetén a perforáció paraméterei is) határozza meg a rendszer rezonancia frekvenciáját. Ilyen konstrukció kialakítása lehet a következő:



A szakdolgozat készítése során elvégzett kutatás során ilyen megoldáshoz hasonlókat az AFT Akusztika Kft. által kivitelezett teremakusztikai megoldások között találtam.

Ilyen „rezonátor-doboz” megoldással is elkészíthetők a később vázolt lemezrezonátorok is, azonban azokkal kialakítandó nagy felületet figyelembe véve és felhasználva a földem adottságait jelentősen csökkenthető a kivitelezés költsége.

10.5 A rezonátorok adatai:

10.5.1 1-es számú lemezrezonátor

A **100Hz**-es középfrekvenciájú sávban hivatott a hangenergiát elnyelni, kemény farostlemezt választottam **3,5mm**-es vastagságban a membrán anyagául, amelynek négyzetméterenkénti tömege **2,5kg/m²**. A rezonátorra érvényes képlet alapján a bezárt légtér vastagsága

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{d * m'}} \Rightarrow d = \frac{60^2}{f_0 * m'} = \frac{3600}{10000 * 2,5} = 144mm$$

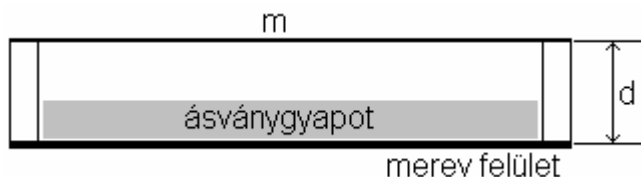
Azonban ezt az értéket korrigálni kell, a felszerelés távolságának meghatározása érdekében a mennyezeten eltakart felületek formája miatt. Így a felszerelés távolsága **150,4mm**-re adódik, melyet a kivitelezés pontossági határa miatt lehet **150mm**-re kerekíteni. Az üregben ebben az esetben elhelyezésre került **50mm** vastag ásványgyapottól **0,6m²**-nyi az áramlási ellenállás növelése érdekében, ezzel kis mértékben ugyan csökkentve a rezonanciafrekvencián jelentkező elnyelést, de növelve a rezonátor sáv szélességét.

10.5.1.1 A rezonátor adatai

3,5mm-es kemény farostlemez (2,5kg/m²)

d=150mm-re a merev hátfaltól

0,6m² 50mm-es ásványgyapottal az üregben



10.5.2 2-es számú lemezrezonátor

Ebben az esetben (**200Hz-es** középfrekvencia) a membrán anyagának kiválasztásakor a következő szempontokat kellett figyelembe vennem a már fentebb említett elhelyezési megkötések mellett:

- a statikai előírások értelmében a függőleges gerendák csak a mennyezettől számított 19cm-ig fúrhatóak meg a rögzítés érdekében, ezért az általam tervezett konstrukció felszerelési helyét ezen határon belül kellett tartani.
- a mennyezeten található takaróburkolat 8cm-es profilmagassága meggátolja a konstrukció ennél közelebbi felszerelését.
- az előbbi mérethatár nagyobb, mint a földem profiljának alakja miatt adódó felszerelési mérethatárnál, így annak betartásával ez is teljesül.

A rezonancia-frekvencia képletével számolva a keresett lemez négyzetmétertömegének 474g és 1,125kg között kellett lennie. Így a rezonátor membránjának anyagául 2mm vastag habosított PVC lapot használtam, mely nem légáteresztő és **1kg/m²**-es tömegű. A rögzítés távolsága így

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{d * m'}} \Rightarrow d = \frac{60^2}{f_0^2 * m'} = \frac{3600}{40000 * 1} = 90mm,$$

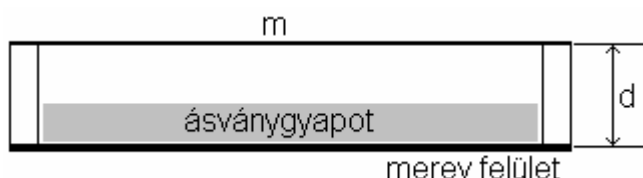
a korrekcióval 96,4mm, melyet **100mm-re** kerekítve rendkívül megkönnyíti a rezonátor-rendszer kivitelezését. Ebben a rezonátor üregben is elhelyezésre került az 1. számú rezonátornál alkalmazott ásványgyapotot az előbbivel azonos mennyiségben (**0,6m² x 50mm**) azonos megfontolásból.

10.5.2.1 A rezonátor adatai

2mm-es habosított PVC lemez (1kg/m²)

d=100mm-re a merev hátfaltól

0,6m² 50mm-es ásványgyapottal az üregben



10.6 Soklyukú rezonátorok

(Helmholtz-rezonátorok)

A számítások alapján a teremben még legkevesebb 5 m^2 egyenértékű elnyelési felülettel rendelkező burkolatra van szükség, amely a 315Hz-es sávban rendelkezik nagy hangelnyelő képességgel és minimum 3 m^2 egyenértékű elnyelési felületre a 500-630Hz-es. Erre a célra legjobb hatásfokkal soklyukú rezonátor alkalmas. Az ilyen felépítésű burkolatok esetében a sok rezonancia-frekvenciát befolyásoló tényező miatt, több különböző azonos rezonancia-frekvenciájú, egyéb tulajdonságaiban (függvény menete, maximális csillapítás) eltérő megoldást lehet tervezni. A szakirodalomba található kész megoldások közül választottam, a képlet alapján kiszámolva azok elnyelési maximumát, így kiválasztva a célnak legjobban megfelelőt. Így a javasolt megoldások a következők:

10.6.1 3. számú rezonátor

Helholtz-rezonátor (315Hz-es középfrekvencia).

10.6.1.1 Adatai

9,5mm-es gipszkarton lemez

8mm átmérőjű lyukakkal perforálva

28mm-es hálóban

120mm-re a merev felülettől és

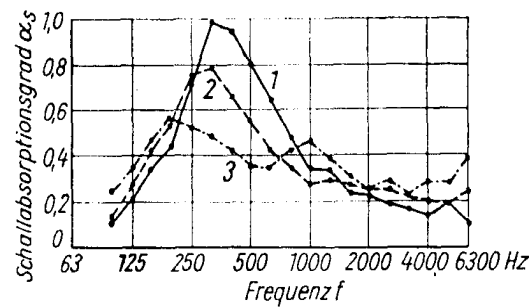
40mm vastagságú ásványgyapot csillapítóanyaggal az üreg teljes hátfalán.

10.6.1.2 Rezonanciafrekvenciája:

Ennek a megoldásnak a rezonanciafrekvenciája:

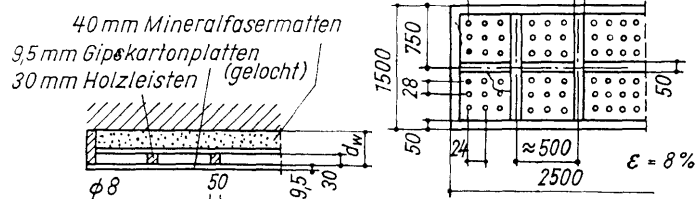
$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{r^2 \pi}{V(\ell + 0,5\pi r)}} = \frac{340}{6,28} \sqrt{\frac{0,004^2 \cdot 3,14}{0,028^2 \cdot 0,12(0,0095 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,004)}} = 315 \text{ Hz}$$

Ez pontosan megfelel a sáv középfrekvenciájának. A rezonátor abszorpciós tényezőjének frekvenciamenete megtalálható a szakirodalomban:



Hangelnyelési tényező - a 2 jelű diagram jelöli a szóban forgó megoldást [1]

2.4. Gipskartonlochplatte



A rezonátor metszete és méretei [1]

10.6.2 4. számú burkolat

Hatásos a 500-630Hz-s sávban. Erre a frekvenciatartományra hatásos megoldást mutat be a *P. Nagy József – A hangszigetelés gyakorlata és elmélete* című könyve. A bemutatott és a dolgozatomban a következőkben részletezett és felhasznált megoldás alkalmas a kérdéses frekvencián jelentkező kiemelés hatékony csillapítására. Ez a burkolat ellentétben az eddigiekkel, nem a tömeg-rugó-ellenállás koncentrált elemekből felépülő hálózatok mintájára működik. Ebben az esetben sokkal inkább érvényesül a hanghullámoknak a lyukak szélein lejátszódó elhajlása (diffrakció), a Huygens-elv, miszerint a hang hullámhosszánál lényegesen kisebb átmérőjű lyuk az új hullám kiindulópontja. A lyukak szélein elhajló hullámok növelik a hangelnyelést abban a frekvenciatartományban, amelyben a lyukak átmérője nagyságrendekkel kisebb, mint a hang hullámhossza.

$$a \ll \lambda$$

Az ez alatti hullámhosszú hangokra nézve pedig a kemény lemez hangvisszaverő hatása érvényesül.

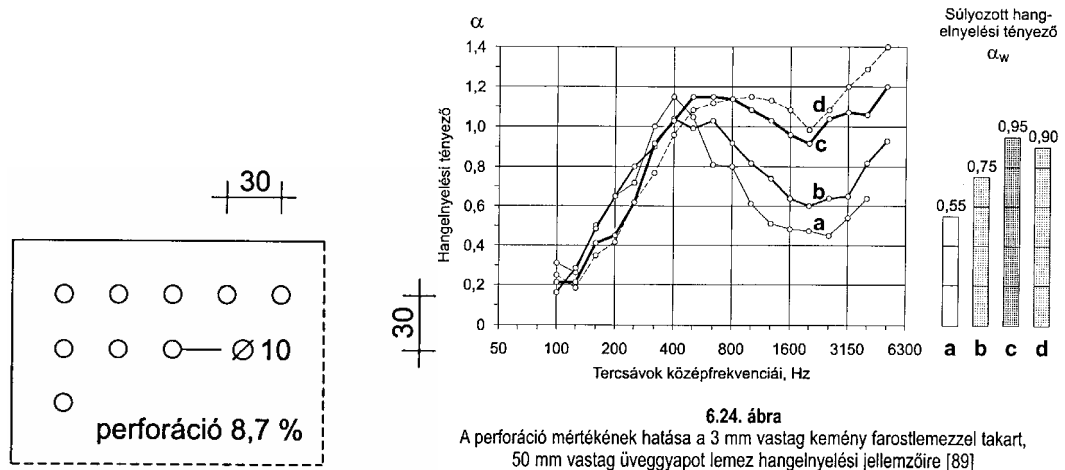
10.6.2.1 Adatai

50mm vastagságú ásványgyapot takarva

3mm-es kemény farostlemezrel, mely

10mm-es lyukakkal

30mm-es hálóban perforálva (8,7% a perforáció) kerül felszerelésre.

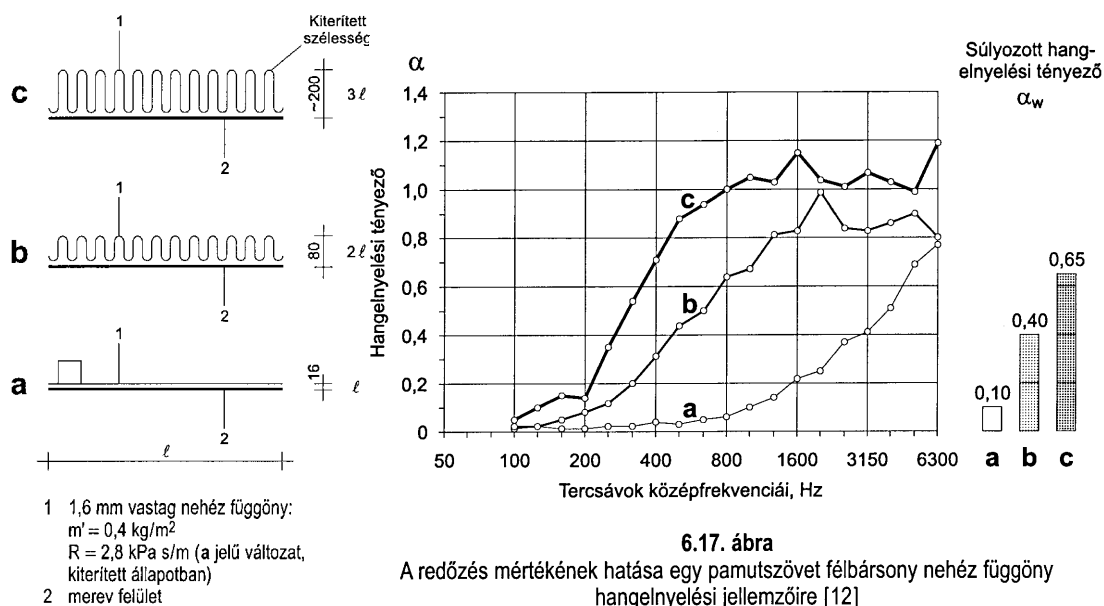


Az első ábra a perforált lemez méreteit a második **b** görbéje a hangelnyelési tényezőjét ábrázolja [3]

10.7 Az 1kHz feletti frekvenciatartományban hatásos burkolat

A terem jelenlegi állapotában nincsenek nyitott pórusú anyagokból készült berendezési tárgyak. Az 1kHz feletti tartományban az utózengési idő hatékonyan csökkenthető már félnehéz függöny elhelyezésével az ablakfelületek előtt.

10.7.1 Félnehéz függöny [6]



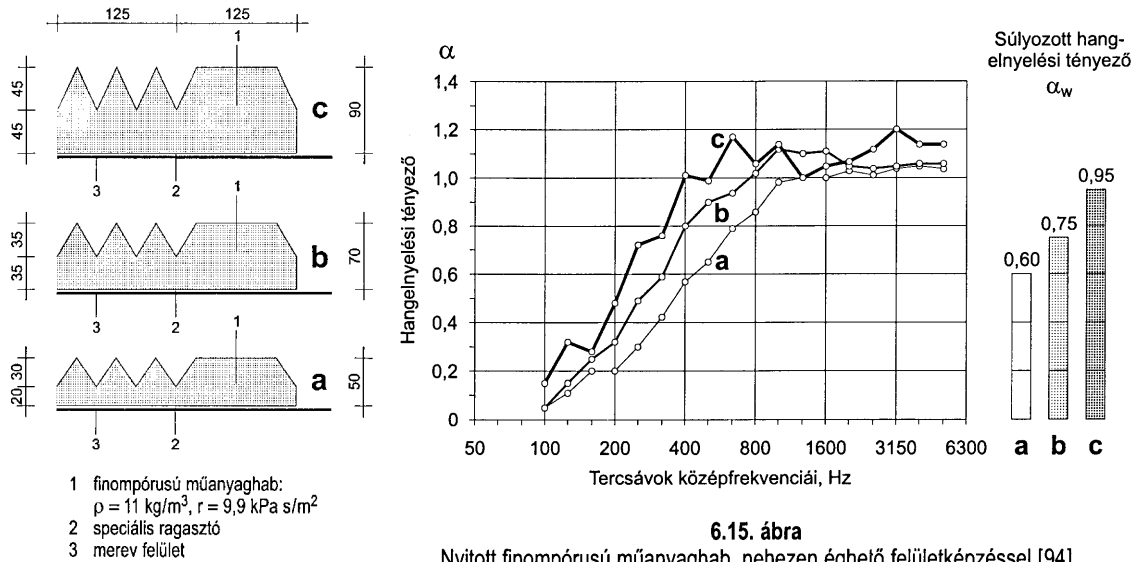
[3]

A nyitott pórusú, redőzött nehéz függöny meglepően nagy hangelnyelését a következő tényezők és hatások idézik elő:

- Elsődleges a függöny anyagának - kiterített állapotban mért - nagy áramlási ellenállása, mert sok nyitott pórus áll rendelkezésre az energiaveszteséget előidéző külső súrlódáshoz.
- A redőzés révén a merev felületen uralkodó $v = 0$ helyektől eltávolodik az anyag nagyobb része, ezáltal növekszik a burkolat vastagsága.
- Kevésbé nyilvánvaló, de tény, hogy a redőzéssel olyan alakzatot hozunk létre, amely hasonló a hangelnyelő ékekhez: a burkolat áramlási ellenállása jobban illeszkedik a levegő akusztikai impedanciájához, mint az összefüggő sík felületű burkolat.

10.8 A hangelnyelő ék elve szerint működő műanyaghab burkolat

Az optimálisnál lényegesen kisebb áramlási ellenállás ellenére számottevő hangelnyelő képességgel rendelkeznek.



Műanyaghab burkolat kialakítása és hangelnyelési tényezője [3]

Ezt a műanyaghab burkolatot mozgatható paravánokra felszerelve lehetne alkalmazni a teremben.

11 A kívánt utózengési idő tercsávonkénti határértékei

A meghatározás során a terem átalakítási lehetőségeit figyelembe véve a következő felső határértékeket szabtam az utózengési időre, ebből pedig kiszámoltam az egyenértékű elnyelési felületet:

Tercsávok:	RT	A
125Hz	0,7s	25 m ²
250Hz	0,7s	25 m ²
500Hz	0,7s	25 m ²
1kHz	0,5s	35 m ²
2kHz	0,5s	35 m ²
4kHz	0,5s	35 m ²

12 A hangelnyelő felületek mennyisége

1. számú rezonátor	10,0 m ²
2. számú rezonátor	10,0 m ²
3. számú rezonátor	5,0 m ²
4. számú rezonátor	5,0 m ²
Függöny	9,6 m ²

A burkolatok mennyisége a helyi viszonyoknak és a laborvezető kérésének figyelembevételével (ami vonatkozott az elhelyezés helyére és az utózengési idők értékeire) lett meghatározva.

13 Az utózungési idő becslése a tervezett hangelnyelő felületekkel

Az utózungési időt a hasonló konstrukciójú lemezrezonátorok a szakirodalomban található elnyelési együtthatóinak felhasználásával becsültem az 1. és 2. számú rezonátor esetében, a 3. és 4. számú rezonátor esetében pedig leolvastam a diagramról.

A várható utózungési idő és a kiszámolásához szükséges egyenértékű elnyelési felület (becsülve):

Tercsávok:	RT	A
125Hz	0,77s	23 m ²
250Hz	0,77s	23 m ²
500Hz	0,75s	25 m ²
1kHz	0,53s	34 m ²
2kHz	0,50s	35 m ²
4kHz	0,50s	35 m ²

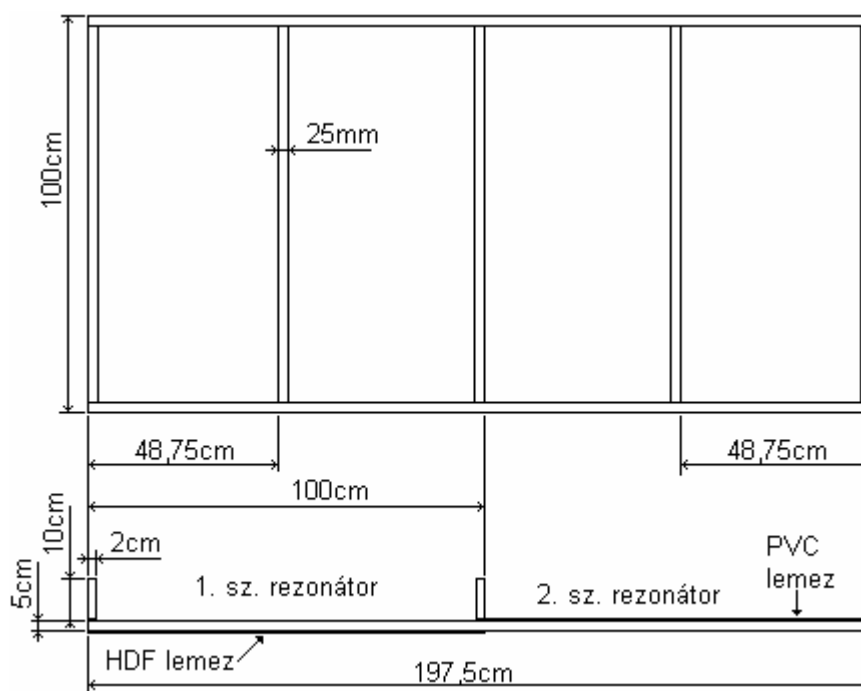
14 A kivitelezett hangelnyelő burkolatok

A szakdolgozat elkészültéig az 1. és 2. lemezzrezonátor került kivitelezésre.

14.1 Konstrukció

A 10.5 pontban ismertetett rezonátorokat valósítottam meg. A rezonátorok anyaga az ott ismertetett HDF és PVC lapok. A lapok 25x50mm-es fenyőléc keretre kerültek felszerelésre.

A kivitelezés első lépéseként elkészült 10 db lécz-keret, amelyre a membránlapok és az elválasztó lapok kerültek felszerelésre. A keretet alkotó lécek méreteit úgy választottam meg, hogy egyszerűsödjön a kivitelezés folyamata, így tehát az egyben elkészülhetett a 1m x 197,5cm-es keret amelynek léceihez rögzíthető az 1. számú rezonátor esetén az egyik oldalról a HDF lap, a 2. számú rezonátor esetén a másik oldalról a PVC-lap.



A konstrukció rajzán látható, hogy minden elemen csak két elválasztó lap található, de mivel az elemek egymás mellé kerültek felszerelésre, ezért így minden rezonátor-üreg közé kerül elválasztó lap. A elem-sor végén pedig egy plusz lezáró lap került felszerelésre az elem sor azon végén, ahol az elemek nem tartalmaztak elválasztó lapot.



Az utolsó elem lezárása

Az elemek felszerelése után a gerendák anyaga és az elemek közötti réseket tömítettem, szilikon alapú rugalmas tömítőanyag és öntáguló üregkitöltő hab segítségével.

A lapok a kerethez csavarkötéssel lettek rögzítve és az érintkező felületek között tömítve lettek.

Ezeket az előre elkészített elemeket egyben lehetett felszerelni a mennyezeti födémgerendák közeibe megfelelő távolságba a mennyezettől. A felszerelés közben elhelyeztem az ásványgyapot csillapítóanyagokat a rezonátorok üregeiben. Az elemek rögzítése 45x45mm-es acél sarok-idomok felhasználásával történt csavarkötéssel.



Egy burkolat-elem



A kivitelezett 2. számú rezonátor alulnézete



A rezonátor elemek sora az első gerendaközben

15 A burkolat kivitelezési költsége és annak összehasonlítása egy kereskedelmi forgalomba kapható álmennyezet rendszerrel

15.1 A burkolat anyagköltsége

A burkolathoz felhasznált anyagok összköltsége mintegy 55.000 Forint.

Ez az összeg a következőket tartalmazza:

- HDF méretrevágott lapok
- PVC méretrevágott lapok
- Fenyőléc (a keretek anyaga)
- 20mm-es bútorlap (az elválasztólapok anyaga)
- Ásványgyapot csillapítóanyag
- Rögzítőelemek (csavarok, acél szerelvények)
- Tömítőanyagok

Tehát a burkolat költsége négyzetméterenként: 2.750 Ft.

15.2 Az ISOVER OWAcoustic álmennyezetek költségei

Az álmennyezeti lapok négyzetmérárai 1650 Ft-tól 3644 Ft-ig terjednek. Ezek az árak csak a katalógusban megadott méretű lapokra érvényesek, ettől eltérő méretek esetén a raktárkészlet és a rendelési mennyiség függvényében határozza meg az árat a gyártó.

Az álmennyezet költségéhez természetesen a lapok rögzítését szolgáló szerkezet ára is hozzátartozik. Ezt a szerkezet alkotó profilok méterenkénti ára 255-600 Ft közé esik.

Teljes álmennyezet felszerelése esetén 37m² álmennyezet szükséges a terembe, így csak az álmennyezethez szükséges lapok ára a fenti árak ismeretében a legolcsóbb lapokkal kivitelezve is 61.050 Ft (amely tehát nem tartalmazza a tartószerkezet árát és nem tartalmazza a méretekből adódó hulladék árát). Ez a költség láthatóan magasabb, mint a saját kivitelezésű rezonátorok összes

anyagköltsége, amelyek esetében is szükséges lenne rezonátorok elhelyezése a teremben.

15.3 A mennyezetburkolatok összehasonlítása

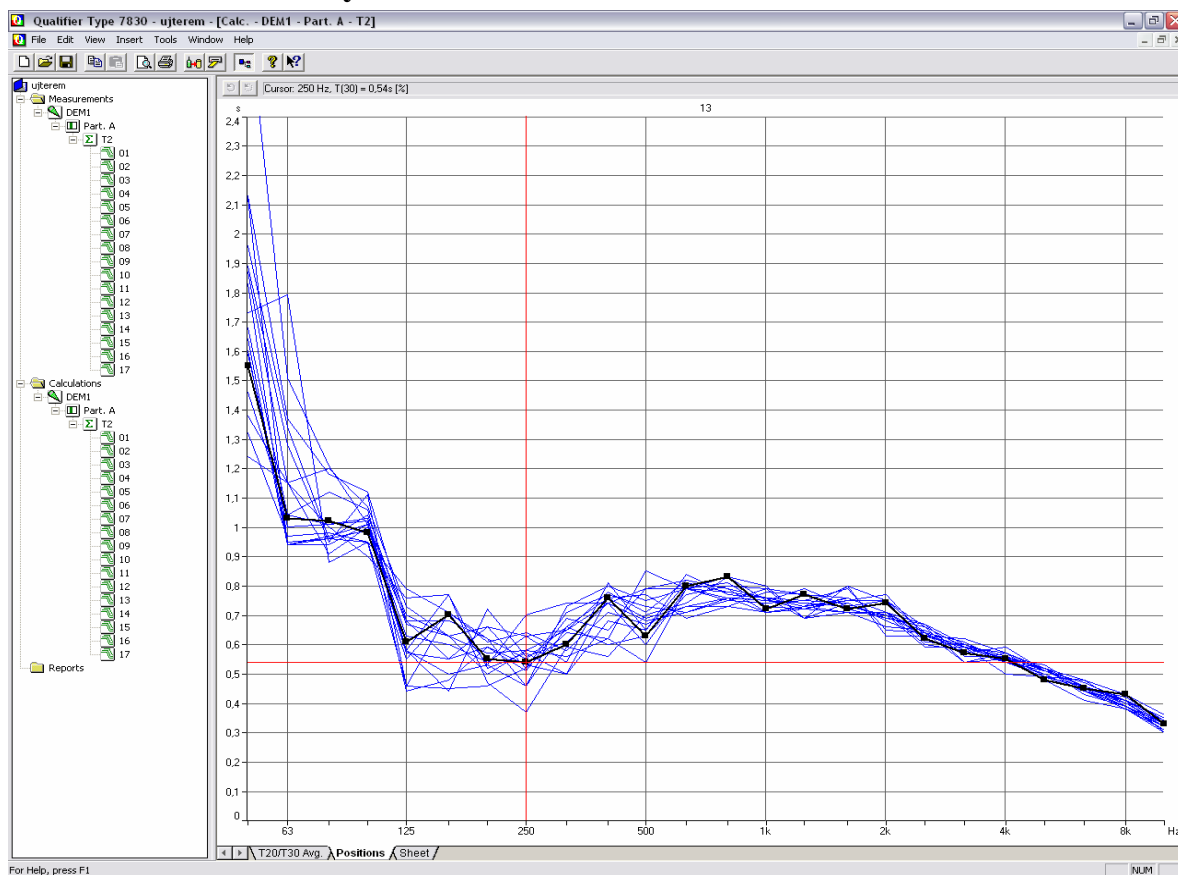
Álmennyezet esetén a kivitelezés két szakaszra bontható.

Először az álmennyezetet szükséges felszerelni, majd az álmennyezettel együtt kell az utózengési időt mérni a teremben, mivel az álmennyezet befolyásolja a terem akusztikáját. Majd a mért eredmények alapján megtervezni és kivitelezni a kiegyenlítéshez szükséges további burkolatokat.

Így tehát látható, hogy álmennyezet felszerelése esetén a költségeket jelentősen növeli, hogy a teljes álmennyezet kivitelezésének költségén felül még szükség van egyéb akusztikai burkolatok felszerelésére is.

16 Mérés az elkészült burkolatokkal ellátott teremben és az eredmények értékelése

16.1 Mérési eredmények



Mérési eredmények diagramjai az elkészült burkolatok esetében

A méréseket a teremben a 6. pontban ismertetett mérésekkel azonos mérési pozíciókban végeztem.

16.2 Az eredmények értékelése

A mérési eredmények a burkolatok nélküli mérésekkel összehasonlítva azt mutatják, hogy az elkészült burkolatok valóban jó hangcsillapító tulajdonságúak és a vártak megfelelően széles frekvenciatartományban hatásosak. A rezonátorok a befolyásolni kívánt 125Hz és 250Hz-es tercsávban is hatásosak.

A 125-315Hz-es tartomány utózungési idejének jelentős csökkenése figyelhető meg. A 100Hz-es tartományban mért csillapítása azonban nem éri el a várt szintet. Ez véleményem szerint abból adódik, hogy az ásványgyapot csillapítóanyag a 1. számú rezonátor maximális elnyelését csökkenti, illetve a zárt térrész geometriájából adódóan nem 100Hz az elnyelés maximuma.

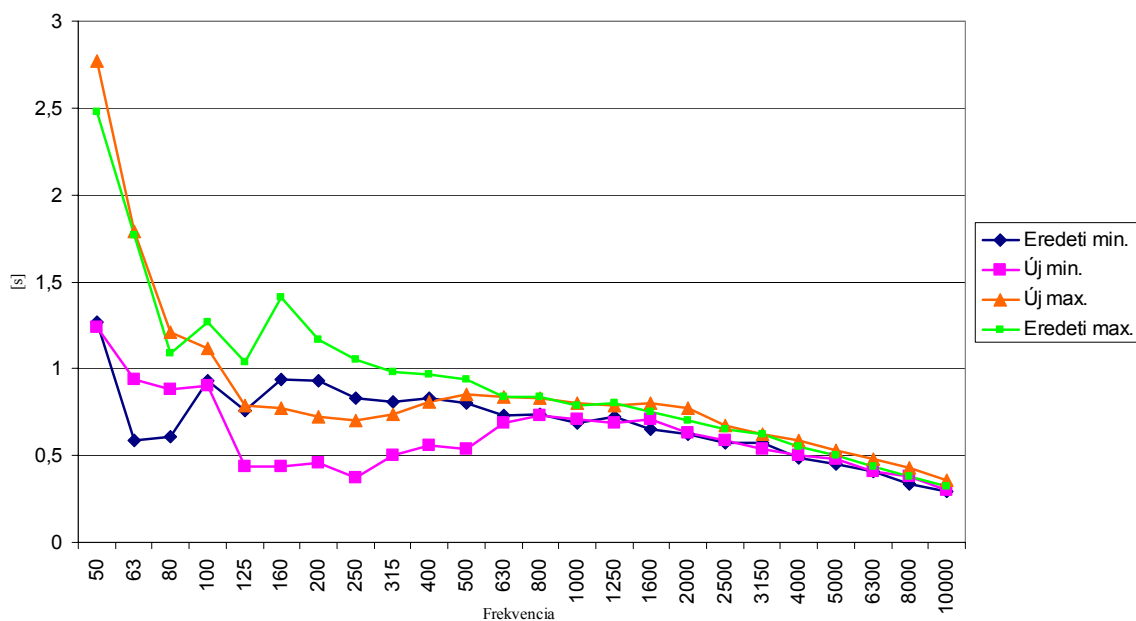
A burkolatokkal ellátott teremben mért értékek nem minden esetben jobbak az eredetieknél, azonban a mérési eredmények diagramján látszik, hogy sokkal szűkebb tartományban ingadozik a befolyásolni kívánt frekvenciatartományban, mint a rezonátorok nélkül.

A következő összefoglaló táblázat tartalmazza számszerűsítve az utózengési idők mért értékeinek, szélsőértékeit, az átlagokat és a nyereséget:

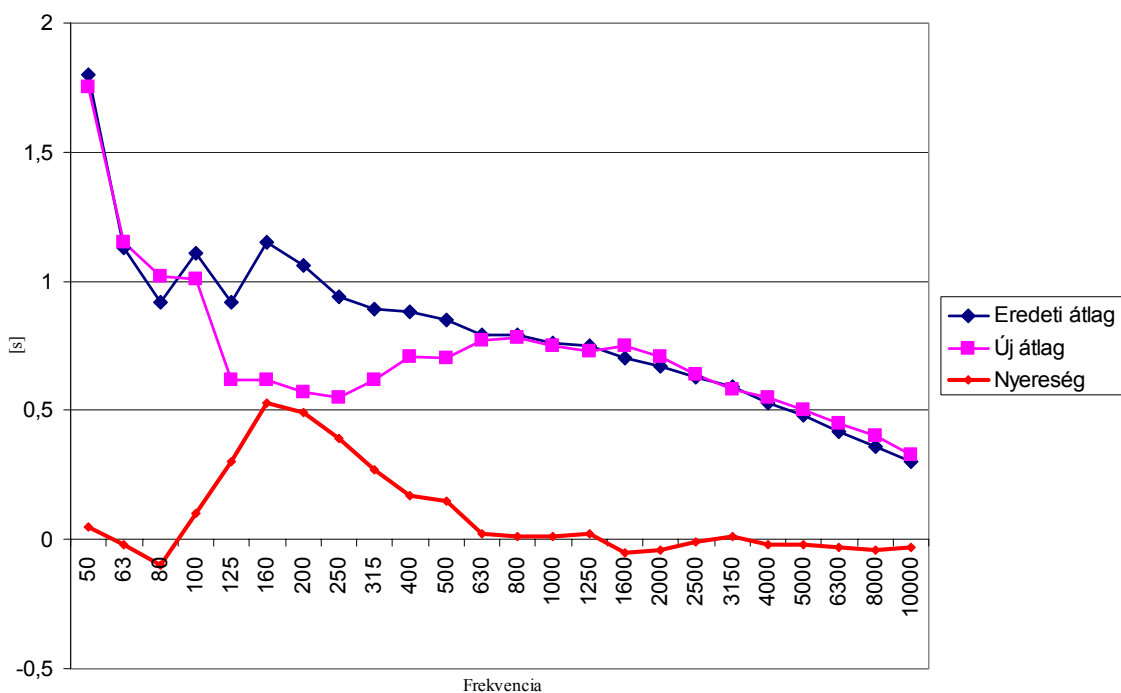
frek. [Hz]	Eredeti min.	Új min.	min. nyereség	Új max.	Eredeti max.	max. nyereség	Eredeti átlagos	Új átlagos	Nyereség
50	1,27	1,24	0,03	2,77	2,48	-0,29	1,8	1,75	0,05
63	0,59	0,94	-0,35	1,79	1,77	-0,02	1,13	1,15	-0,02
80	0,61	0,88	-0,27	1,21	1,09	-0,12	0,92	1,02	-0,1
100	0,93	0,9	0,03	1,12	1,27	0,15	1,11	1,01	0,1
125	0,76	0,44	0,32	0,79	1,04	0,25	0,92	0,62	0,3
160	0,94	0,44	0,5	0,77	1,41	0,64	1,15	0,62	0,53
200	0,93	0,46	0,47	0,72	1,17	0,45	1,06	0,57	0,49
250	0,83	0,37	0,46	0,7	1,05	0,35	0,94	0,55	0,39
315	0,81	0,5	0,31	0,74	0,98	0,24	0,89	0,62	0,27
400	0,83	0,56	0,27	0,81	0,97	0,16	0,88	0,71	0,17
500	0,8	0,54	0,26	0,85	0,94	0,09	0,85	0,7	0,15
630	0,73	0,69	0,04	0,84	0,84	0	0,79	0,77	0,02
800	0,74	0,73	0,01	0,83	0,84	0,01	0,79	0,78	0,01
1000	0,69	0,71	-0,02	0,8	0,79	-0,01	0,76	0,75	0,01
1250	0,72	0,69	0,03	0,79	0,8	0,01	0,75	0,73	0,02
1600	0,65	0,71	-0,06	0,8	0,75	-0,05	0,7	0,75	-0,05
2000	0,62	0,63	-0,01	0,77	0,7	-0,07	0,67	0,71	-0,04
2500	0,57	0,59	-0,02	0,67	0,65	-0,02	0,63	0,64	-0,01
3150	0,57	0,54	0,03	0,62	0,62	0	0,59	0,58	0,01
4000	0,49	0,5	-0,01	0,59	0,55	-0,04	0,53	0,55	-0,02
5000	0,45	0,48	-0,03	0,53	0,5	-0,03	0,48	0,5	-0,02
6300	0,41	0,41	0	0,48	0,44	-0,04	0,42	0,45	-0,03
8000	0,34	0,38	-0,04	0,43	0,38	-0,05	0,36	0,4	-0,04
10000	0,29	0,3	-0,01	0,36	0,32	-0,04	0,3	0,33	-0,03

Az első összehasonlító diagramon látszik az egyes sávokban mérhető minimális és maximális utózungési idő a terem eredeti állapotában és a felszerelt burkolatokkal, a második diagramon az átlagos utózungési idők és a rezonátorokkal elért utózungési idő nyereség látható.

Az utózungési idő szélsőértékei az eredeti és a burkolatokkal ellátott teremben



Az átlagos utózungési idő



17 Összefoglalás

A szakdolgozat megírása folyamán lehetőségem nyílt megismerni az akusztikai tervezés bonyolultságát. egy terem akusztika tervezése során az első lépés minden esetben meghatározni a terem felhasználási területét. Ez meghatározza, hogy milyen határértékeket kell figyelembe venni a tervezés során. Ha az építésszel együttműködve már építéskor foganatosíthatóak az akusztika kialakítás kívánalmai, akkor a legkönnyebb a tervezés, hisz nem utólag kell módosítani a kicsit rossz, vagy nagyon rossz körülményeket.

Azonban a dolgozat témája esetében nem lehet ezt a könnyebb utat járni, ebben az esetben egy már felépített terem akusztikai viszonyait kell módosítani. Ebben az esetben először meg kell vizsgálni a terem adottságait. A lehető legtöbb adatot kell gyűjteni a terem felépítéséről, a felhasznált anyagok tulajdonságairól, ha erre van lehetőség. Ez alapján lehet minél pontosabban modellezni az akusztika viszonyokat. Ezzel együtt a teremben uralkodó viszonyokat szükségszerű mérni is és dokumentálni.

A modellezés és a mérést követően már tudjuk, hogy a kívánalmaknak megfelelően melyik frekvenciák környezetében hatékony elnyelő megoldásokat illetve anyagokat kell alkalmaznunk. Miután ezt megállapítottuk, utána figyelembe kell vennünk, a megvalósítás lehetőségeit, mit, hova és milyen költséggel lehet elhelyezni. Egy frekvencia tartománybeli elnyelés megnövelésére nem csak egy megoldás létezik. A felhasznált anyagok és méretek variálásával több a feladatra alkalmas megoldást tervezhetünk.

Általában a kivitelezés során költség az egyik legfontosabb illetve legjobban meghatározó tényező. Ez befolyásolja, hogy milyen anyagokat használhatok fel a tervezés – kivitelezés során. A labor tervezése során is ez volt a legfontosabb tényező.

A tervezés során olyan megoldást választottam, mely során megvalósítás lépésekre bontható a megvalósításra fordítható összeg függvényében. Minden lépés közben végezhető ellenőrző mérés a beépített anyagok tulajdonságainak igazolására, ami a megoldások tulajdonságainak gyakorlati megismeréséhez szükséges.

A szakdolgozat elkészültéig tehát az 1. és 2. számú rezonátor került kivitelezésre. A kivitelezés során megismerhettem az elméleti tervezés gyakorlatra történő lefordításának nehézségeit. Az eredmények elemzése során láthattam, hogy nem elég ismerni egy rendszer működésének elméletét, ahhoz, hogy az ezen az elven működő burkolat „hozza” a tőle várt csillapítási tényezőt és a kivitelezhető legyen, más szempontokat is figyelembe kell venni.

A mérési eredmények alapján pedig bizakodó vagyok a tekintetben, hogy a szakdolgozatban szereplő további burkolatokat kivitelezve egy a célnak megfelelő akusztikával rendelkező laboratórium kialakítására kerülhet sor.

E szakdolgozatban röviden összefoglaltam a teremakusztika alapjait, részleteztem a hatásos burkolatok tulajdonságait és működésüknek elveit. Majd megoldást fogalmaztam meg az L1-120-as labor akusztikájának a felhasználási terület kívánalmaihoz történő igazításhoz. Megvalósítottam a tervezett burkolatok közül kettőt, majd méréssel igazoltam a tervezés helyességét. A függelékben pedig helyt kapott egy segédlet a tanszék tulajdonát képező Brüel&Kjær 2260 Observer precíziós zaj analizátor utózengési idő mérésre való használatához és annak mérési eredményeit kiértékelő szoftverek használatához.

Irodalomjegyzék

- [1] W. Fasold, E. Sonntag and H. Winkler: Bauphysikalische entwurfslehre. Bau- und raumakustik (1st edition)
VEB Verlag für Bauwesen Berlin Deutschland 1987
- [2] Reis Frigyes: Az épületakusztika alapjai. Épületek akusztikai tervezésének gyakorlata.
TERC, Budapest 2003
- [3] P. Nagy József: A hangszigetelés elmélete és gyakorlata
Akadémiai Kiadó, Budapest 2004
- [4] Brüel&Kjær 2260 Observer User Manual and Technical Documentation
BB1078-14,
Brüel&Kjær Nærum, Denmark 1996
- [5] Application of B&K Equipment of Architectural Acoustics by K. B. Ginn, M. Sc.,
Brüel&Kjær Nærum Denmark, 1978
- [6] Tarnóczy T. , Teremakusztika 2.,
Akadémiai kiadó, Budapest 1986,
- [7] <http://www.campanellaacoustics.com/>
- [8] <http://www.isover.hu/>
- [9] Dr. Wersényi György: Műszaki akusztika jegyzet,
Elektronikus jegyzet, 2004

Függelék

18 Utózengési idő mérése a Brüel&Kjær 2260 Observer típusú precíziós moduláris zaj analizátorral. [4]

A mérést megszakításos mérési módszerrel végezzük, a mérés reprodukálhatóságának érdekében.

A készülék bekapcsolása a  gomb megnyomásával történik.

A készülék ezek után betölti a szoftvert, miközben a gyártó logo-ja látható a kijelzőn. Miután ez eltűnik és a kijelzőn valamely mérőszoftver kijelzései láthatóak a készülék kész a használatra.

18.1 BZ7220 Reverberation Time Software kiválasztása:

Először nyomjuk meg a  gombot, a kijelző jobb oldalán megjelenik a menüsor. Lépünk be az *Applications* menübe. A jobboldali gombsorral lehet a menükbe belépni (ezek után a kijelzőn jobb oldalon megjelenő menüit így jelzem: <Applications>)

Itt válasszuk a <Change Applic.> menüt. Ezután a képernyő alsó felében a *Start Application* rovatban inverz kijelölés jelöli a választani kívánt alkalmazást. A nyilak használatával válasszuk ki a *Reverberation Time Software*-t és válasszuk az <OK> menüt. Ezután a műszer betölti az utózengési idő mérő szoftvert, miközben a B&K logo látható a kijelzőn. Miután a szoftver betöltődött megjelenik az aktuális szoftver frekvenciaspektrum kijelzője.

18.2 A méréshatár beállítása

Nyomjuk meg a  gombot, majd a válasszuk ki a megfelelő méréshatárt (javasolt a 30dB-110dB mérési tartomány) és válasszuk az <OK> menüt.

18.3 A Beállítások menü

A  gomb megnyomásával lépünk be a beállítások menübe, ott válasszuk a <Set-up Menu>-t.

18.3.1 <Define Job> menü:

Itt állíthatjuk be a mérési feladatot.

Job: New vagy a kiválasztott visszahívni kívánt feladat száma

Standard: ISO (a mérési szabvány beállítása)

Task: a mérési feladat neve

Bandwith: 1/3-oct., a megjelenítés felbontása illetve a sávszűrők sávszélességeinek beállítása

Frequency

Start: a mérés alsó frekvenciahatára (50Hz)

Stop: a mérés felső frekvenciahatára (10kHz)

18.3.2 A <Meas. Options> almenü:

Ebben a menüben van lehetőségünk beállítani a megszakításos (Interrupted) utózenngési idő mérés esetén a mérési időket. Az itt beállítható paraméterek a következők:

Escape Time: azt az időt jelenti, amennyi idő alatt a mérést végző személy elhagyhatja a termet. Javasolt: 3s

Build-up Time: az idő, amíg a hangforrás be van kapcsolva, tehát míg feltölti a termet hangenergiával. Javasolt: 3s

Auto Store: a mérési eredmény automatikus mentése. Állítsuk *ON*-ra

Backgr. Corr.: beállíthatjuk, hogy a számítások során a szoftver korrigálja-e a háttérzaj értékével a mérési kalkulációkat. Állítsuk *OFF*-ra.

Partition: a mérendő terem jele. Alapállapota *A*.

Label: itt megadhatjuk a mért terem nevét. Ezt a nevet a *Qualifier* szoftver kijelzi.

18.3.3 Az utózungési idő mérés beállításai

Válasszuk ismét a *<Set-up Menu>*-t, azon belül pedig a *<Rev. Meas.>*-t. Itt állíthatjuk be, hogy impulzusgerjesztéses vagy megszakításos mérést akarunk végezni. Itt a következő beállításokat kell elvégeznünk:

Állítsuk a *Noise* opciót *Interrupted*-re.

A *Decay Time* legyen 4s.

Generator legyen *Internal*.

A beépített generátor zaj-típusát a *Generator: Internal* sor alatti *Noise* opciónál tudjuk beállítani, ez legyen *Pink*. A *Level [re.1V]* legyen -3dB.

18.3.4 A mérési adatok tárolásának helye

A *<Set-up Menu>* *<Meas. Path>* almenüjében állíthatjuk be a mérések elmentésének helyét.

A mérési eredményeket a *\DATA\MEAS#* könyvtárba mentsük.

Ebben a menüben a könyvtárak között a nyíl billentyűkkel mozoghatunk. Itt a következő menüket találjuk:

<Save>: nyomjuk meg, ha kiválasztottuk az elmentés helyét.

<Change Drive>: itt választhatjuk ki a meghajtót, ahova menteni kívánjuk a mérési eredményeket, azaz választhatunk a műszer beépített memóriája és a memóriakártya között.

<Create Dir.>: létrehozhatunk új könyvtárat a mérési eredményeknek.

18.3.5 A mérési eredmények tárolása

Mérési eredményeket mérési üzemmódban és a mérési folyamat pillanat-állj állapotában tárolhatunk. Ezt a kijelző bal felső sarkában a *Meas.* felirat és a  piktogram jelzi. Az üzemmódok között a  gombbal tudunk váltani, a mérés megállításhoz pedig a  gombot használjuk.

Nyomjuk meg a  gombot a mérési eredmények mentéséhez. Ekkor megjelenik a kijelzőn a már beállított tárolási útvonal (ld. fent), a mérés neve és a mérés típusa (RT). A kijelző alsó két sorában pedig a *Create new job* sorban beállíthatjuk a mérés mentési számát, a *Store Current Meas. in Position* sorban a mérési adatok mentési pozícióját.

18.4 A mérés menete

Szereljük fel óvatosan a hordtáskában található tárolódobozból kivéve a 4189-es típusú polarizált mikrofont.

Rögzítsük a műszer aljára az állvány-talpat.

Helyezzük állványra a műszert.

Csatlakoztassuk a mérőműszer tápegységét.

Csatlakoztassuk a 3 pólusú LEMO csatlakozó – 3,5 Jack kábelt a műszer *AUX. I* jelzésű csatlakozója és a hangfrekvenciás erősítő bemenete közé. (ez a kábel csatlakozó átalakítóval és hosszabbítóval van ellátva)

Kapcsoljuk be a műszert és a hangfrekvenciás erősítőt.

A  billentyűvel válasszuk ki a mérési üzemmódot.

Az erősítő hangerőszabályzójával állítsuk be azt az erősítési szintet, amikor a kijelzőn a -6dB érték olvasható.



A billentyű megnyomásával elindíthatjuk a mérési folyamatot. Ekkor a szoftver bekapcsolja a műszer beépített zajgenerátorát, feltölti a termet hangenergiával, majd kikapcsolja a generátort. Ekkor méri az utózengési időt.

A mérés során a mérést végző személy(ek) teljes csendben várakozzanak (A mérés személyek nélkül lenne a legpontosabb, ezért a mérést oktatási célból csak két-három ember végezze. Ekkor a mérési eredmények kiértékelésekor figyelembe kell venni a teremben tartózkodó személyekre érvényes elnyelési tényezővel a személyek számát.)

Tanulságos az utózengési időt kétféleképpen is mérni:

A mérőműszer a hallgatóknak való bemutatása során megmérni az utózengési időt 10-20 fővel, majd a mérési feladatot elvégezni 2-3 fővel. Ezzel demonstrálva a hangelnyelési tényező utózengési időt befolyásoló tulajdonságát.

A műszer folyamatosan tájékoztat a kijelzőn a mérési folyamat állapotáról. A mérés végét kattanó hang jelzi a zajforrásként használt hangszóró(k)ból. Ekkor a szoftver már csak a számításokat végzi, már nem kell teljes csendben várakozni.

A kalkuláció befejeztével megjelenik a kijelzőn a RT diagram. A nyíl billentyűkkel mozoghatunk a spektrumban, a diagram felett leolvashatjuk a sáv középfrekvenciáját és az utózengési idő értékét két tizedes jegyre kerekítve.

A diagram alatt megjelenő szimbólumok tájékoztatnak a felettük található mérési sáv státuszáról.

u	mérési tartomány alatt lévő érték végig a mérés során
R	T20-szal számolt mérési érték (T30 nem mérhető)
N	Nincs megkülönböztethető lecsengési görbe (magas zajszint)
y	zajszint meghaladja a Y1 határértéket
t	t1 (a lecsengés kezdeti ideje) a beállított a mérési idő felett van
Y	a zajszint meghaladja Y2 határértéket
T	t2 (a lecsengés végének ideje) meghaladja a mérési időt
Z	pozitív görbe (utózengetési idő negatív)
P	kevesebb mint két pont a becslési tartományban
O	túlvezérlés
C	másolt érték
F	a szűrő befolyásolta a lecsengési görbét
n	a zajszint túl közeli Y2-höz
p	kevesebb mint négy pont a becslési tartományban
%	a kalkulált különbség T20 és T30 között nagyobb, mint 10%
k	a korrelációs tényező túl kicsi

Mentsük el a mérési eredményeket, majd végezzük el a mérést a terem több pontjában.

18.5 Mérési eredmények másolása személyi számítógépre

Csatlakoztassuk a mellékelt AO-1442 jelű kábellel a számítógép egyik soros portjához a műszert.

Kapcsoljuk be a műszert és futassuk *Qualifier Type 7830* programot.

A programban válasszuk az *Insert* menü *New Measurements (via RS-232C)* almenüjét. A megjelenő ablak legördülő menüjében válasszuk az *Investigator Type 2260* sort és kattintsunk a *Tovább>* gombra. Ekkor a mérési eredmények megjelennek egyrészt ágként a munka-fában a bal oldalon, másrészt diagramok formájában a jobb oldalon. Ezután használhatjuk a mérési eredményeket a programban.

Amennyiben nem áll rendelkezésünkre hardverkulcs a *Qualifier Type 7830* programhoz, eljárhatunk a következő módon:

Kapcsoljuk be a műszert és futassuk a *Noise Explorer Type 7815* programot.

Az a mérési adatok másolását csak a hardverkulcs csatlakoztatása után tudjuk elvégezni, erre a program induláskor figyelmeztet.

Válasszuk a program menüsorában az *Tools* menü *Backup 2260* almenüjét. Ebben az ablakban kiválaszthatjuk az adatok lementésének helyét a számítógép merevlemezén. A *Tovább* gombra kattintva kiválaszthatjuk a műszer memóriájából letölteni kívánt adatokat.

Az adatok letöltésének befejeztével zárjuk be a *Noise Explorer*-t.

File-kezelő programmal töröljük ki a *Qualifier* program könyvtára DEMOJOB1 illetve DEMOJOB2 alkönyvtárának tartalmát (c:\Program Files\BRUEL AND KJAER\ENV\B&K7830\DEMOJOB1\), majd másoljuk be a *Qualifier* program könyvtárának DEMOJOB1 illetve DEMOJOB2 alkönyvtárába (c:\Program Files\BRUEL AND KJAER\ENV\B&K7830\DEMOJOB1\) a letöltött mérési adatok elemezni kívánt könyvtárának tartalmát. Itt nevezzük át a file-okat olyan módon, hogy az első 5 kartert cseréljük ki DEM1A illetve DEM2A kezdetűre.

Indítsuk el a *Qualifier* nevű programot. Itt válasszuk az *Insert* menü *New Measurements (via PC-CARD)* almenüjét. A program figyelmeztetését a hardverkulcs hiányára hagyjuk jóvá, majd a megjelenő Megnyitás ablakban válasszuk ki a használni kívánt *.JOB file-t.

18.6 Az adatok elemzése *Qualifier Type 7830* programmal

Miután megnyitottunk egy mérésfile-t annak mérési adatai megjelennek a *Measurements* ágban. A zöld műszer szimbólumot áthúзва a *Calculations* ágba a szoftver kiszámolja az utózungési időt. Ebben az ágban (*Calculations*) megjelenő műszer szimbólumot áthúzhatjuk a *Reports* ágba ezzel szabvány karakteres táblázatba foglalva megjelenítve az utózungési időket harmad-tercsávonként és mérésenként.

A *Measurements* ágban található  szimbólumra kétszer kattintva megjelenik a képernyő jobb oldalán a lecsengési idők háromdimenziós táblázata.

A *Calculations* ágban található  szimbólumra kétszer kattintva megjelenik a kiszámolt utózungési idők diagramja.

A diagram alatt található *Decay Curves* fülre kattintva elemezhetőek a lecsengési diagramok. Itt a szoftver megjeleníti a kalkulációhoz használt pontokat és egyeneseket. Amennyiben a program láthatóan rosszul határozta meg a számításokhoz használt pontok helyzetét a diagramon, akkor lehetőség van a módosításra (a módosítást vissza is vonhatjuk), ami következtében a szoftver módosítja a számolt RT értékeket is.

A *MultiSpectrum* füllel elérhetjük a lecsengések háromdimenziós diagramját és a *Sheet* fül megjeleníti az RT értékek táblázatát (kék színnel kiemelve a manuálisan beállított pontokból számolt értékeket).

A kész projektet a *File* menü *Save Project* almenüjében menthetjük lemezre.