

Szakdolgozat

Visszhang hatásának vizsgálata akusztikai jelek minőségére vonatkozólag

Írta: *Szabó Arnold*

[2009.]

[Konzulens: dr. Wersényi György]

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETŐ	4
2. A HALLÁSRÓL	5
2.1 <i>HANGOSSÁG ÉRZETE és HALLÁSTARTOMÁNY</i>	5
2.2 <i>FÜL FELÉPÍTÉSE és MŰKÖDÉSE</i>	9
3. VISSZHANGOK ÉS FAJTÁIK	13
3.1 <i>EGYSZERŰ VISSZHANG</i>	13
3.2 <i>TÖBBSZÖRÖS VISSZHANGOK</i>	20
3.2.1 KUPOLAHATAS	27
3.2.2 VISSZAVERŐDÉS ELNYELŐ ANYAGOKRÓL, KÖZÖNSÉG HATÁSAI	29
3.3 <i>VISSZHANG SZUBJEKTÍV HATÁSAIRÓL</i>	30
3.3.1 ELSŐ HULLÁMFRONT TÖRVÉNYE	34
3.3.2 HAAS-HATÁS	36
3.3.3 AZ IDŐKÉSÉS RETESZ és JELENTŐSÉGE	41
3.3.4 BESZÉDÉRTHETŐSÉG	45
3.3.4.1 Beszédmegértés megőrzéséről	46
3.3.4.2 Beszéd érthetőségét méréséről röviden	48
3.4 <i>NÉHÁNY OBJEKTÍV PARAMÉTER</i>	53
3.4.1 HANGIM PULZUS IDŐFOLYAMATA	53
3.4.2 HANGTISZTASÁGI FOK	55
3.4.3 VISSZHANGFOK	57
3.4.4 UTÓZENGÉSI IDŐ	61
4. VISSZHANG VIZSGÁLAT, EREDMÉNYEK és MEGFIGYELÉSEK	64
4.1 <i>VIZSGÁLATI ELJÁRÁSRÓL</i>	64
4.2 <i>MINTÁKRÓL és ELŐÁLLÍTÁSUK</i>	65
4.2.1 1. VIZSGÁLATI PONT	66
4.2.2 2. VIZSGÁLATI PONT	67
4.2.3 3. VIZSGÁLATI PONT	68
4.2.4 4. VIZSGÁLATI PONT	68
4.3 <i>VIZSGÁLATOK</i>	69

4.4	<i>MÉRÉSI EREDMÉNYEK</i>	70
4.4.1	1. VIZSGÁLATI PONT	70
4.4.2	2. VIZSGÁLATI PONT	72
4.4.3	3. VIZSGÁLATI PONT	73
4.4.4	4. VIZSGÁLATI PONT	74
4.5	<i>MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE</i>	75
5.	ÖSSZEGZÉS	83
6.	MELLÉKLETEK	84
	I. melléklet: Kérdőív a visszhang vizsgálathoz.....	84
	II. melléklet: Összegzett mérési eredmények.	84
	Irodalomjegyzék	94

1. BEVEZETŐ

Munkám során részletezem a hallás folyamatát kitérek a hallás érdekes tulajdonságaira pl.: hallástartomány. A fül felépítését és működését is bemutatom.

Ismertetem az egyszerű visszhang kialakulásának okait, és a történelem folyamán előforduló teremakusztikai hibákat is ismertetem, melyek az egyszerű visszhangra vezethető vissza, mind hazai mind külföldi példán keresztül. Ám nemcsak egyszerűvisszhang alakulhat ki egy helyiségben, hanem többszörös visszhangok is, sőt ennek néhány ritkán megfigyelhető változatát is bemutatom. Kitérek néhány olyan belső építészeti elemre, mely elősegítheti a többszörös visszhang kialakulását. Részletesen részletezem külön-külön, hogy milyen hatások érhetik az embert, ha már egy visszhangos teremben tartózkodik és ezeket, hogy írjuk le szubjektív eszközökkel. Ám mivel csak szimplán szubjektív eszközökkel nem lehet egy teremmet leírni akusztikai szempontból sok kutató dolgozott ki, az évek folyamán, olyan objektív paramétereket, melyekkel ezek megtehető. Itt csak néhányat részletezek ki, főként azokat melyek a visszhangok szempontjából érdekesek.

Ezek után részletezem az általam kidolgozott vizsgálati eljárást, bemutatom a vizsgálatához használt hangokat és elő állításukra is kitérek. Majd az eredmények részletes ismertetése után értékelem is a mérési eljárásomat.

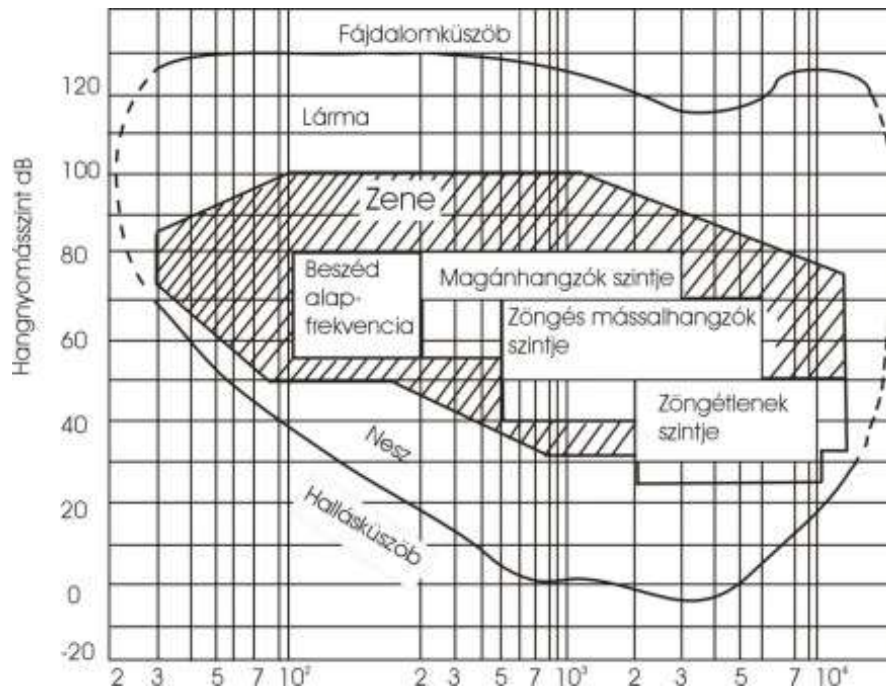
2. A HALLÁSRÓL

A hallás az ember egyik legfontosabb érzék szerve, a legtöbb élőlényre jellemző folyamat, melynek során valamilyen vivőközegben (pl.: levegő) terjedő hanghullámok hatására, az élőlényben szubjektív hangérzet jön létre. A hangérzékelés részben fizikai, részben fiziológiai folyamat.

Nem csak az emberre jellemző folyamat a hallás, más élőlényről elmondható amely képes valamilyen érzékszervvel érzékelni a körülötte lévő közegben fellépő nyomásingadozást, legyen az akár levegő vagy víz, de nem elég a nyomásingadozást érzékelni a elég fejletnek kell lenni ahhoz, hogy az adott jeleket az idegrendszer feldolgozza.[8.]

2.1 HANGOSSÁG ÉRZETE és HALLÁSTARTOMÁNY

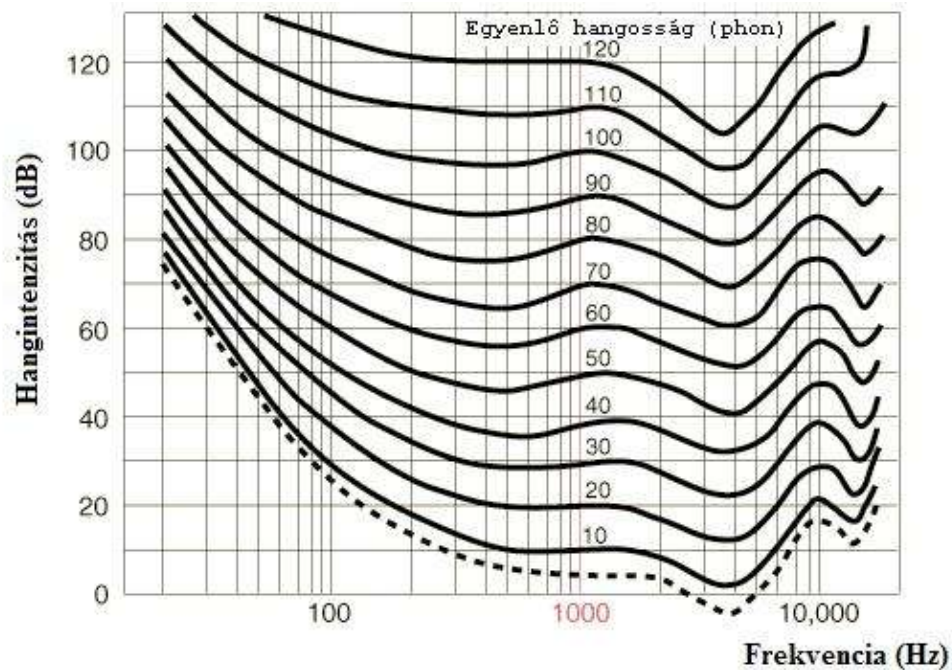
Az ember csak egy adott frekvencia tartományon belül képes hangnyomásszint változás észlelésére, ennek az alsó határa a hallásküszöb, a felső pedig fájdalomküszöb. Ezen két érték között beszélünk a hallástartományról. A legkisebb hallható hang az abszolút hangnyomásszint, mely a viszonyítási alap, 20 μPa hangnyomásnak felel meg. Egy átlagos ember hallástartománya az 1. ábrán látható.



1. ábra, Az ember hallás tartománya.

Ahogy az ábrán is látható a hallásküszöb erősen függ a frekvenciától, ezért vezették be a *hangerősszintet* L_N , hogy különböző frekvenciájú hangok is összehasonlíthatóak legyenek.

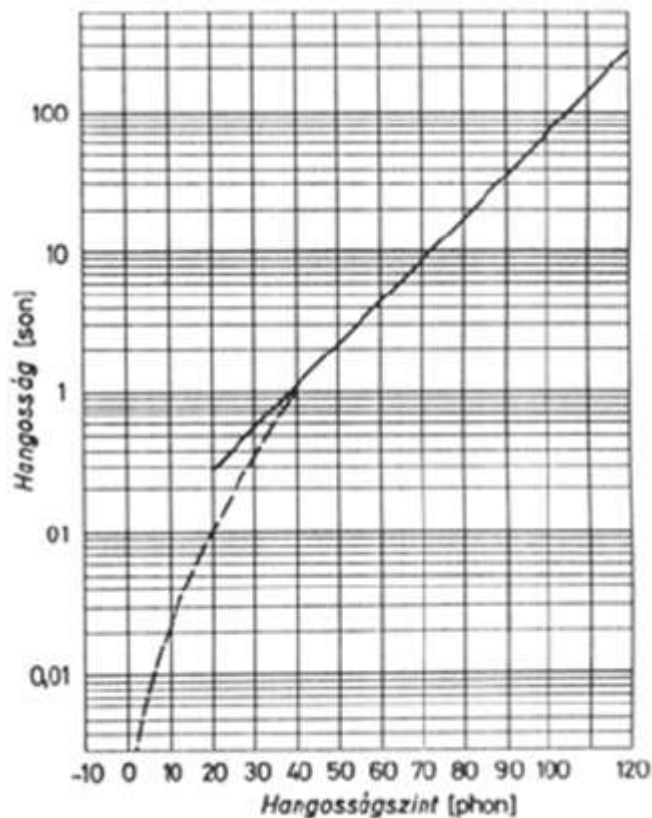
A hallástartomány frekvenciáinak hangerősszintje (L_n) és a hangnyomásszintje közötti összefüggést **H. Fletcher** és **A. Munson** tanulmányozta tisztán szinuszos hangokkal. Az eredményeikből született egy grafikoncsereg, melyet 1961-ben, egy ajánlásban nemzetközileg is rögzítettek, 2. ábra.



2. ábra, Fletcher-Munson görbék.

Természetesen ezen görbék felvételéhez nagyon sok normális hallású személyt megvizsgáltak. A 0 *phon*-nak megfelelő görbe azonos a hallásküszöb frekvencia görbéjével. Ám logaritmikus *phonskála* és a *dB-skála* használata nehézséget okozhat, hiszen a *phonskálán* nem kétszereződik meg az adott érték, kétszeres energia esetén. Ennek a problémának megoldására dolgozta ki **S. S. Stevens** a hangosságskálát, melynek mérték egysége a *son* lett. Továbbá 1 *son* 40 *phon* hangerőségnek felel meg. Az átváltás az alábbi módon történik (3. ábra):

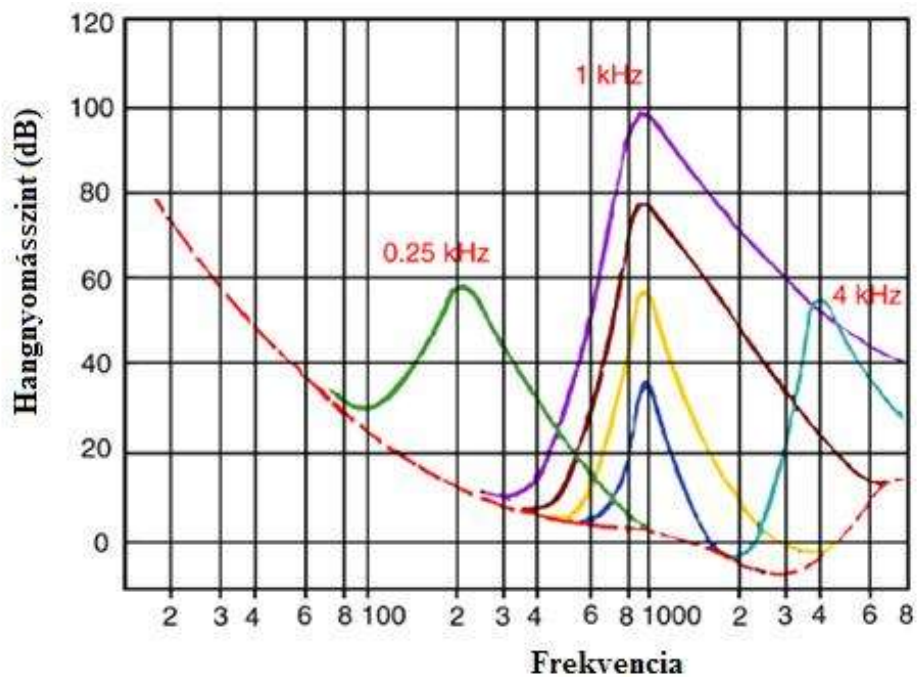
$$L_p = 2^{(L_n - 40)/10}$$



3. ábra, Son és Phon közötti összefüggés grafikus ábrázolása, jól látható hogy 40 phon alatt már nem lineáris az összefüggés.

A célja ennek a megoldásnak, hogy az egyre hangosabb hangokat lineárisan összegezve látható legyen a növekedés hatása is, így tehát ha két különböző *phon*-értékű hangot szeretnénk összeadni azt előbb át, kell váltani *sone*-ra, és akkor végezhetjük el az összegzést.

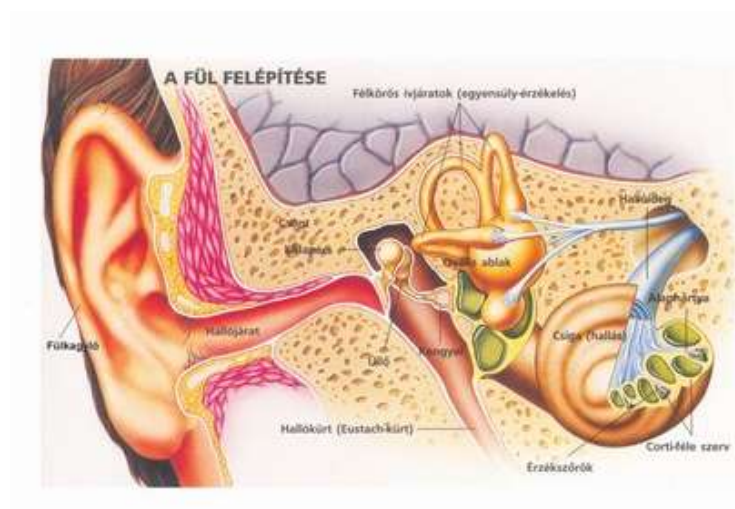
Egy másik érdekes jelenség a hallásunkkal kapcsolatban, hogy ha van egy vizsgálándó hang és hozzá frekvenciában nagyon közel egy zavarónak tartott hang, akkor a zavaró hang meg emeli a hasznos hang hallásküszöbét. Ezt a jelenséget hangelfedés jelenségének nevezzük, 4. ábra. Érdemes még megjegyezni hogy ezen jelenség nem szimmetrikus a frekvencia tartományban, magasabb frekvenciákon erősebben jelentkezik. [27.]



4. ábra, Magyarázó ábra a hangelfedés jelenségéhez.[27.]

2.2 FÜL FELÉPÍTÉSE és MŰKÖDÉSE

Mint tudjuk, az ember hallószerve, a fül itt történik a külső inger – nyomásváltozás – átalakítása idegimpulzusokká, tehát a fülre ható inger, a vivőközeg nyomásingadozása. [18.]



5. ábra, A fül felépítése.

A *külső fül* részei: fülkagylót, külső hallójárat (5. ábra). A hanghullám a fülkagylón keresztül kerül a hallójáratba. A fülkagyló fő feladata a hanghullámok összegyűjtése és hallójáratba terelése, a formája és anyaga is ezt a célt szolgálja. A hallójárat végén van, a dobhártya van mely fő feladata a hanghullámok közvetlen felfogása és még a középfület választja el a külső fültől. Érdekes még megjegyezni, hogy más emlősökkel ellentétben az embernél a fülkagylót mozgató izmok nagyon csökevényesek a mozgásban nagyon minimális szerepük van, míg más állatok esetében, mint a kutyáknál nagyon fejlett izmokkal van ellátva. A fülkagyló folytatása a hallójárat, a külső részen még porcos összetételű a belsőbb járatok már csontból épülnek fel.

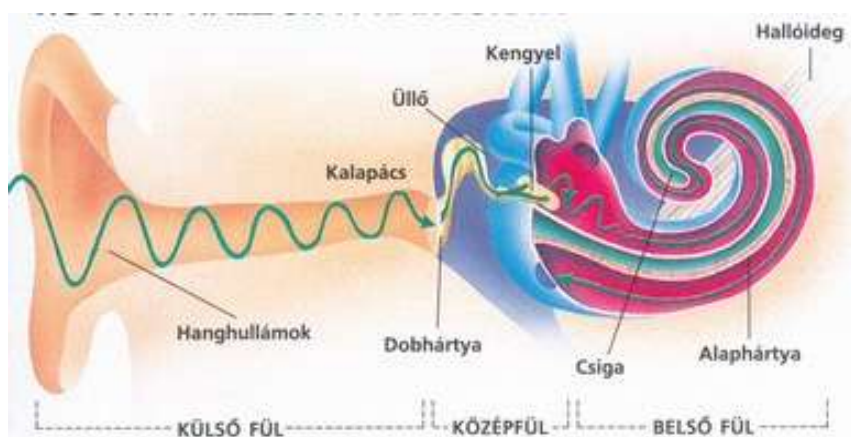
A *középfül* részei: dobhártya, dobüreg és a csecznyúlványi szivacsos sejtek. A dobhártya egy hangszóró membránjához hasonlóan kifeszítet, a hallójárat felől, bőr álm ezzel ellentétben a közép fül irányából nyálkahártya borítja. Színe ezüstszerű, légmentesen elzárja a dobüreget és egyben a középfület a külvilágtól. A dobhártya mögött dobüreg található mely kb. 1 cm^3 nagyságú. Itt három, egymással ízületi kapcsolatban álló parányi hallócsont foglal helyet melyek a következők: *kalapács* (malleus), *üllő* (incus) és a *kengyel* (stapes).

A három csont kapcsolata a következő, a kalapács „nyele” a dobhártyába ágyazott, míg a „feje” következő csont, az üllő testével áll ízületi kapcsolatban. Az üllő feje pedig a kengyel fejével ízesült. A dobüreg ellentétes oldalán található ovális ablakban található hártába van beágyazva a kengyel „talpa”, ezek így együtt rugalmasan rezegnek és így továbbítják az ingereket.

A hallás során a hanginger a hallójáraton áthaladva a dobhártyának ütközik és rezgésbe hozza a dobhártyát, a rezgés átadódik a kalapácsnak, az üllőnek és végül a kengyelnek. A hallócsontokon történő átadás nem csak egy szerű átadás, hanem egy mechanikai hangerősítés is, e rendszer segítségével kb. 30 dB erősítés valósul meg, ez függ kortól-nemtől és életkortól is. A belső fülben található folyadéknak az ovális ablak továbbítja a rezgést, melyet a kengyel hoz rezgésbe.

A dobüreget nyálkahártya borítja be. A dobüregben normál légköri nyomáson levegő található, mivel az hallás a nyomásváltozáson alapszik a dobüreg a fülkürtön a garat felső részével összekötetésben áll. Ezen keresztül folyamatosan kiegyenlítődik a dobüregben lévő nyomás és a külső légnyomás. Ha

a külső légnyomás a dobhártyát befeszíti, tehát a külső nyomás nagyobb, mint ami a dobüregben van („pl.: hegyről lefelé jövet”), akkor a hallócsontok szabad mozgása akadályozott. A fülkürtnek e jelenség kiküszöbölése a feladata, hiszen minden egyes nyelés során ez a járat kinyílik és kiegyenlítődik a nyomás, ha ez nem történik meg, úgy érezzük, eldugult a fülünk és idétlenesen rosszabbodik a hallásunk. Nem csak ez a feladata a fülkürtnek működése során itt ürül, ki a dobüregi nyálka, mely felgyülemzése azért fontos mert, a hallócsontok folyadékban még nehezebben mozognak és hallás még rosszabb lesz. A dobüreg hátsó részén van egy nyílás, mely a csecsnyúlványi szivacsos üregrendszer központi sejtjéhez vezet.



6. ábra, A fül részei.

A *belső fül*ben található a hallás és egyensúlyozás érzékszerv-rendszere (6. ábra). Az itt található csontos labirintusban helyezkedik el az előcsarnok és az abból kiinduló csontos csiga – hallószerv –, valamint három félkörös ívjáratból, a tömlőcskéből és zsákocskából álló egyensúlyozó szerv. A csont labirintust folyadék tölti ki. A csontos csigát középen egy háromszög alakú tér, a hártás csiga teljes hosszában két csatornára osztja fel. A dobhártya megrezgeti a hallócsontokat, melyek az ovális ablak közvetítésével meglökik a csiga felső folyadék terét, így a hangrezgés folyadékrezgéssé válva végigszalad a csiga csúcsáig, ott „megfordul”, visszafelé szaladva, közben megrezgeti a hártás csigát és végül a folyadékrezgés visszarúg az alsó csatorna kezdőpontján lévő

kerek ablak hártáján. A csontos csigát a hosszában végigfutó, háromszögletű hártás csiga két folyadéktérre osztja ennek a hártánknek az alsó fele az *alaphártya*, a felső az úgynevezett *Reissner-hártya*. Az alaphártján helyezkednek el a szőrsejtek, melyek felső feléből szőrszerű képződmények állnak ki a szőrsejtek felett még egy fedőhártya húzódik. Az itt ismertetet szerv a *Corti-szerv*, a hallás érzékszerve, ahol a mechanikus rezgés idegingerületté válik, az hogy minként működik **Békésy György** fedezte fel, e munkájáért Nobel-díjat is kapott 1961-ben. Tehát a hanghullám rezgésbe hozza a csiga felső folyadéktérét, amelyben végigszalad a hullám, a csúcsban visszaverődik és visszaszalad az alsó téren a kerek ablakig, ahol rezgésbe jön az alaphártya. Az abban lévő különböző hosszúságú hurkok miatt ott lesz a legnagyobb kitérés, ahol a hangmagasságnak megfelelő hosszúságú húr van, pl.: magas hangoknál a csiga alapján, mély hangoknál a csúcs felé. Ott ahol a nagy amplitúdójú kitérés van, ott a szőrsejtek kapcsolatba lépnek a felettük lévő fedőhártyaival, és a szőrsejtekben létrejött elektrofiziológiai változás elindul el a hallóidegen keresztül. Minél erősebb a hang, annál nagyobb lesz a kitérés, és annál nagyobb számú elektromos jel keletkezik. A csiga tehát képes a hang analízisére, meg tudja különböztetni a hang magasságát és erősségét. A jelek a hallóidegen, a bonyolult hallóidegpályán az agyba jutnak, ahol a hangérzet keletkezik.

A belső fül másik része még az egyensúlyozás érzékszerve, melynek semmilyen szerepe sincs a hallás folyamatában.

3. VISSZHANGOK és FAJTÁIK

3.1 EGYSZERŰ VISSZHANG

Életünk során akkor hallunk egyértelműen visszhangot, ha valamely hangjelenség visszaverődés következtében ~50 ms vagy annál nagyobb késleltetéssel ismét fülünkbe jut, mivel normális hőmérsékletű levegőben ez az idő 34 m hang utat jelent.[1.] Tehát egy 17 m távolságban álló visszaverő felület visszhangot okozhat ilyen távolságok már közepes méretű (pl.:2000 m³ fölött) termekben előfordulnak, ezek tudatában minden akusztikai célra épült helységben már oda kell figyelni a visszhangokra. A visszhangok megfigyelése mégis szabadban könnyebb, hiszen egyetlen meghatározó reflektáló felület van. Zárt terekben viszont már más a probléma ugyan is nemcsak a visszhangot okozó falról verődik vissza a hang, hanem más helyekről is pl.: plafon. A tiszta visszhangot elmossák, a különböző késleltetések következtében, a más-más felületekről visszaverődött hangok. Ám ezt a saját javunkra is fordíthatjuk, hiszen ez egy lehetséges módja a teremvisszhangok megszüntetésének. Szabad térben az elmosódást okozó visszaverődések általában hiányoznak, ill. a más és más reflektáló felületekről érkező visszhangok külön-külön is érzékelhetők.[1.]

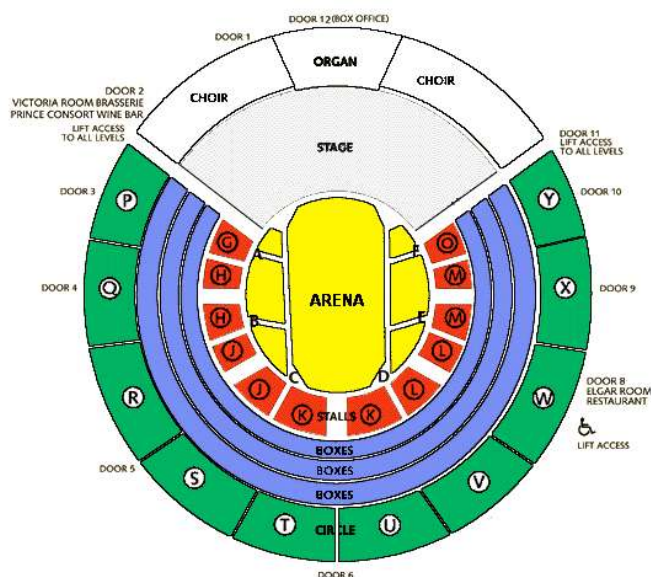
Mint tudjuk a híres tihanyi visszhang esetében a *Visszhangdombon* álló személy a tőle 500 m távolságban álló apátsági templom északi oldalfaláról verődik vissza. A két domb között völgymélyedés foglal helyet, amely az elmosódást okozó földi visszaverődéseket régebben kizárta ám a nagy építkezések miatt mára ez már jelentős. A kb. 1000 m-es hangút 12-13 szótagú, tehát egy majdnem teljes átlagosan hosszú mondat tiszta visszahallását tette lehetővé. A visszhang hallhatóságát a völgyben épített házak és a *Visszhangdomb* teljes beépítése az utóbbi néhány évtizedben teljesen lerontották.

Régebben a modern számítás technika megjelenése előtt a visszhangok feljegyzésére oszcillográfot vagy szintírórt használhattak. A rövid idejű hangjelet keltettek (pl.: pisztolylövés), majd a mikrofonnal rögzített jelsort vizsgálták. Az

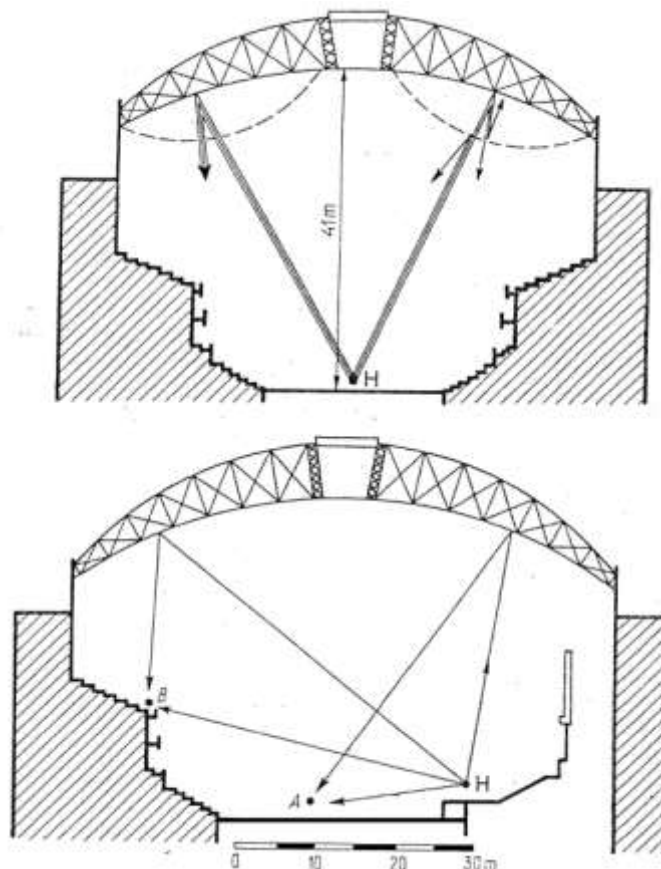
elemzés úgy folyt le, hogy előbb meghatározták az impulzusok közti távolságot, majd a hang terjedési sebesének ismeretében már kiszámolható volt a reflektáló felület távolsága. Továbbá geometriai távolságok ismeretéből vagy egyszerűen a lemérésével a hang utak azonosíthatók egy adott helyiségben.

Az *oszcillogramos visszhangmérés* igen pontos eredményt adott (ma már sehol sem használják e mérési megoldást). Ezt érdekes gyakorlati példa hitelesíti is. Egy terem építésekor a kivitelezők a tervekkel ellentétben 75 cm-rel alacsonyabbra építettek ez a hiba az oszcillogramos elemzéseknél kimutatható volt centiméteres pontonsággal. [1]

Egy teremben az egyik legnagyobb akusztikai hiba mindig is a visszhangjelenségek okozták, hiszen egy vagy több egymásután keletkező visszhang létrejöttéhez elegendő egy 17 m-nél nagyobb belső méretekkel rendelkező helyiség.



7/a. ábra, A londoni Royal Albert Hall szerkezete.



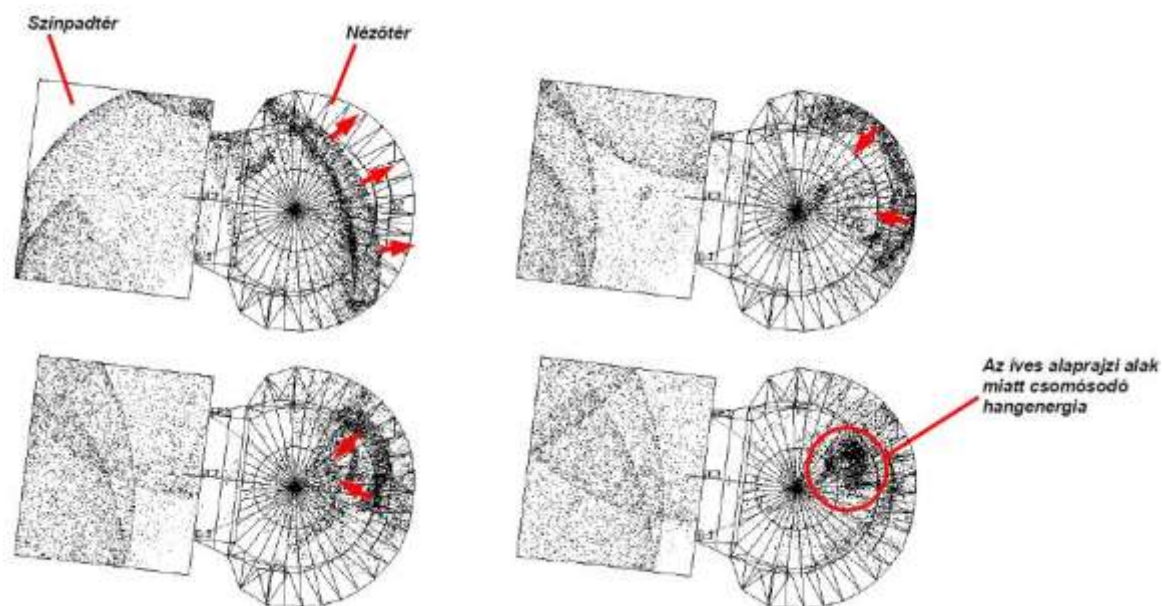
7/b. ábra, Londoni Royal Albert Hall két metszete. A felső képen a kupola alá akasztott drapériái hatástalanságát szemléltetjük, az alsó képen az A és B pontba érkező zavaró visszhangok útját figyelhető meg [1.].

Egyik leghíresebb nem hazai visszhangpélda a londoni *Royal Albert Hall*, a hatalmas 87000 m^3 belső térfogatú terem (7. ábra) 1871-ben épült, és nagyságával az angol birodalmat kívánta demonstrálni.[1] A hatalmas méretek következtében rengetek akusztikai hiba volt megfigyelhető. A hibák egyik fő okozója az alaprajzban keresendő. Az elliptikus kialakítás rendkívül rossz utótengésű időt eredményezett, a visszhangos teremben ráadásul még az energia eloszlás is egyenlőtlen volt. A forgás ellipszoid jelegű mennyezet sem kedvezett a terem akusztikájának, ugyanis a terem padlózata alá esett az ellipszoid egyik gyújtópontja. Az itt ülő hallgatók koncentrált visszhangot hallottak ülőhelytől függően 30 – 60 m út-különbséggel, azaz 100 – 200 ms-os késleltetéssel. A terem keresztmetszete 3. ábrán látható ahol a két fő ülőhelycsoport be van jelölve (A, B), melyből látható, hogy a mennyezetről érkező visszhangoktól nem mentes

egyik csoport sem. Az 'A' pontba érkező visszhang mintegy 160 ms késleltetéssel, a H pontban a kedvezőbb első visszaverődés már csak 85 ms késéssel érkezik, az oldal irányú visszhangokkal nem kell számolni, hisz a teremben majdnem teljesen körbefutó erkélyek teltház esetén nagyon csekély visszhangot okoznak.

A terem akusztikáját javítandó a mennyezetre nehéz drapériákat függesztettek, így a mennyezetről érkező visszhangokat szétszórták és ráadásul a hosszú utózungési időt is csökkentették, ám a terem másik fő gondját, az egyenlőtlen energia eloszlást tovább rontotta energia elnyelésük következtében. Később zenekari hangvetőt készítettek a mennyezetre pedig hangvető idomokat építettek, de ezen átalakítások után sem lett belőle elfogadható hangverseny terem.

A kupolák és homorú mennyezetek okozta visszhangok kiküszöbölésére gyakran használják azt a megoldást, amely a felület domborúvá alakításához vezet. Nem minden esetben használható a függönyös megoldás és a vastag drapéria is okozhat problémát, sőt tűzvédelmi aggályokat vett fel.



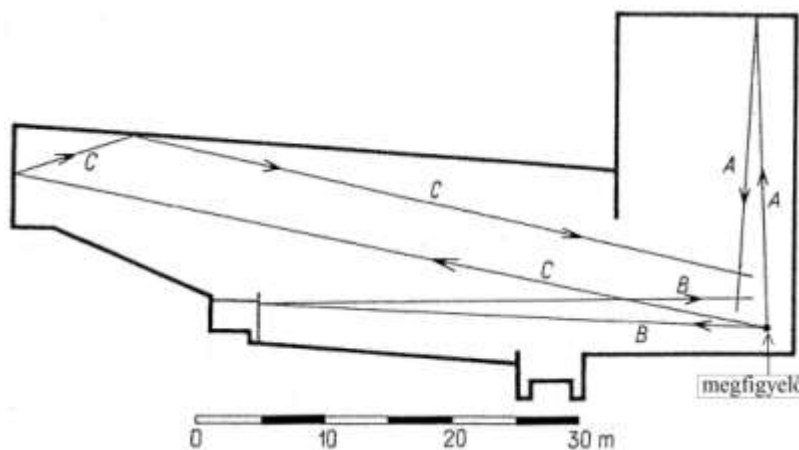
8. ábra, Hanghullám terjedése színházban, 5 ms-os lépésenként.[15.]

Egy másik a harmincas években használt kísérleti módszer volt a mennyezetről lelógatott vagy kifeszített zsinórok. Ezt a megoldást választották a *berlini dóm* kupolájának akusztikai vizsgálata során kíséltetettek ezzel a megoldással. Ám semmi változást nem értek el vele. Ez nem meglepő ugyanis a pár milliméteres zsinórok aligha szólnak bele a nála nagyság rendekkel nagyobb hullámhosszú hanghullámok terjedésébe. Nem csoda hát, hogy ez az építészeti szempontból rendkívül kedvező megoldás, - hiszen nem kell nehéz drapériákat megtartani -, nem terjedt el.

[1.] Nem csak külföldön fordultak elő teremakusztikai hibák az *Erkel F. Színház* is rendelkezett ilyen hibákkal az átalakítása előtt. (1951.) A hazai színház is az angol példához hasonlóan teremakusztikai hibák gyűjteménye volt. Mérésekkel és megfigyelésekkel megállapították, hogy az öt egymástól jól elkülöníthető visszhangok, a színpadon elhelyezkedő megfigyelőhöz képest 63, 114, 141, és 164 m útkülönbséggel érkezik visszhang. A 9. ábrán az első hármat jól megfigyelhetjük.

Öt visszhang utat figyelhették meg: az első a színpadi mennyezetről verődött vissza, ám ez a színpad felett elhelyezkedő zsinórpádlás bedíszletezése esetén ez elmaradt. A második visszhang már nem volt ilyen kedvezőbb ugyanis az a földszint hátsó faláról érkezett és ez állandó volt. A harmadik is szintén állandó jellegű volt ugyanis az erkély hátsó faláról a mennyezetre verődve és onnan jutott a színpadra. A negyedik visszhang megfigyelése már nem volt ilyen egyszerű, ugyanis a létrejöttében a hátsó fal, az oldalfalak és a mennyezet egyaránt szerephez jutottak, ezt csak hosszadalmas mérések és modell vizsgálatok során tudták megfigyelni. Az ötödik és egyben utolsó visszhang úgy indult el, mint a harmadik, de ha a hang kis szögben érte el a mennyezetet, ennek következtében nem jutott el a színpadra, hanem a színpadnyílás feletti falrésznek ütközött, ahonnan a földszinti hátsó falra esve verődött vissza a színpadra úgy, mint ahogy a második a második visszhang tette. A megfigyeléseket összegezve arra jutottak, hogy a visszhangok fő okozói, az *Erkel F. Színház*ban, a mennyezet és a hátsó fal volt, de nem elhanyagolható szerepe volt az oldalpáholyokat elválasztó falaknak is. A megfordított irányban haladó hangok természetesen hasonló időkézésű visszhangot eredményezett, melyek egyaránt

zavarták a közönséget és zenekari előadás esetén a zenekart vagy az énekeseket is zavarta. Ráadásul a színpadon tapasztalható visszhangok a színház telt állapotában pontosan ugyanúgy létrejöttek, mint az üres teremben.



9. ábra, A budapesti Erkel F. Színház keresztmetszeti képe az 1951-es átalakítás előtti állapotában megfigyelt visszhang utak berajzolásával.

A hazai színház teremakusztikai hibáinak helyrehatása sem volt egyszerűbb feladat, mint az angol példában, ugyan is a túl rövid utózungési idő miatt újabb hang elnyelők alkalmazása csak az utózungési idő csökkentésében és a hangenergia-ellátottság csökkentésében lett volna használható. Visszhangok kezelésére csak akkor használhatók az elnyelők, ha elegendően nagy az hangenergia-ellátottság és az utózungési idő is kellően hosszú. Tehát a visszhangok kezelésére csak valamilyen szóró felületekkel lehetett megoldani. Ezek a szóró felületek a hátsó falra, az oldalfalakra és a páholyok elválasztó falaira kerültek felhelyezésre, de a mennyezetet is ellátták ilyen felülettel.(10. ábra).[1.]

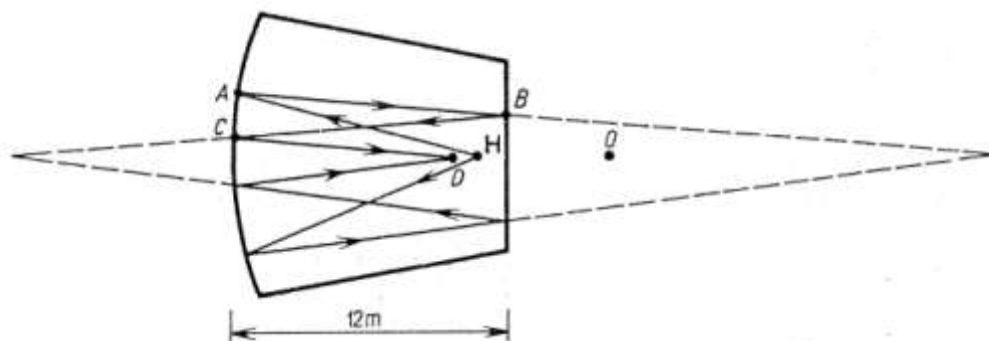


10. ábra, Profil metszet az Erkel F. Színháznál alkalmazott gipszelemekről.

A diffúz fal 0,20... 1,20 m méretű függőleges tagolással készült, mely szabálytalan alakzatokat foglal magába és gondot fordítottak arra, hogy az egyes

elemek között ne legyenek párhuzamos síkok, mert ez újabb visszhangok keletkezését okozhatja. Magas frekvenciájú hangok szóródása ellen a nagyobb síkfelületek pár centiméteres kisméretű tagolást kaptak. Ezek a 6 cm vastag gipsz elemek egy üveggyapot tömetéssel lettek a régi falakra felhelyezve. Így a terem akusztikája jelentősen javult.

Visszhangkérdésnél még egy dolgot nem szabad elfelejteni, az egyszerű visszhang keletkezéséhez általában azt a szabályt szokás emlegetni, hogy legalább 17 m-nél nagyobb helyiségre van szükség. Sűrűn ismétlődő visszhang, úgynevezett csörgővisszhang, alakulhat ki párhuzamos falú vagy más rosszul megtervezett helyiségekben is. Olyan helyiségeknél melyek 17 m-nél kisebb méretekkkel rendelkeznek nem szokás visszhangról beszélni, pedig ilyen kis helyiségek esetében is előfordulhat, mint ahogy a 11. ábrán is látható [1]. Az 11. ábrán látható helyiségről is az feltételezhető, hogy nem alakul ki benne visszhang, hiszen csak 12 m és nincsenek benne párhuzamos falak. Ám ha jól megfigyeljük a hátsó fal görbületi sugara a terem hossz méretének $\frac{4}{3}$ -a középpontja O -ban van, és a H pontból kiinduló hangsugarak, a geometria törvényeit alapul véve, a D pontban gyűlnek össze. Tehát a közvetlen hang hullám és a háromszor visszavert hullám között 36 – 38 m útkülönbség is kialakulhat, ez 100 ms-os késleltetésnek felel meg a terem közepében nézve, pedig a terem méreteiből nem erre a tényre következtetnénk. Hasonló példát nem nehéz keresnünk nézzük csak meg az egyetemünk bármelyik kisebb előadó termét (pl.:B-3). Az ilyen jellegű problémák elkerülhetők elnyelő anyagok alkalmazásával, vagy ami a legkézenfekvőbb a visszaverő falfelület átalakításával oly módon, hogy a hanghullámokat szétszórja.



11. ábra, Példa arra, hogy 17 m-nél kisebb termekben is létrejöhet egyszerű visszhang.

3.2 TÖBBSZÖRÖS VISSZHANGOK

Szabad térben előfordulhatnak olyan visszhangok, amelyek két párhuzamos fal között ide-oda verődve sokszorosán hallhatók. Egy ilyen jelenség gyakran nagy kastélyokban, ahol a 10 m magas épület két szárnya között (kb. 37 m) egy pisztolylövés 60 darab visszaverődését számoltunk meg. Ha olyan sűrűn jönnek a visszaverődések - tehát olyan kicsi a faltávolság -, hogy külön-külön már nem vehetők észre, de csörgésszerűen halhatók, akkor *csörgővisszhangról* beszélünk.

A többszörös visszhang másik keletkezésének lehetősége, hogy a hang nem két akadály között verődik ide-oda, vagy több, térbeli egymás után elhelyezkedő akadályrendszerrel verődik vissza pl.: oszlopsorról, kerítésről vagy lépcsőzetesen emelkedő ülésorokról. Így az egymás után elhelyezkedő akadályokról visszaverődő impulzusok távolságát az akadályok közötti távolság határozza meg. Ezen jelenség neve *sorozatvisszhang*. Erre vonatkozólag is érdekes elméleti példát ismertettek már korábban [1]: 75 m, 135 m, 180 m, 210 m és 225 m távolságban elhelyezkedő felületek „*clamore*” kiáltásra a „*clamore amore more ore re*” értelmű sorozatot hallunk vissza, ugyanis a rövidebb utat befutó előző visszhang mindig hangosabb a következőnél és így a vége a következő teljes szó elejét elnyomja. A „*clamore*” példa kedvelt demonstrálása a 12. ábrán látható.



12. ábra, A „clamore” példa népszerű ábrázolása.[2.]

Ha az akadályok egymástól való távolságát 2-3 m-re növeljük, akkor csörgő sorozatvisszhang keletkezik. A már említett csörgővisszhang elhalása csak az elnyeléstől függ, az utóbbi hossza csak az akadályok számától függ.

A csörgővisszhang egy másik fajtáját akkor figyelhetjük meg, ha a hangimpulzus visszaverődéseit 85 cm-rel folyamatosan növekvő akadálysorról halljuk vissza, az egymás után érkező hangimpulzusok időközése 5 ms, vagyis egy 200 Hz frekvenciájú zenei hangnak érzékeljük. Ezt a jelenséget *zenei visszhang*nak nevezzük. Ez a fajta visszhang normál csörgő visszhangból nem alakulhat ki (a példánk esetében a két falnak 42,5 cm távolságban kellene egymástól állnia). Zenei visszhang általában nagyon nehezen is figyelhető meg, mert nem minden irányból hallható és rövid ideig tart, ráadásul rendszerint kisméretű visszaverő felületek miatt gyenge.[1]

A már említett két csörgővisszhang, tehát ugyanolyan hatású, mégis lényeges vonatkozásaiban különböznek egymástól. Az ismétlődő csörgővisszhang egymás utáni csökkenő intenzitással jelentkezik, tehát a csörgővisszhang csillapodó jellegű, és ha még is két fal olyan közel volna, hogy zenei visszhangnak kellene létrejönnie, a lecsengő periódusok száma olyan kevés volna, hogy a határozott hangmagasságot nem ismernénk fel. Példának okáért egy 10-szeres csörgővisszhang nagyon jól érzékelhető még igen rövid idejű késleltetés esetében is, de a 10 periódusból álló hangimpulzus sorozat alapján még nem

tudjuk meg- határozózni egyértelműen a hangmagasságot. A sorozatvisszhangnál már más a helyzet, hiszen a különféle távolságokból visszaérkező visszhangelemek majdnem ugyanakkora csillapítást szenvednek, mert mindegyik egyszeri ütközéssel verődik vissza. A levegő okozta kis többletcsillapítás ugyan szintén okoz hangerő csökkenést, mint a „*clamore*” példából láttuk, de nem túl jelentősen. Ha a visszaverő felületek száma kisebb 10-nél, csörgővisszhangot hallunk, ha nagyobb, a felületek egymástól mért távolsága szerint csörgő vagy zenei visszhangot érzékelünk. Ezért is annyira nehezen és ritkán megfigyelhető jelenség zenei visszhang. Épületekben gyakran megfigyelhető a csörgő visszhang hisz könnyen előidézhető, de utólagosan megszüntetni a teremakusztikai hibát már koránt sem egyszerű.

A csörgővisszhang magyarázatához a 13. ábra nyújt segítséget. Képzeljünk el két párhuzamos falat egymástól d távolságban. Legyen a megfigyelő az M pontban, az I faltól a távolságra, a hangforrás a II . faltól e távolságra, végezetül legyen a hangforrás a H pontban és a megfigyelőtől való távolsága b . A megfigyelőhöz a hangimpulzusok két sorozatban érkeznek, az egyik a hangforrás felől közvetlenül, míg a másik az a távolságban álló falról visszaverődve, aztán a másik falról visszaverődve stb.. A megfigyelőhöz érkező impulzusok sorrendben a következő utat futották be: $b, 2a, 2(d-a), 2a, 2(d-a) \dots$ A másik hangimpulzus-sorozat $(2e+b)$ út megtétele után kezdődik, majd a megtett utak ismét $2a, 2(d-a), \dots$ sorrendben következnek. A 13. ábrán az impulzussorozat időbeli eloszlását figyelhetjük meg.

Az ismétlődés periódusa:

$$T=2d/c$$

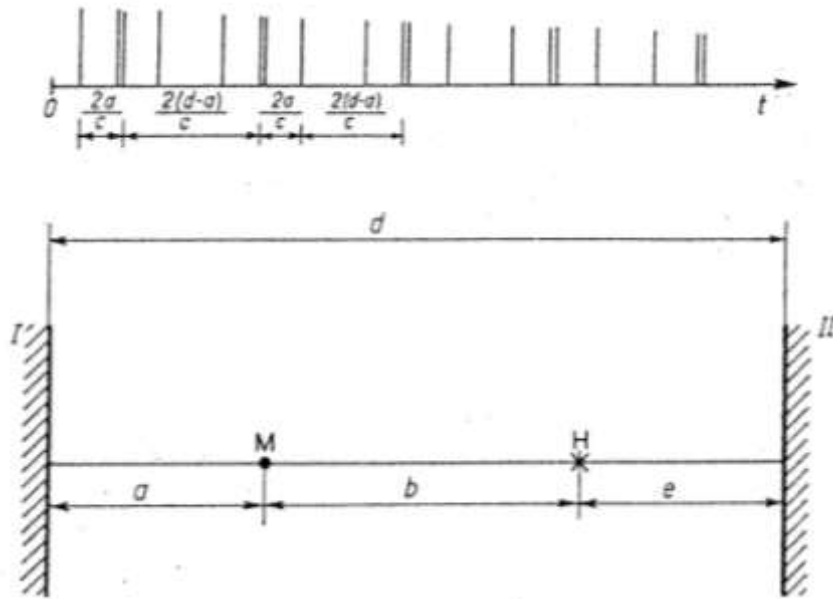
Ahol c a hangsebesség értéke (~ 340 m/s), ez idő alatt 4 impulzus érkezik a megfigyelőhöz Az impulzusok időtávolsága ciklikus sorrendben:

$$t_{n+1}=2a/c$$

$$t_{n+2}=2(e-a)/c$$

$$t_{n+3}=2a/c$$

$$t_{n+4}=2b/c$$



13. ábra, Csörgővisszhang elméletéhez.

Különleges esetekben egyszerűbb összefüggésekhez jutunk, például ha a hangforrás és a megfigyelő ugyanazon a helyen van, minden harmadik és negyedik impulzus összeesik. Egy másik eset, ha a hangforrás és a megfigyelő helye pont középen van, akkor mind két impulzuspár egybe esik és az impulzusok periódusa: gyakran a csörgővisszhang periódusa.

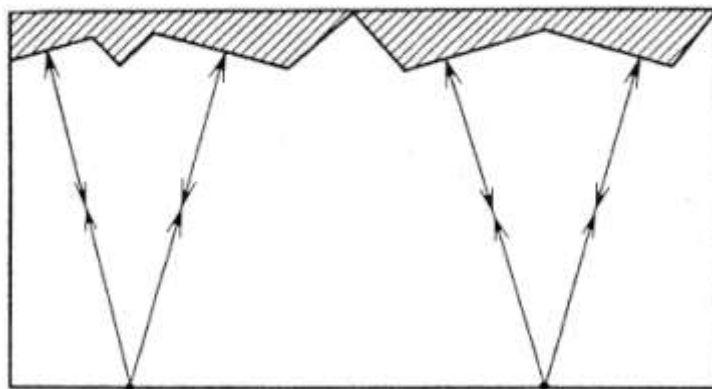
$$T_k = \frac{d}{c}$$

Végezetül, ha a hangforrás és a megfigyelő valamelyik fal mellett helyezkedik el, minden negyedik impulzus összeesik és ekkor a periódus a fenti képlettel meghatározott értéknek kétszerese, vagyis ismét az első szerinti érték. Mivel bizonyos sűrűsége után a fül már nem érzékeli külön-külön az egyes impulzusokat, ezért előfordulhat, hogy egyes termekben a csörgővisszhang a széleken zavaró hatású, míg középtájon nem észlelhető.

A párhuzamos falú termek, amelyekben a tér két irányában rohamosabban csillapodik a hangenergia, míg a harmadikban kevésbé, ilyenkor azonnal hallható lesz a csörgővisszhang. Ez a jelenség gyakran színházakban volt tapasztalható, ott ugyan is a hátsó falat a visszhangok elkerülése céljából rendszerint elnyelő anyaggal vonták be, ugyancsak jól csillapított a közönség által elfoglalt padlófelület is. Tehát hosszirányban és magassági irányban visszaverődések nem keletkezhetnek, míg a párhuzamos oldalfalak között, ha azokat nem eléggé csillapítottak, kellemetlen csörgővisszhang indul meg. A csörgővisszhang nem az oldalfalak nagyon kis csillapítása miatt, hanem a másik két irányból észlelhető erős csillapítottság miatt hallható, érdekes megfigyelni, ha ugyanazt a teremtet üresen hagyjuk és a hátsó fal visszaverő kepeségét növeljük, a már említett okok miatt, a jelenség eltűnik.

Olyan termekben, melyek a nyilvánosság számára épültek, tehát a padlón ülés sorok vannak elhelyezve, nem figyelhető meg mennyezet és padló irányú csörgővisszhang, ugyanis a közönség elnyelő és szétszóró felülete ezt meg akadályozza. Ugyanezzel a közönség felülettel már nem lehet számolni a nagyméretű hangfelvételi stúdiókban, itt már oda kell figyelni a mennyezet-padló között kialakuló csörgővisszhangra. A legtöbb akusztikai hibával akkor kell számolni, ha az elnyelő anyagok egyenlőtlenül lettek elhelyezve, a linóleummal borított padlófelület, és még az óvatosságból, de nem kellő körültekintéssel alkalmazott párhuzamostól eltérő oldalfalak vannak a helyiségben.

A fenti esetre jó példa a budapesti Hunnia Filmgyár területén épült kis vetítő, melyben erős csörgővisszhang volt tapasztalható. Az alig 3 m magas helyiségről kiderült, hogy a négy oldalfalai korábban az utózengeési idő csökkentése céljából akusztikai elnyelő anyaggal burkolták be, amit gondatlanságból befestettek és így már nem tudta ellátni a feladatát. A csörgővisszhang azáltal szűnt meg, hogy falak elnyelő tábláit részben lebontották.[1.]



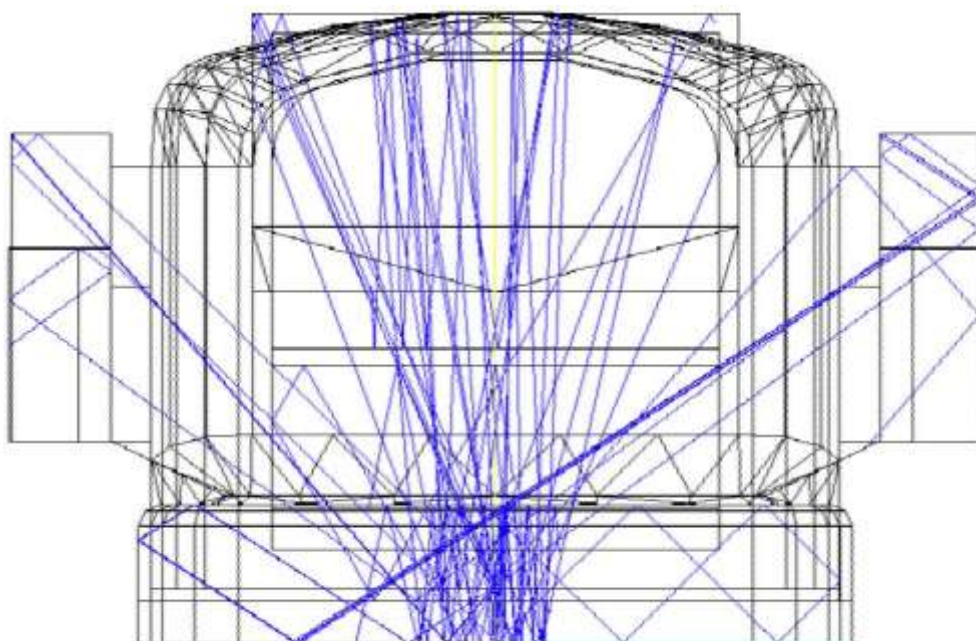
14. ábra, Csörgővisszhang keletkezése sík padló és fűrészfogas kiképzésű mennyezet között.

Csörgővisszhang alakulhat ki olyan teremben is, ahol a mennyezetet úgy alakították már ki, hogy nem legyenek párhuzamos felületek a mennyezet és a padló között.[1.] Ám ha nem kellő körültekintéssel jártak el a cikk-cakkos mennyezetet tervezésekor itt is kialakulhat csörgővisszhang, pl.: 14. ábra. A két megfigyelési pontban a három-három felület között keletkezik csörgővisszhang. A mennyezeti reflexiók az egyik periódusban a bal, másik periódusban a jobbra található mennyezetrésről indulnak ki, melyek a megfigyelő szem pontjából teljesen mindegy, ugyanis a csörgővisszhang ugyanúgy hallható, mint sík mennyezet alatt.

A kisméretű termek fő egyik akusztikai hibája lehet a csörgővisszhang. Legfőképp jellemző ez lépcsőházakra, nyitott vagy árkádok folyósókra. A nyitott folyósókon keresztirányban nyilván nem következnek be visszaverődések, hosszirányban pedig a folyosó hossza miatt csak gyenge és hosszú idő múlva érkező visszhang lenne elképzelhető. Ellentétben a padló és mennyezet között kitűnően alakulhat ki csörgővisszhang. A csörgővisszhang kialakulásának esélyét növeli még az is, hogy a padló általában kővel borított, a mennyezet pedig sokszor boltozatos. Ez a jelenség figyelhető meg Magyar Nemzeti Múzeum udvarának földszinti keresztboltozatos, árkádok kerengőjében, ahol a kopogó lépéshangokra olyan csörgővisszhang keletkezik, hogy a sétáló a saját lépésének hangját több tucat ember lépéseinek hallja. Ezen jelenség elleni védekezési megoldás lehet a padlóra fektetett szőnyeg, ám ez a megoldás nem szünteti meg a

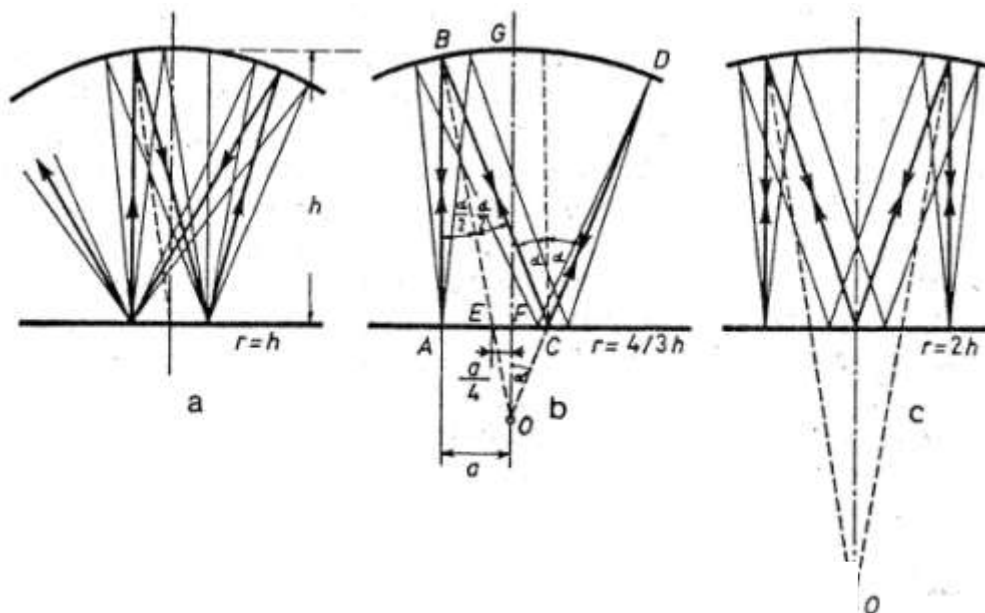
csörgővisszhang kialakulásának esélyét csak csökkenti a hatását. A hallható csörgővisszhangok száma a hangforrás erősségétől és az alaprajztól függően 30...40, de mivel igen gyorsan, mintegy 15 ms sűrűségű sorozatban követik egymást, 1 másodpercen belül elhal.

Csörgővisszhangot okozhat még a színházak, hangversenytermek enyhén homorú mennyezete is, ugyanis a termek rendszerint téglalap alakúak és a mennyezet vagy teljesen homorú vagy csak a szélein lekerekítettek. (15. ábra) Így csörgővisszhang kialakulásának nagy veszélye a terem hossz tengelyében van, ide általában szőnyeget helyeznek el, ahol így kevésbé észlelhető, mint a nélkül.



15. ábra, Példa arra, hogy csörgővisszhang enyhén boltozatos teremben is kialakulhat.[15.]

3.2.1 KUPOLAHATAS



16. ábra, Különféle kupolák okozta visszaverődések.[2.]

Egy kupola hatása nem csak a csörgő visszhang felerősítésében rejlik, hanem más különleges akusztikai jelenségek előidézésében is. Három fő gömbszimmetrikus boltozat típus létezik. Mindhárom metszete körív, de a görbületi sugaruk és hangforrás távolságának viszonya szerint gömb, elliptikus vagy parabolikus. A hiperbolikus eset nem érdemel tárgyalást, hisz a visszaverő felület már majdnem úgy viselkedik, mint a sík mennyezet. A három boltozat típus a 16. ábrán megtalálható.[2.]

Az első boltozat típus körívének középpontja a padló magasságában van, ez a boltozat az egyik legveszélyesebb akusztikai formák egyike, mert a középpontban igen erős csörgővisszhangot hoz létre, amely a kupola magasságának függvényében többszörös visszhangba mehet át.

A középpontból távolodva egyre inkább olyan térbe jutunk, mely a csörgővisszhangtól nem veszélyeztet. A 16/a ábrán vázolt esetben a szerkesztés arról a szélső helyről indul, ahová még második visszaverődés után visszaérkezik hang, ennél külsőbb pontból már a harmadik útrészlet megtétele után az

oldalfalakra verődne. A fent vázolt esetben az ötödik visszhangút vezet az oldalfalhoz. Az egyetlen erősen hallható visszhang útja pedig:

$$s \approx 4h$$

Összegezve tehát a visszhangot úgy érezzük mintha egy kétszeres magasságú síkfelületű mennyezetről verődött volna vissza, és a középén hallható csörgővisszhang, meg az aszimmetrikusan jelentkező egyszerű visszhang akkor tapasztalható legerősebben, ha az oldalfalak nagy csillapításúak, vagy hiányoznak.

A 16\i b ábrán megfigyelhető boltozat középpontja a padlózat alatt van ($r=4h/3$), ennek következtében a középponti csörgővisszhang ugyan olyan, mint a már említett esetben, ezúttal a szélső pontokból induló felfelé irányuló hangsugarak között van olyan is, mely többszöri visszaverődés után önmagába érkezik vissza, tehát csörgővisszhang keletkezik. A visszhangút ebben az esetben tehát:

$$s \approx 6h$$

Illetve ennek egész számú többszöröse, hisz csörgővisszhangról van szó.

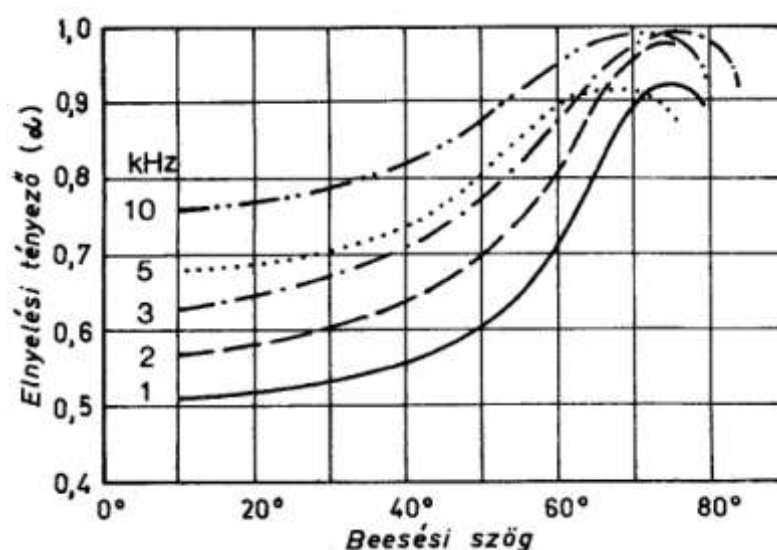
A 16\i c ábrán a kupola $r=2h$ görbületi sugarú, tehát parabolahatású. A csörgővisszhang a középpontban természetesen itt is tapasztalható, emelet érdekesség még, hogy minden páros visszaérkezéskor erősebb visszhang keletkezik. A középpontban a gyengébb visszhangok elmaradnak, a beérkezés periódusa kétszeres lesz távolodva a felfelé irányuló hang négy visszaverődés után önmagába visszatérve:

$$s \approx 8h$$

Magasságnak megfelelő út megtétele után jut az eredeti helyére vissza. Az itt említett, példák csörgővisszhangra vonatkoznak, de hasonló hatást okozhat a sorozatvisszhang is.

3.2.2 VISSZAVERŐDÉS ELNYELŐ ANYAGOKRÓL, KÖZÖNSÉG HATÁSAI

Mint már láthattuk a közönség elnyelő képességének jelentős szerepe van abban, hogy egy teremben kialakul-e mennyezet – padló irányú csörgővisszhang. Ez az elnyelési tényező vizsgálatok szerint $\alpha=65^\circ$ és 75° között éri el a legnagyobb értéket, ennél nagyobb szögek esetén az elnyelési tényező értéke rohamosan csökken. Az elnyelési tényező függ még az anyag szerkezetétől, minőségétől és az anyag vastagságától is. [2., 17.]



17. ábra, Elnyelési fok szögfüggvénye lukacsos faros lemez lapokra vonatkozólag.

$$I_v = I_b(1 - \alpha)$$

Az ábrán a farostlemezre vonatkozó elnyelési tényező értékét láthatjuk. Magasabb frekvenciákon nagyobb elnyelés a lukacsos rostos szerkezetével magyarázható, továbbá minél vastagabb az anyag annál nagyobb az alacsonyabb tartományokban az elnyelési tényező.

Ha elnyelési tényező értéke nulla, akkor teljes visszaverődés van, ha pedig egy, akkor nyitott ablakként viselkedik, azaz mindent elnyel.

A közönségre kisszögben érik el a közvetlen hangok, míg a mennyezeti visszaverődések ennél lényegesen nagyobb szögben. Ám a visszavert hullámok

nem csupán meg törnek a felületen, hanem fázisfordulást is elszenvednek, melynek következtében akár teljes kioltás is bekövetkezhet. Ezen hatás csak akkor lesz kisebb, ha az érkező hullám beesési szöge súroló szögtől lényegesen eltér, e hatást felfedezőjéről, **Békésy György** után, *Békésy-effektus*nak nevezték el.

3.3 VISSZHANG SZUBJEKTÍV HATÁSAIRÓL

A hallgatóra zavaróan hat, ha egy hangot elég nagy idő különbséggel, visszaverődve hallunk, ez tehát akusztikai hibának számít. Visszhangok ellen védekezési megoldás lehet a hangvetők és hangterelők alkalmazása, bár azok is visszavert hangokat juttathatnak a hallgatóhoz. A fő különbség a közvetlen és a visszavert hullám között az időkéésben és a csillapodásban rejlik. Az hogy a fül számára melyik jel a hasznos, a visszavert, vagy a közvetlenül direkt úton érkező a hallás sajátságosságaiban leli magyarázatát.

A következőkben ennek a részben fiziológiai, részben pszichológiai jelenségnek néhány részletét láthatjuk.

Az egyszerűség kedvéért a közvetlen hang és egyetlen visszaverődött hang együttes hatását vizsgáljuk. Az kétségtelen, hogy két, egészen rövid időkülönbséggel a fülünkhöz érkező, egyébként azonos magasságú és színű hang egyetlen hangbenyomást kelt. Ám ha a késleltetés meghalad egy bizonyos mértéket, akkor azt már külön hangnak, visszhangnak érzékeljük, ez a határ átlagosan 50 ms. Az, hogy milyen átmenet van a két szélső eset között, **E. Petzold** tanulmányozta az 1920-as években. *Petzold-féle* meghatározás szerint az elmosódási küszöb, amely alatt a hangkép még egységes és zavartalan, de amely fölött elmosódást szenved [1.]:

$$r = 50 \pm 10 \text{ms}$$

Ezen kijelentés után rengeteg kísérlet indult meg a elmosódási küszöb és a visszhangérzet közötti, valamint az egyidejű hangbenyomás és az elmosódási

küszöb közötti időkések hatásának kísérleti vizsgálata csak ezután kezdődött meg. Az elmosódási küszöbértéke **Petzold** szerint, és a kísérleteket később megismétlő **Henry Stumpp** szerint is, erősen függ az elsődleges hangjelenség természetétől, mert beszéd esetén nyilván a legrövidebb mássalhangzók időtartama szabja meg a határ értékét. Bár, amennyiben a rövid mássalhangzók százalékosan kis részt kapnak a szavak felépítésében, a rájuk vonatkozó érthetőségváltozás a szótagérthetőségekre kevésbé hat. Tehát *Petzold-féle elmosódási küszöb* beszédre 64 ms, míg **Stumpp** az azonos irányból érkező visszaverődések esetén 78 ms, ellenkező irányból érkező visszaverődések esetén pedig 50 ms időkést még nem talált veszélyesnek. Ő a kísérleteit, méréseit szabadterben végezte a megfelelő oldalon felállított hangszórókkal.

1. táblázat, *Elmosódási küszöb a közvetlen hang és az első visszhang között H. Stumpp szerint.*

Hangjelenség	Azonos oldal		Ellenkező oldal	
	[m]	[ms]	[m]	[ms]
Beszéd	26,5	78	17	50
Zenekar (jellekép)	27,5	80	16	47
Zenekar (galopp)	34	100	16	47
Vegyes kar (népdal)	34	100	19	56
Fúvózenekar (induló)	36	105	20	59
Vonózenekar (keringő)	41	120	20	59
Vegyes kar (korális)	70	206	28	82

Stumpp mérésében számos probléma akadt ugyanis az időkésltetéshez a hangszórók távolságának megváltoztatásával oldotta meg, ráadásul összesen 5 megfigyelő értékelésére támaszkodott. Ebből adódóan az azonos irányból érkező visszhangok elmosódási küszöb értékre kapott nagy érték visszavezethetők arra, a tényre, hogy azonos idegpályák terhelődnek, tehát a kifáradási jelenség feljebb tolja a küszöböt. Míg ugyanez a akadályozás különböző irányú hangokra nem jön

létre, mert a második hangjel az ellenkező oldali idegpályákon létesít impulzus sorozatot. így már kisebb időkülönbség mellett is zavar. Az eredmények összesítése a 1. táblázatban található.

Zenére **Petzold** jóval kisebb értékeket állapított meg, 35...40 ms. **Stumpp** ismét kitűnik a nagyobb eredményeivel az azonos irányú visszaverődések esetén, a már említett problémák következtében. Általában kétszer akkora elmosódási küszöböt jelez, azonos irányból, mint ellenkező irányból érkező visszhangok esetén. A legszélső értéket kórus műre 200 ms-ban állapította meg, ez már azért természetes, mert általában a kórusművek tempója más művekkel ellentétben jóval lassúbb. A szélsőségeket nem számítva, az értékek közel a fül tehetetlenségi adatai körül mozognak, ami arra mutat, hogy az elmosódási küszöb alatt érkező visszhangok erősítő hatása a fül integráló képességével van összefüggésben.

Az elmosódási küszöb alatti visszaverődések élettani hatása nagy jelentőségű, nemcsak az elsődleges hang erősítésében nyilvánul meg, hanem többek között a hangosságnak, a teremben hallható egyenletesebb eloszlásában és az egyenletes hangszín megteremtésében is. Az és fő egyetlen káros hatás a hangforrás eredeti irányának felismerésének nehézsége lehetne, ez a veszély azonban a későbbi vizsgálatok eredményei szerint nem fenyeget.

Az erősítést természetesen nem elektroakusztikai értelemben kell vennünk, de nem is interferenciás erősítésről van szó, ugyanis az interferenciás erősítés csak fél hullámhossznál kisebb útkülönbségeket enged meg. [1.] Példaként 800 Hz frekvenciájú hangot ($\lambda=24$ cm) véve, a hangforrás mögötti visszaverő felületnek pontosan 12, 36, 50 stb. cm távolságban kellene a hangforrástól lennie, hogy interferenciás erősítést kapuink, ez kiterjedt vagy mozgó hangforrás esetén természetesen lehetetlen, vagyis az interferon erőserősítés, mint magyarázat kizárható. Tudjuk tehát, hogy egy hangforrás mögötti fal kb. 6-7 m távolságban 35...40 ms közötti késleltetés hoz létre, és mindenféle erősségű, frekvenciájú összetételű hang hatását erősíti fülünkben. Az erősítés a fül tehetetlenségi viselkedésével magyarázható. Az inger időtartamának növelésével az idegeken a kritikus idő alatt átfutó összes energiát növeli, és ez a hangosság növeléséhez vezet. Ezen az időtartamon belül a hangimpulzusok úgy adódnak össze mintha azonos időpontban érkeztek volna és már fizikailag összeadódtak volna az

energia-összegeződés törvénye szerint. Későbbi mérések során ezen megállapításokat mások is meg erősítették. A *Haas-félé kísérletek* (1949-51) két impulzusra, míg **Erwin Meyer** és **G. R. Schodder** 1952-ben pedig több visszhangra is igazolták. Ők nem vizsgálták, de feltehetően a kritikus időn belül lejátszódó csörgővisszhangra is igaz. További vizsgálatokkal kimutatták, hogy a tökéletes energiaösszegzés, 3 dB-es szintemelkedés, csak a 10 ms-os határon belül jön létre, a késleltetés növelésével, 50 ms környékén ez a hatás csökken, majd elmosódik. Ugyanakkor két impulzus századrész ekkora idő alatt is lehetséges megfigyelhető, csörgővisszhang.

Elő fordulhat az is, hogy a kritikus időn belül több impulzuserősítő hatása meghaladja az energia-összegzés törvényét. Erre a jelenségre **F. Aigner** és **M. J. Strutt**, valamint **E. Lübcke** mutatott rá az 1930-as években. Végül még nem lehet kimondani, hisz az eredmények túl nagy szórással születtek, sőt e jelenség magyarázata sem könnyű. Megfigyelői beszámolókból tudjuk, hogy az erősítő hatás még tovább növekszik, ha az időben eltolódott hangjelek szinképíleg is némileg különböznek egymástól. Zárt termekben mindig ezzel találkozunk, hiszen az egyes elnyelő anyagok frekvencia függése miatt módosul a visszavert hang szinképe a beesőhöz képest. Egy haszna még van a kritikus idő alatt érkező visszaverődéseknek, azaz a *tényleges időtartam-hosszabbodás*. A visszaverődések tehát a rövid idejű hangimpulzusok magassági felismerésében, s ennek következtében elemzésükben is segítséget nyújtanak a hallószervnek.

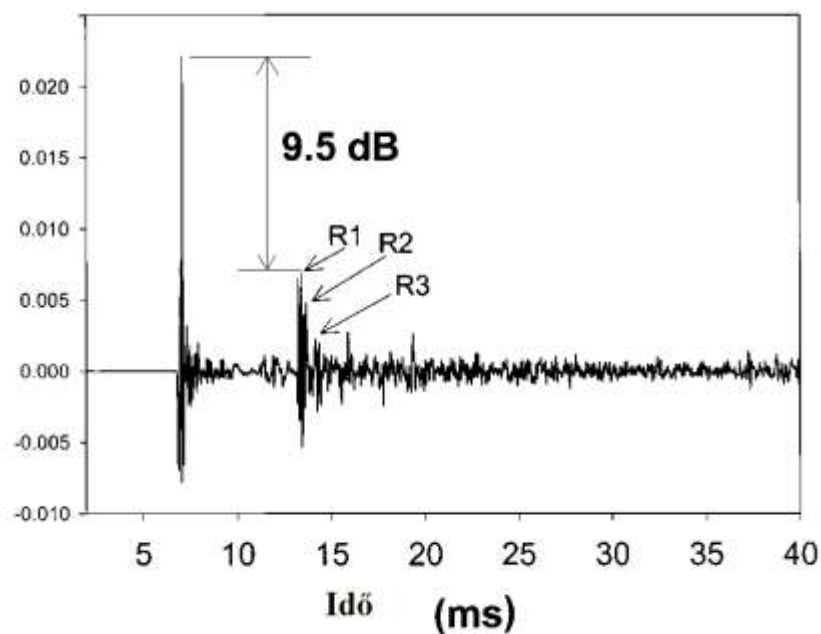
Másik érdekes és már régóta felismert jelenség, hogy ha azonos összetételű hanginformációk esetében az első hangjel (direkt hullám) elnyomja az utána érkezőt (visszhang). E jelenség első megfigyelője **Békésy György** volt 1930-ban, aki akkoriban telefonkábelek zavarjeleit vizsgálta **Békésy Gy.** és, akkor még a később érkező második jel elfedésével magyarázta a jelenséget. Ezek után már több szerző foglalkozott ezzel a pszicho akusztikai jelenséggel, mely hatásnak főként az irányérzet kialakulásában van jelentősége. Mindezek a kísérletek fejhallgatóval folytak, így tehát teremakusztikailag nem volt jelentőségük. **Helmut Haas** volt az első, aki a **Lothar Cremer** által „első hullámfront törvényének” nevezett hatást alaposabb vizsgálat tárgyává tette. Az eredményeket összegezve arra a következtetésre jutott, hogy a második jel

forrásának irányáról semmi információt nem kapunk, ha a késés kisebb 35 ms-nál, még akkor sem, ha a második jel kis mértékben meghaladja hangerőben az elsőt, lényegében az utóelfedésnél is hatékonyabb.[5.] A valóságban sűrűs egymás követően érkeznek a fülünkhöz a visszaverődések, és így az első hullámok okozta benyomás már csak részben módosul. Hosszabb időt egyedül a hangosság, hangmagasság és a hangszín megállapítására kell fordítani, az irány hallás már 1 ms alatt is kialakul.

3.3.1 ELSŐ HULLÁMFRONT TÖRVÉNYE

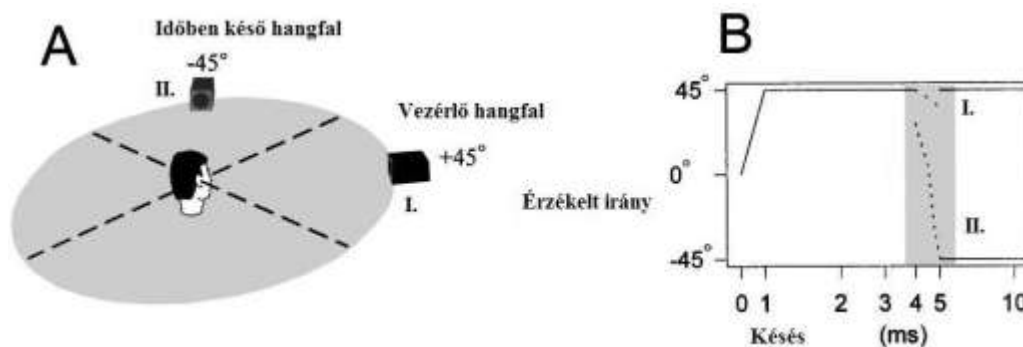
Mint látható volt a jelenséggel már sok kutató foglalkozott ezek közül kiemelendő a **P. M. Zurek** által 1987-ben írt könyv és **J. Blauert** is jelentős műveket írt ezen témakörben.[5]

Az *első hullámfront törvényét* leggyakrabban *precedence effect*-nek is nevezik. Ez a hatás akkor keletkezik, ha egy hangot egy visszhangos teremben hallunk, és a direkt úton érkező hang mellett, a teremre jellemző mértékben késleltetett hang is érkezik a fülbe. A halló rendszerünk egy sajátossága melynek következtében a közvetlen úton érkező hangból nyerjük ki a legtöbb információt a később érkező hangok csak a terem érzettét növelik. **Zurek** és **Blauert** a vizsgálatokat egy tipikus osztályterem méretű helyiségben kezdték meg (körülbelül 6x11m)[5] (18. ábra) . A hangforrás 's' hang volt, egy rövid impulzusszerű időtartamig. Három jellemző utat lehetett figyeltek meg, melyeket R1, R2, és R3 névvel láttak el, 18. ábra. A három út késleltetése 8; 8,5; és 10 ms a közvetlen úton érkező hanghoz képest, de szintbéli csökkenést is megfigyelhető volt hisz nem teljes visszaverődésről beszélünk. Például, az első visszaverődés mely 8 ms-nál fordult elő 9,5 dB-es csillapodást mértek, de e vizsgálat nem volt hibamentes, hisz a teremben más visszhang utak is voltak nagyobb késéssel és nagyobb csillapítással.



18. ábra, 6x11 méteres osztályteremben mért visszhangok.[5.]

A fent említett mérés hibáit kiküszöbölendő sok más vizsgálati eljárást kidolgoztak, melyek közül egy például, az hogy, egy visszhang mentes szobában két hangszórót helyeztek el a megfigyelőtől $\pm 45^\circ$ -ra, egyenlő távolságban és a két hangszóróból változó késleltetéssel szóltak meg, 19. ábra.



19. ábra, Vizsgálati eljárás felépítése.[5.]

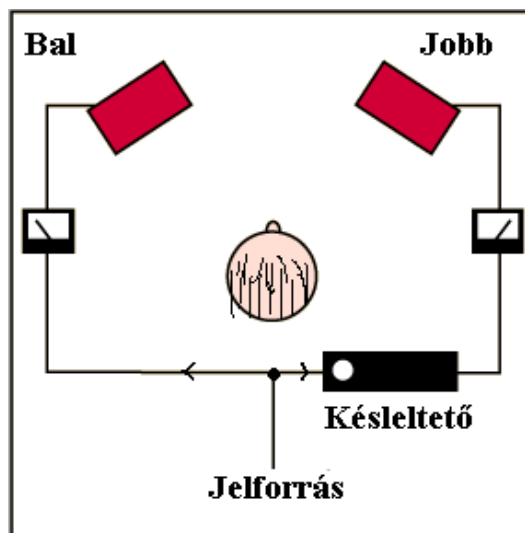
Ha a késés a nulla és a hangszóró egyforma hangerővel szólt, akkor a hallgatók egy egységes hangérzet tapasztaltak. Ahogy a késés növekedet úgy egyre inkább a késedelem nélküli hangszóró irányba tolódott el az irányérzet, mintha hangosabb lett volna, ez a tartomány 1 és 5 ms között volt. Az 5 ms feletti tartományban jól elkülöníthető volt a két hang. Ezt **Blauert** és **Boer** is

alátámasztotta korábbi kísérleteiben.[5.] Az utóbbi évtizedekben sok kísérlet, mérés zajlott a jelenség körül mely, idealizált és valós körülmények között, és mindegyik hasonló eredményekre lyukadt ki.

3.3.2 HAAS-HATÁS

Helmut Haas egyszeri visszaverődés hatását vizsgálta a beszéd megfigyelhetőségére.

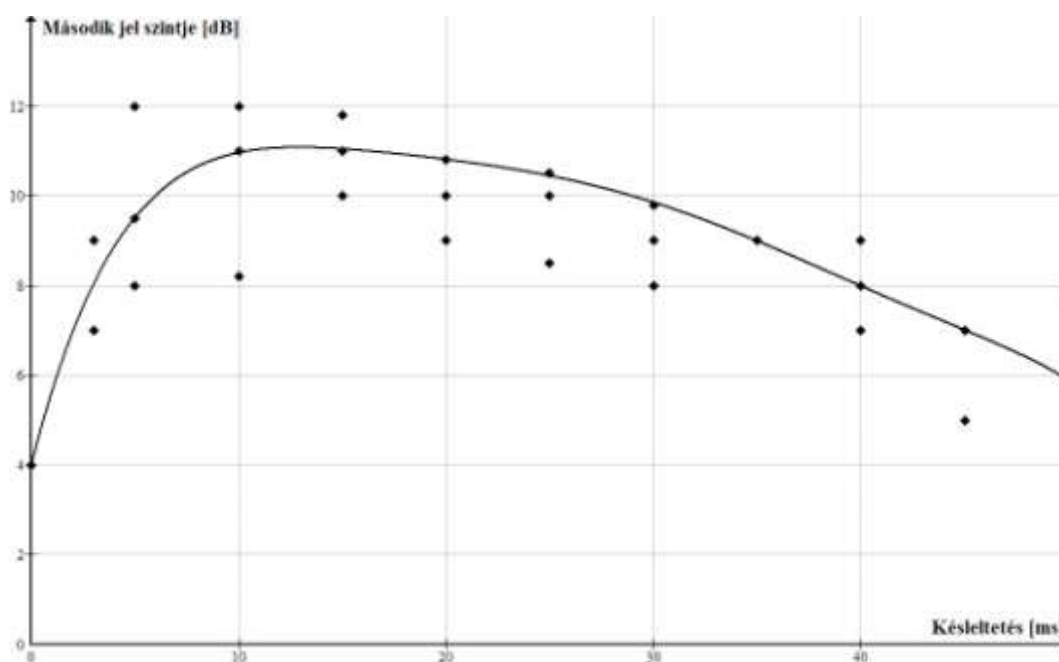
Vizsgálataihoz egy mérő rendszert is kidolgozott, amellyel tetszőleges késleltetésű visszhangot tudott elő állítani, sőt a visszhang intenzitását is állítani lehetett, 20. ábra Az eredményeket nagyszámú (50 – 100 fő) megfigyelő személy ítélete alapján értékelte. Az érthetőség százalékaival jellemzett vizsgálatokat nem találta kielégítőnek, ezért vagy a késleltetett hang észrevételét, vagy a késleltetett hanggal zavart beszéd megzavarásának bejelentését választotta a mérési eljáráshoz.



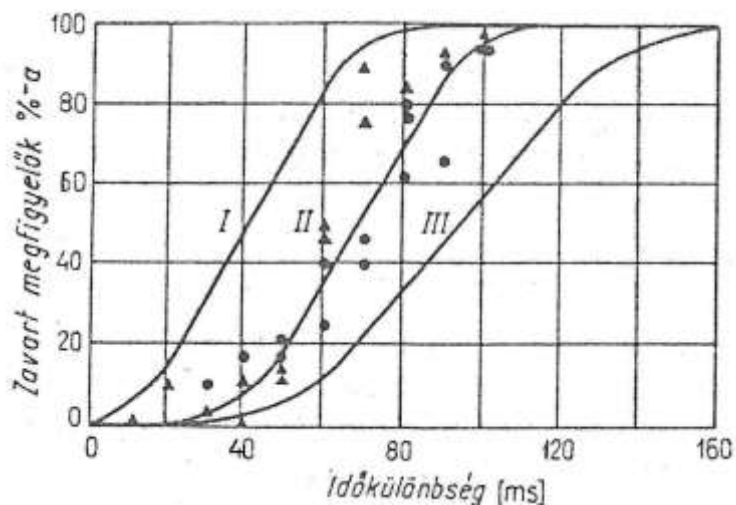
20. ábra, H. Haas által tervezet és használt vizsgáló rendszer vázlata.

A '40-es évek végén íródott mű, azzal a fő megállapítással zárult, hogy 5 és 30 ms közötti időkéés az energia-összeadódás szerinti hangosságnövekedést idézi elő. A hangérzet ezen kívül kellemesebbé vált a legtöbb vizsgált alany

esetében, amit a legtöbb megfigyelő az elsődleges hangforrás megnagyobbodásának érzetében jelölt meg. A második jelet adó hangforrás helyét még akkor sem ismerték fel, ha a jel 10 dB- lel nagyobb intenzitású volt az elsőnél. Ezt szokták általában *Haas-féle effektusnak nevezni*, ennek valóban nagy a gyakorlati jelentősége az kihangosítások minőségének javításában. A 21. ábrán láthatjuk a *Haas-hatás* grafikusan ábrázolva, ahol a vízszintes tengelyen az késleltetés, a függőlegesen pedig a megengedhető szinttöbblet olvasható le. Mint az ábrán is látható, hogy a megfelelő (5...30 ms) időkéseleltetéssel megszólaltatott hangszóró által keltett hangosság az elsődleges hangforrás által a kérdéses helyen létrehozott hangosság kétszeresére lehet fokozni anélkül, hogy a hallgató észrevenné, hogy a második hangszóró is be van kapcsolva. A késleltetett hang észrevétlensége csak jó átviteli karakterisztikájú és minél kisebb torzítású hangszórók esetén áll fenn.



21. ábra, Haas hatás egyszerű ábrázolása, ahol a hallgatók 50%-t nem zavarta a hangintenzitás többlet.



22. ábra, Haas-féle kísérletek egyik diagramja, a zavarás mértéke az idő függvényében.

Haas idejében (1949.) még az akkor legjobb minőségű átviteli rendszerrel dolgozott, a ma már rossz minőségű hangszóróval a 10 dB intenzitásfokozás nem tudott megvalósítani.

Nagyobb késleltetés esetében arra az érdekes következtetésre jutott, hogy egy bizonyos késleltetés felett a vizsgáلتa alanyok 50 %-nak zavaró hatásról számolt be, a beszéd érzékelésében, ezt ő *kritikus időkülönbségnek* nevezte el.

Nagyobb időkésés esetén **Haas** szintén érdekes eredményre jutott. *Kritikus időkülönbségnek* azt az időértéket tekintette, amely az ítéletek 50%-ában „zavaró” beszéd érzékelésében. A kritikus időkülönbség elég élesen definiálható fogalom. A késleltetés folytonos növelésével először nagyobb utózengezés érzet keletkezik, majd a szöveg színezete élesebbé válik. A késleltetés további növelésével kezd határozottá válni minden hang kettősségének az érzése, majd idegesítő, kellemetlen, fárasztó érzés tapasztalható, Haas eredményei szerint. Ez kell „zavarónak” minősítenie a vizsgáلتa alanyoknak, ebben a lépésben nem az a cél, hogy a személy a visszhang különhallásáról, vagy érthetőségéről pontos beszámolót adjon, ugyanis az érthetőség még továbbra is 100%-os lehet megfelelő odafigyelés mellett, ez azonban nagyon kifáraszthatja a hallgatót, ezért nem tartotta helyes vizsgáلتai eljárásnak, ha a érthetőségi méréseken alapszik a mérés. A Haas-féle minősítés során átlag 80 megfigyelőt és 25 mérési pontot vesznek

fel, így kerekén 2000 eredményt jelent egy-egy görbe megszerkesztéséhez. A szórásból (22. *ábra*) látható a módszert elég nagy pontosságúnak kell tartanunk.

A vizsgálatok német nyelven, általában 55 phon hangerővel és 5,3 másodpercenkénti szótagsebességgel folytak egy 0,8 s utózungesű helyiségben. A fő paraméterek a beszédsebesség, a visszhang érkezési iránya és az utózungesi idő voltak.

A *beszédsebességgel* majdnem fordított arányban áll a kritikus időkülönbség. A többi kísérleti körülmény változatlanul tartása mellett 7,4/s szótagsebességhez 40ms 5,3/s szótagsebességhez 68 ms, végül 3,5/s szótagsebességhez 92 ms kritikus idő tartozik, amint ez a 14. *ábrán* éppen látható, ahol a két megfigyelendő jel azonos intenzitás szintű a paraméter a szótagsebesség, jelen esetben: I- 7,4/s; II- 5,3/s; III- 3,5/s.

A kritikus időt természetesen befolyásolja a visszhang erőssége. A 21. *ábra* folytatásaként látható, ha visszhang intenzitását még 5 dB csökkenése nagyjából megkettőzi az időértéket, ha viszont a visszhang a közvetlen hangnál 10... 15 dB-lel kisebb intenzitású, már semmiféle zavaróhatás nem észlelhető folyamatos szöveg közben.

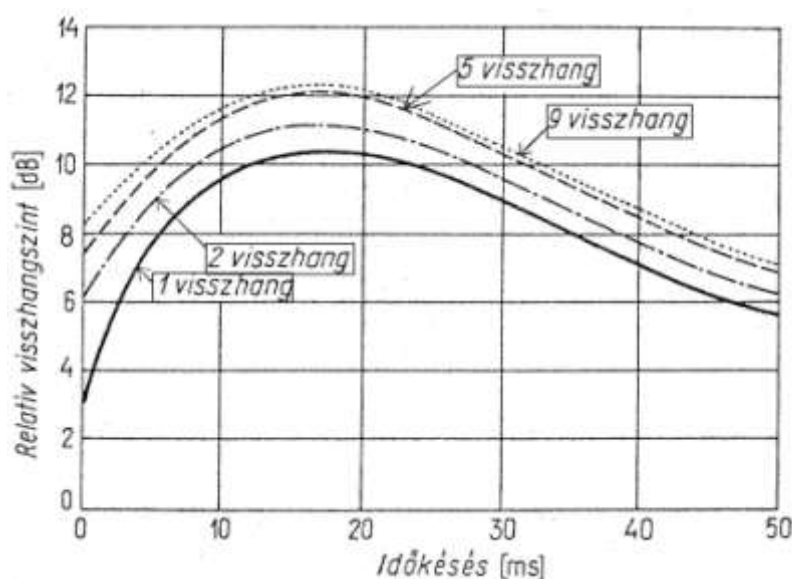
A frekvenciától nem független a jelenség, mert a nagyfrekvenciájú összetevők kiemelkedő jelentőségűek a zavarás szubjektív megítélése szempontjából, ha például a visszhang nagyfrekvenciájú összetevőit csillapítjuk, a kritikus idő lényegesen megnövekszik. Egy 1 kHz-nél kezdődő, 10 kHz-nél 15 dB csillapítású, egyenletesen vágó szűrő a kritikus időt 68 ms-ról 105 ms-ra változtatja.

A *beszéderősségtől független* a hatástól ám a termék akusztikai tulajdonságai befolyásolják a kritikus időt, mégpedig úgy, hogy nagyobb utózungesi idő nagyobb időkülönbséget enged meg. Például egy zenetermi, 1,6 s utózungesi idő mellett 78 ms-ra növekszik, süketszobában 45 ms-ra csökken a kritikus idő, ez érthető, mert hosszabb utózunges jobban elmosza a különbséget két egymás utáni követő jel között.

A kritikusidőt nem befolyásolja a visszaverődés iránya tehát az a tény, hogy a közvetlen hang a megfigyelőnek szemből érkezik-e vagy sem. Ezek szerint a hangosításra szánt hangszórókat a beszórandó terület oldalán vagy hátul

is el lehet helyezni, amivel a hátsó visszaverődések erősítő hatását lehet utánozni úgy, hogy a nézőtér többi részét a mesterséges hang egyáltalán nem érinti, akárcsak a klasszikus hangterelő hagyományos megoldásoknál. Ilyen rendszerek esetén a hangszóró jelét azonban megfelelően késleltetni kell azért, mert a közvetlen hang a levegőn keresztül lassabban ér oda, mint az erősített hang a huzalon, másodszor azért, mert a *Haas-effektus* csak a visszhang 10 ms késése esetén jelentkezik. A késleltetés egyik régi megvalósítási módja volt végtelenített szalag, amelyről több időkésés is levehető, ma már ezt digitális késleltetővel lehet olcsón és jó minőségben megvalósítani

A visszhang észrevehetőség nagyobb szinten jelentkezik, mint a zavaró hatása. Például beszédre és egyszerű visszhangra, feltétel, hogy mindkét jel szemből érkezzen 20 ms késés esetén -20dB, 40 ms késleltetés esetén pedig -32 dB a „takarási határ”. A meredekség kb. 0,5 dB/ms körüli. De másképp alakul a helyzet, ha a visszhang 45°-os irányból érkezik, ugyanis ebből az irányból sokkal érzékenyebb az agyunk, de zenében is másképp alakul a hatás.



23. ábra, Haas kísérleteihez hasonló vizsgálatok eredményei, itt a Meyer és Schodder görbék.

Zene esetében kevésbé vagyunk érzékenyek a visszaverődésekre, és a késleltetésekkel sem olyan meredeken esik a görbe, mint beszéd esetén.

Az első olyan akusztikai rendszert, ahol a *Haas-féle hatást* kihasználták, a londoni *Szent Pál katedrálisban* állította fel, **P. H. Parkin** és **J. M. Taylor** közreműködésével. A londoni rendszerhez hasonlót helyeztek üzembe 1960-as évek Moszkvában a *Krimi kongresszusi termében*, azóta már világszerte elterjedt főként olyan helyiségekben melyek több célra lettek építve.

A *Haas-féle hatást* már sokan több féleképpen ellenőrizték, sőt még bővítették, is mint például **Muncey**, **Nickson** és **Dubout** Ausztráliában zenei hangokra vagy **Meyer** és **Schodder** *Göttingában* többszörös visszaverődésekre terjesztette ki a vizsgálatokat. Az utóbbiban **Haas** értékelési módszerétől eltérőt használtak, ugyanis éppen azt kellett megmondania, hogy mikor hallja a közvetlen és a visszavert hangot ugyanolyan hangosnak. Ezen eljárás egyszerű visszhang esetén jól megegyeztet **Haas** eredményeivel, csak a kis késési időknél a görbe kevésbé meredeken indul el. Több, egymás után 2,5 ms időközben következő visszhang vizsgálati eredményét a 23. ábrán látható. Az ábrán intenzitás-többlet, amely mellett a visszhangsorozat az idői függvényében a közvetlen hanggal azonos hangosságúnak tűnik. Új eredmény a **Haas** eredeti vizsgálatait után, hogy több egymás utáni visszhang esetén még nagyobb intenzitás-növekedést viselünk el akusztikai zavaró hatás nélkül, mint amennyit egyetlen visszhangra megállapított **Haas**. [1.]

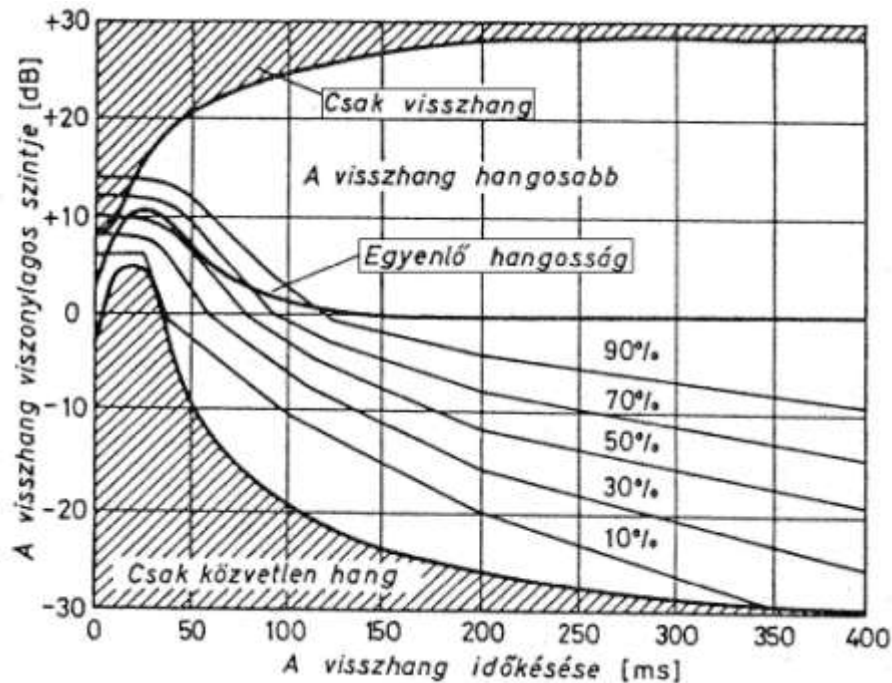
3.3.3 AZ IDŐKÉSÉS RETESZ és JELENTŐSÉGE

A fenti kísérletek gyakorlati értékesítése nagyban azon múlik, hogy a hallgatók hány százalékát tekintjük kritikus mennyiségnek. Semmi esetre sem lehet elfogadhatjuk az 50%-os ítélethez tartozó értékek gyakorlatba vételét, mert nagyon rossz akusztikai körülménynek kell tartanunk a közönség 50%-át zavaró hatás éri. **R. H. Bolt** és **P. E. Doak** görbesereget szerkesztett a különféle zavarási százalék és visszhangok időkésés szerinti relatív intenzitásának szemléltetésére. [1.] Ezt a görbesereget a 24. ábrán láthatjuk. Egyesek szerint a

görbék nem elég pontosak, túl nagy az eltérés a valóságtól, mégis jó kiindulás volt a további meggondolásokhoz később **E. Meyer** és **H. Kuttruff** a határgörbét adta meg, melyek a 16. ábrán szintén láthatók. Az alsó határgörbe alatt a közvetlen direkt hanghullám teljesen elfedi a visszhangot, a felső görbe fölött pedig éppen fordítva van. Az egyenlő hangossággal észlelhető visszhang és közvetlen hang görbe 50 ms-ig megegyezik a *Haas féle* középértékkel és a *Bolt-* és *Doak-féle* 50%-os értékkel, viszont onnantól kezdve a 0 dB vonalhoz közelít, vagyis 100 ms-nál nagyobb késés esetén a két azonos intenzitású hangot egyúttal azonos hangosságúnak érzékelünk.

A 24. ábra legfontosabb szakasza 5 és 32 ms között van ugyanis ebben a tartományban még nulla relatív intenzitásszint esetén sem észlelhető a visszhang, ezen pont optimuma 18...20 ms között található.

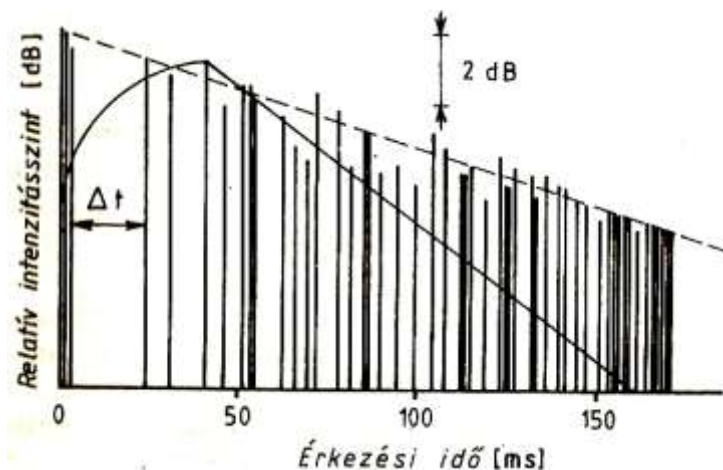
Egy terembe a hallgató fülét mindig a hangforrás közvetlen hangja éri először, utána folyamatosan érkeznek be az impulzusok a terem oldalfalairól, mennyezettéről, sőt még lehetséges a padlóról is és a közvetlen hang és az első visszaverődött hang között a terem méreteitől és időkésés tapasztalható továbbá szerepet játszik az a tény is, hogy a teremben hol helyezkedik el a hangforrás. A további visszaverődések mind sűrűbben követik egymást, majd teljesen összefolynak.



24. ábra, Több kísérlet közös ábrázolása a visszaverődések valóságos hatásairól.[1.]

Egy terem akusztikai tulajdonságairól képet kaphatunk úgy is, ha mérjük a közvetlen hang és az első visszavert hang között eltelt idő különbséget. Ezt a mennyiséget kezdeti időkésezés retesznek vagy röviden *időkésezés retesznek* (Δt) nevezzük.

Az első 5 ms-on belül érkező visszhangot nem számítjuk be a reteszbe, ugyanis ha például a hangforrás vagy a hallgató a faltól 1 m távolságban helyezkedik el, a közvetlen hangot rögtön egy visszaverődés követi, amit azonban még a közvetlen hanggal együtt érzékelünk (25. ábra.).



25. ábra, Terem egy pontjában mért impulzus sorozat, ahol a Δt , az időközös retesz.

Az *időközös retesz* tehát jól meghatározott fogalom, egyszerű szerkesztéssel meg is határozható, csak arra kell vigyázni, hogy a teremben elfoglalt közönséget is vegyük figyelembe, mivel a közönség elnyelő felület.

Terem akusztikájáról már az ilyen egyszerű mérésekkel is meghatározható hogy milyen jellegű teremmel van dolgunk. Az utózungési idő és más akusztikai paraméterek szintén befolyásollak ítéletünket, de talán nem ilyen jelentősen. Tehát az *időközös retesz*nek fontos szerepe van a térérzet kialakulásában.

Egy jó teremakusztikájú helyiség kialakításában nem lehet figyelmen kívül hagyni a visszaverődéseket, hisz fontos szerepük van az egyenletes hangerősség- és hangszíneloszlásban. Fő feladatuk, a visszhangoknak és a időközös retesz, teremérzet és az elsődleges hangbenyomás kialakulásánál van és további korszerű teremakusztikai fogalmak közül a hangtisztasággal is szoros kapcsolatban állnak. A *Haas-féle* kísérletek tisztázták az elsődleges hang irányhatásának uralkodó jellegét is.

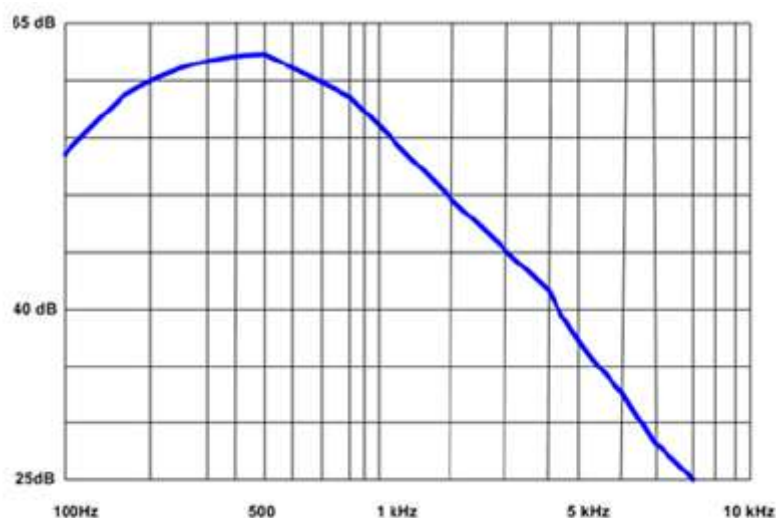
Ugyanakkor a visszhangok a legnagyobb terem akusztikai hibák forrásai is, ám visszaverődések nélkül nem létezne interferencia és teremhang sem. A rossz visszaverődések következménye lehet még az egyenlőtlen energiaellátottság.

Összegezve ugyan az ami egy termet akusztikailag jobbá teszi ugyan az el is ronthatja. Valójában a teremakusztika egyik legfontosabb tényezőjével állunk szemben, amelyet sem elhanyagolni, sem figyelmen kívül hagyni nem szabad.

3.3.4 BESZÉDÉRTHETŐSÉG

A normális beszéd szintje között 55 és 65 dB-nél körülbelül 1 méterre a hangsugárzótól. Ha a beszéd szintje kb 30 dB, akkor suttogva vagy, amikor 90dB-lel beszélünk akkor már kiabálásnak mondható. Meg kell jegyezni, hogy ha meghaladja a 75 dB-t az emberi beszéd nehezebben érthető.

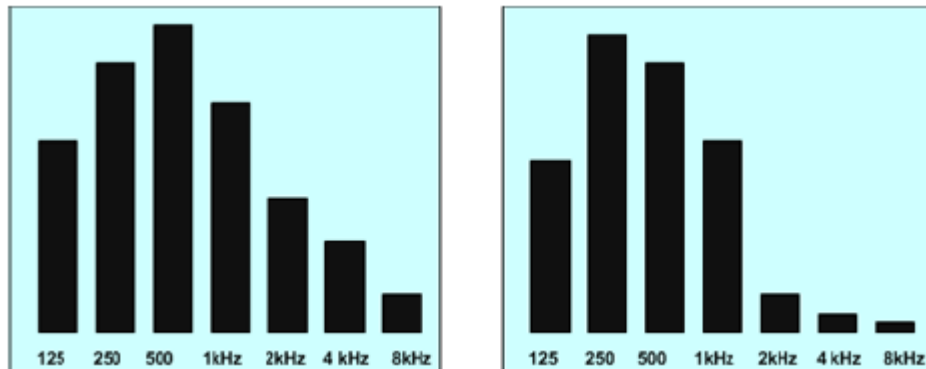
Az emberi beszéd alap harmonikusa általában 100-400 Hz-es tartományba esik. A férfiak esetében ez átlagosan 100 Hz-es, míg a nők átlagosan közel 200 Hz-re (26. ábra). A más-más rezonáns tulajdonságok miatt különböző szintű harmonikus tartalom jelenik meg az alaphang mellett. Szavakat vagy mondáinkat mássalhangzókból és magánhangzókból épülnek fel, melyek közül az egyénre legjellemzőbb a magánhangzó.



26. ábra, Általános emberi ének spektruma.

Hangenergia szintjét elsősorban a hosszabb időtartamú magánhangzóban összpontosul kb 30-300 ms. Szó felismerése, érthetősége leginkább a rövid ideig tartó mássalhangzó határozza meg, csak 10-100 ms. Mássalhangzó hangok gyors hangok időtartama, nemileg hasonló impulzusokat, vagy a zaj előállító magasabb hang frekvencia tartományban a 2 kHz-től 9 kHz. Mivel a mássalhangzó hangok gyorsabb, sokkal alacsonyabb zajszint (10-30 dB) és elfoglalják a magasabb frekvenciájú sávokban, ok is a legnehezebb hallani és felismerni.

Az ügyet bonyolítja az a tény, hogy a kimondott hangok növekedésével csökken a frekvencia tartalom különböző arányban. (27. ábra)

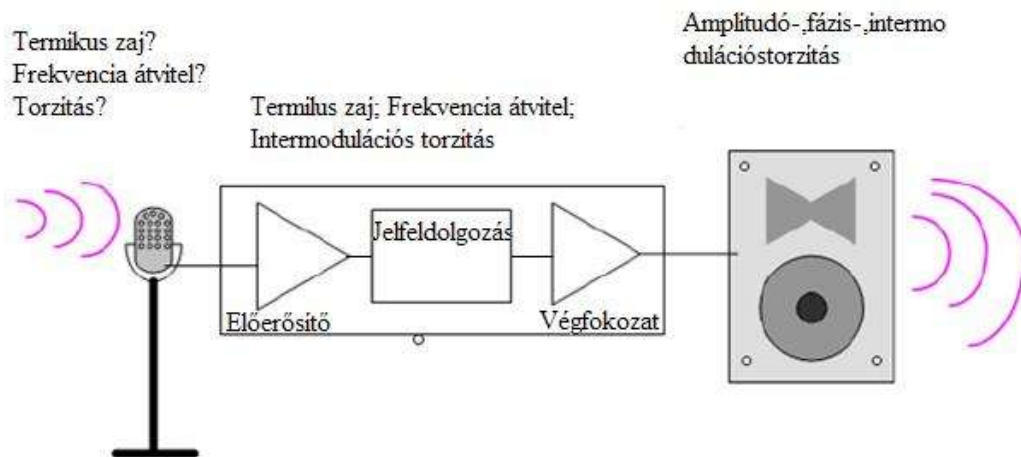


27. ábra, Beszéd felbontva oktáv sávokra és az egyes sávok gyakorisága 0,2 és 12 s időtartamban

3.3.4.1 Beszédmegértés megőrzéséről

Bár a hallás pontos mechanizmusát, a fül-agy kommunikációt, soha nem lehet teljesen megérteni, számos tényező ismerünk, amik befolyásolják azt. Talán a beszédmegértés legjobban az segíti, hogy miként lehet megőrizni, először is, a beszédmegértés megőrzése szempontjából spektrális energia-, és szint gyakoriságának és tartalmának megőrzése elengedhetetlen. Másodszor, a beszéd mellett más hangok vagy zaj is érkezik a fülbe. Végül, egy szobában a visszhang is okozhat nehézségeket hisz késleltetve, csillapítva jut el hozzánk a hang.

Megőrizve a frekvencia vagy spektrális tartalma beszéd fontos, ha megbízható rendszerek használják. A mikrofonok, az erősítők és a hangszórók széles sávúnak kell lenni. Jó a rendszer beszédérthetőség szempontjából ha a frekvencia tartománya 80Hz 10 kHz között van, ilyenkor a mássalhangzó felismerés jó nagy. Egy keskenyebb sáv szélességben (pl.:2kHz) az „f” és „s” vagy „d” és „t” hangok könnyen összekeverhetők. Természetesen ha ez egy ki hangosító rendszeren keresztül történik fontos a rendszer linearitása és frekvencia menete. (28. ábra)

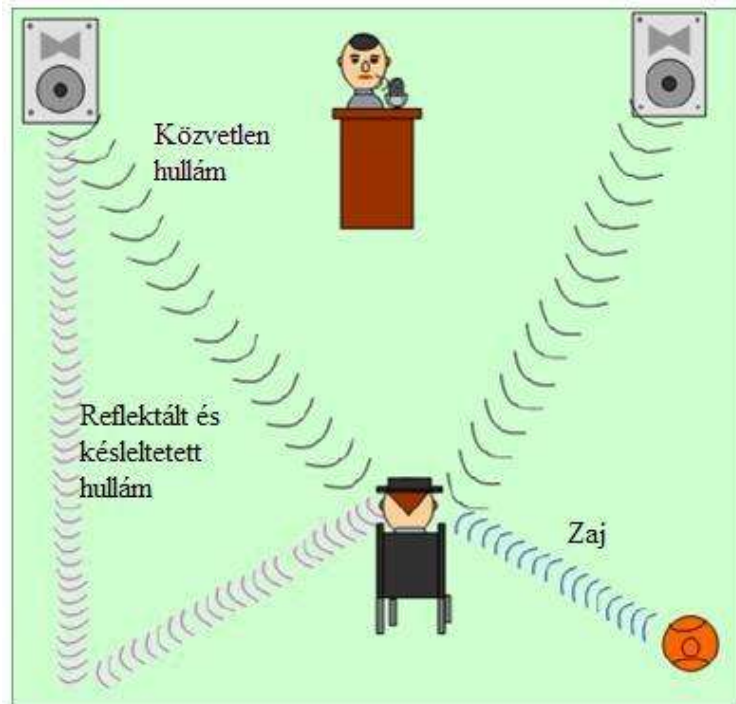


28. ábra, Hangosítás során fellépő torzítások, és problémák.

Megőrizve a frekvenciát, vagy spektrális tartalom megköveteli, hogy torzulások egy elenyésző mennyiség alatt legyenek.

Valamilyen torzítás, vagy intermodulációs torzulás (IM) termékek keletkezését eredményezik és keveredve az eredeti jellel, olyan összetevőket eredményez mely nem tartalmat az eredeti jel. Ezen termékek megjelenésével a spektrum kép meg változik így csökken a beszéd érthetőség. Mikrofonok és erősítők hajlamosak túlvezérelhetőségre, és a magasabb hangerejű szintek néhány hangszóró esetében előállítják a IM-t. Valószínűleg a legnagyobb fenyegetést beszéd megértésre a zajok vagy másik hangok, amik késleltetve érik el a hallgatót, jelentik a legnagyobb veszélyt. Zajok lehetnek szobából, a tömeg, elektronikus rendszer stb. A hozzáadott hangokat, amiket a hallgató az adott pozícióban hall, a halló rendszerünk nem képes teljesen elkülöníteni egy adott tartományon belül. Az összeg, a zajszint, és gyakorisága tartalma zaj, súlyossága határozza meg, amelyet jel-zaj viszonyban (dB) fejezzük ki.

Jellegzetesen, a beszédhang bizonyára 12 dB hangosabban, mint a zaj és akkor jó a beszédérthetőség. Tanulnivaló mutatta, hogy 2-3 reflektált hang épp annyi zavart okoz, mint szélessávú zaj.



29. ábra, Egy ábra hogy mi akadályozza a beszédérthetőséget egy teremben

Hasonlóan nehezíti a beszédmegértést a zengő hatásait a szobában, vagy zárt térben (29. ábra). Visszaverődések okán ugyanaz a hang többször éri el a hallgatót különféle késleltetéssel. Rövid késések, kevesebb, mint 50 ms, valóban fokozza beszéd észlelését. Hosszabb késés oka alapvetően késleltetett hang a közvetlen hang összessége. Nagymértékben katedrálisok vagy a sport arénák minden szögből, amely nagyon romboló hatású a beszédmegértésre.

3.3.4.2 Beszédérthetőségét méréséről röviden

Bár a tárgyalás egy összetett kérdés, az hogy képes meghallgatni és megérteni a beszédet egy hangszórón vagy a hangrendszer egy adott beállítása mellett statisztikailag kell osztályozni. Általában két eljárást különböztetnek meg a beszéd érthetőség vizsgálatára:

- a. Ember alapú tesztelés
- b. Elektronikus teszt alapú

a. Emberi tesztelés

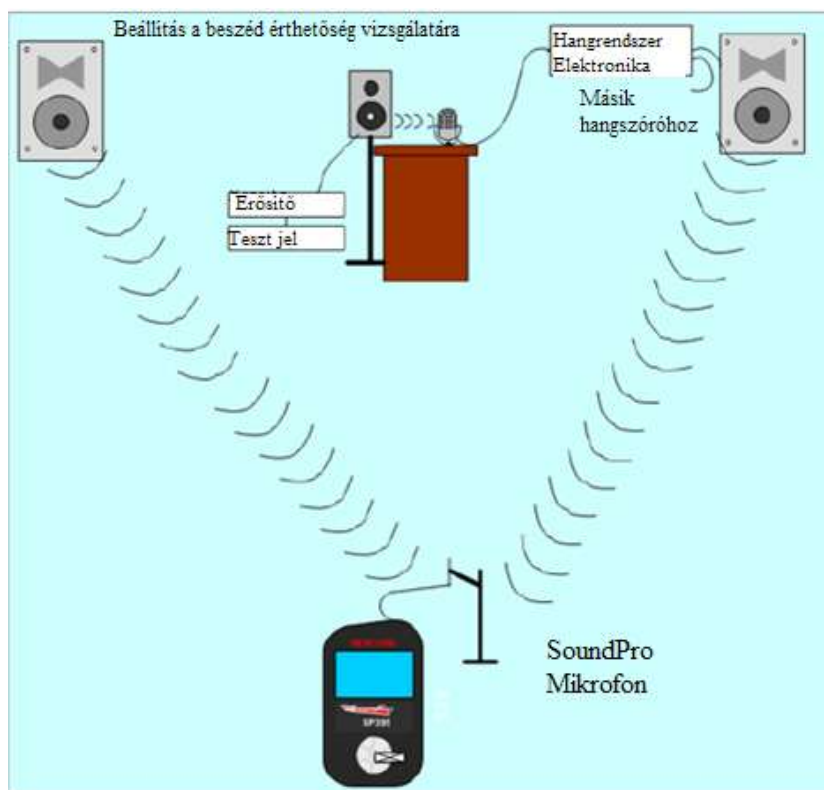
Az emberi alapú tesztelés esetén a hallgatóknak speciálisan összeválogatott beszéd mintákat hallanak egy hangrendszeren keresztül, és beszámolnak milyen a szavakat és mondatokat hallanak meg, statisztikailag összegzik az eredményeket. Legpontosabb mérésekhez, az emberi tesztelés nem célszerű mert drága és időigényes. Egy másik hiba még e vizsgálatok esetén, hogy a beszéd és a zene akusztikai tulajdonságai nem azonosak, ezért az ilyen vizsgálatok esetén arról nem kapunk tájékoztatást, hogy a terem hogyan viselkedik zenei célra. Ezek ellen dolgozták ki azt az eljárást, mely során a hallgatók, akik az adott teremben foglalnak helyet, leledzik az éppen hallott, szöveget. A szöveg felépítése a nyelvre jellemző, megfelelően tagolt, egyébként értelmetlen szótagokból összeállított sorozat. Az eredmények összegzése után, jelen esetben, megkapjuk a szótagérthetőséget.

b. Elektronikus teszt alapú

Az elektronikus tesztelés kínál egy lehetséges alternatívát az emberi beszéd alapú érthetőségének tesztelésre. Elektronikus tesztelés azzal jár, hogy hangenergiát egy zárt térben és elemezni kell még a szoba zaját és/vagy reflexióit a hang mintára. Mivel a zajok és a visszaverődések miatt a beszéd még érthető csak az elektronikai mérések által lehet egy teremre jellemző mennyiséget megadni, amely független az emberi tényezőtől. Az elektromos beszédérthetőség mérés sokat fejlődött az utóbbi időben. Bár sok vizsgálati módszereket használunk a múltban, jelenleg három terjedt el a világban, a beszéd érthetőség vizsgálatára. Az alábbi három:

1. ALCONS % (Mássalhangzók százalék Artikuláció Vesztesége)
2. RASTI (Lendületes Beszéd Transzmissziós Index)
3. STI-PA (Beszéd Transzmissziós Index hangosító berendezésekre)

Elektronikus tesztelés egyre gyakoribbá vált. A Sencore SP395 SoundPro mindhárom mérési eljárást el tudja végezni, a legnépszerűbbeket is, RASTI-t és a STI-PA-t.



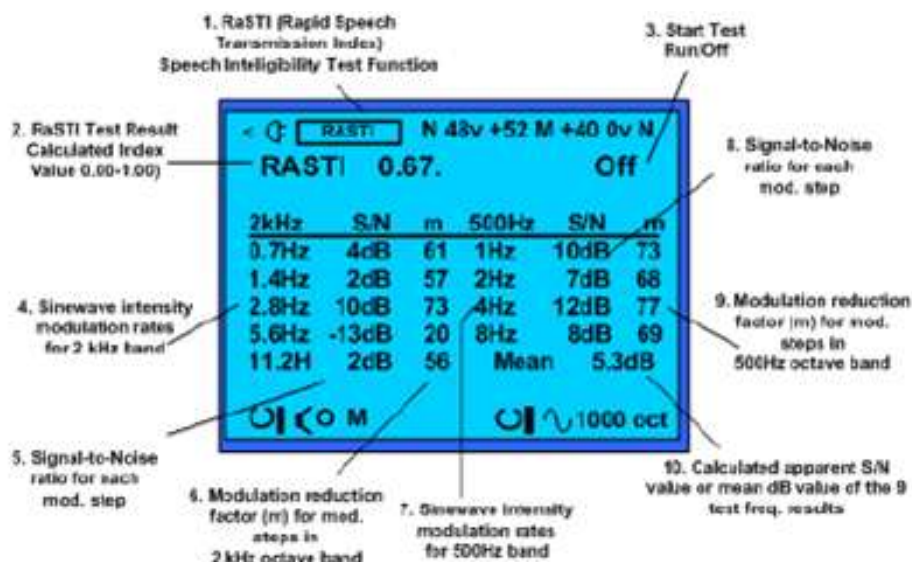
30. ábra, Beállítás a beszéd érthetőség vizsgálatára SoundPro-val

A beszédérthetőség – RASTI

Rapid Speech Transmission Index (RASTI) kínál egy egyszerű, kevésbé időigényes megközelítés beszéd érthetőség mérésre. RASTI kiszámítja index értékét (0,00-1,00. és 1,00 alatt tökéletes érthetőség) összehasonlít 9 modulációjú görbét, négyet a 500 Hz-es és ötöt 2 kHz-s oktáv sávban. RASTI mérésekhez használni kell egy közvetítőt, hogy kibocsássák az összetett jelzést, 9 modulációjú hullám, és egy elválasztott átvevőt és egy külön vevőt, amely elemzi a hullámokat. A SoundPro elemzi egy standard RaSTI kísérleti jelzés eredményeit, amit egy CD.-en szolgáltatnak neki. Az eljárásban, egy erősítő és hangfalak játszik szerepet, a “ beszélő ” pozíciójába egy hangszóró, és a “ hallgató ” pozícióban a SoundPro

mikrofon kerül. A RaSTI-at kísérleti hullámformát egy Cd-ről vagy másik forrásból lejátszásra kerül, és a SoundPro RASTI elemző funkcióval elemzi. Miután második vizsgálat lefutott, a képernyőn mutatja az eredményeket, és leolvasható a RASTI érték közvetlenül.

Lásd asztalt mutató ezeknek a teszteknek, eredményeinek RaSTI mért értékei és egy összefoglalása.



31. ábra, A SoundPro műszer kijelzője RASTI beszédérthetőség mérésre.

1.	Mérési módszer kijelzése RASTI
2.	Számolt index
3.	Teszt indítása Run/Off
4.	Színusz hullám modulációjának intenzitása 2 kHz-re vonatkozik
5.	Jel-zaj viszony az adott lépésben
6.	Modulációs redukciós tényező a 2 kHz-es oktávsváiban
7.	Színusz hullám modulációjának intenzitása 500 Hz-re vonatkozik
8.	Jel-zaj viszony az adott lépésben
9.	Modulációs redukciós tényező az 500 Hz-es oktávsváiban
10.	Számított látszólagos S / N érték

RASTI lépések:

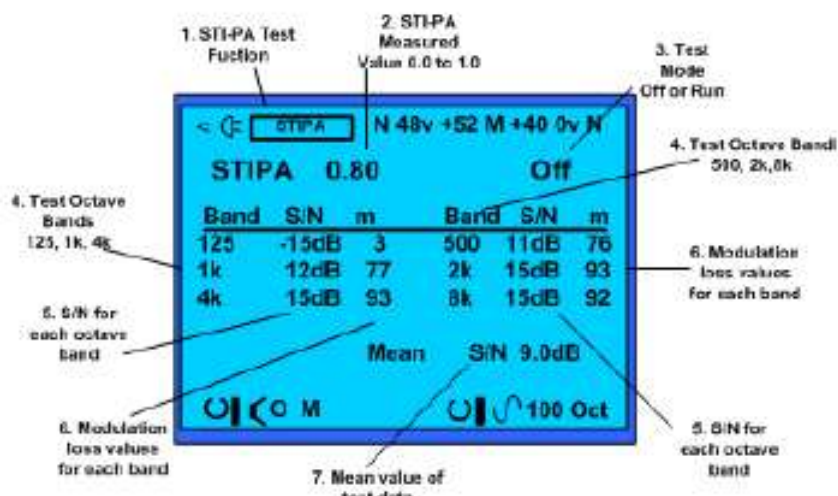
1. Használatához kell egy erősítő hangszórókkal egy CD lejátszó, és hozzá a RASTI teszt CD
2. Mikrofont beállítjuk "hallgató" helyzetbe egy állványon, ha lehetséges.
3. Az SPL funkcióval beállítjuk a megfelelő jelszintet, általában a normál emberi beszéd tartományába, 75-80 dB.
4. Ma már a legtöbb műszer tud RASTI mérést végezni, így a mérés néhány gombnyomással el végezhető. Így néhány másodperc alatt meg van az eredmény.

A beszéd érthetőségének eredményeiről

Tapasztalatok és mérések alapján azt mondhatjuk, ha az eredmény 0,2 és 0,4 között van akkor rossz, ha 0,4-0,6 között közepes 0,65 felett pedig jó értéket kaptunk.

A beszéd érthetőség – STI-PA

STI-PA rendszer annyiban különbözik, hogy nagyobb frekvenciasávot ível át a 125 Hz és 8 kHz oktáv sávok mindegyikét használja. Ám ennek a mérési eljárásnak nagyobb időtartam kell, 15 mp. A mérés lépései szinte ugyan azok, mint a RASTI esetében.



32. ábra, SoundPro műszer STI-PA mérési képernyője.

1.	Mérési módszer kijelzése STI-PA
2.	Mért érték
3.	Teszt indítása Run/Off
4.	Tesztelt oktávsvág
5.	Jel-zaj viszony az egyes sávokban
6.	Moduláció veszteség értékek egyes sávokban
7.	Vizsgált adatok átlag értékei

Összegzés:

Az elektronikus beszéd érthetőségét vizsgálatok segítségével eldönthessük szobák és hangosító rendszerek megfelelőségét az ügyben, hogy beszédérthetőség szempontjából milyen rendszerről van szó. Mérésekkel pontosan számszerűsíteni lehet a működő rendszer teljesítményét és a hangosítás minőségét beszéd átvitel szempontjából.

3.4 NÉHÁNY OBJEKTÍV PARAMÉTER

A teremakusztika világában sokáig gond volt, hogy csak szubjektív megítélés alapján hoztak meg egy döntést a terem akusztikájáról, ez másképpen hangtetszetősség. Ezzel szemben az objektív paraméterek (2. táblázat) segítségével részletes képet kaphatunk a terem akusztikájáról, sőt akár teljesen más feladatra szánt helyiségek is összehasonlíthatóvá válnak.[2.]

2. táblázat, Objektív teremakusztikai paraméterek.

Megnevezés	Jelölés
Utózengési idő	T_u
Kezdeti elhallási idő	T_{-10}
Felnövekedési idő	τ_{-3}
Diffúzitási fok	D
Íránydiffúzitás	d
Hangerősségi fok	γ
Hangerősségi szint	L_γ
Hangtisztasági fok	h
Visszhang fok	$\epsilon; \epsilon'$
Térbenyomási szint	L_R
Jel-zaj viszony	S/N
Oldaltényező	l

3.4.1 HANGIM PULZUS IDŐFOLYAMATA

Ha zárt térben rövid idejű hanglökést keltünk, a közvetlen hang hullámhomlok után megfelelő visszaverődő hanghullámhomlok-sorozata éri a megfigyelőt. Ezen elsődleges visszaverődések idejét a terem kialakítása és a legközelebbi falfelület is befolyásolja. Átlagos teremméreteket figyelembe véve, a visszavert hullám késése nem több 5... 10 ms-nál. Ez után a visszaverődések után, olyan sorozata következik be, amelyeket az oldalfalak és a mennyezet távolsága szab meg, ez átlagosan 20... 50 ms. Előfordulhat, hogy ezek után már nem érkezik vissza verődés, de általában a hátsó falról visszavert hullám már ekkorra szintén eléri a megfigyelő pontot. Tehát az első, úgynevezett hullámszünet, mindig megfigyelhető, de a második csak adott helyen és adott körülmények között figyelhető meg.

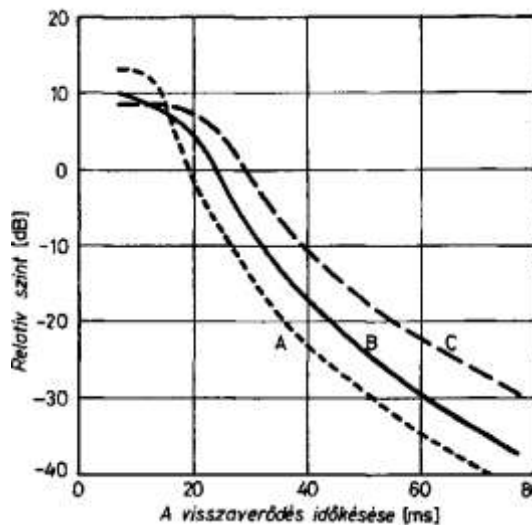
Egy terem helyes akusztika kialakításához a második szünetet lehetőleg meg kell szüntetni, míg az első minél rövidebbre kell szorítani. A korai visszaverődések időzítése tehát nagyban befolyásolja a teremről alkotott képet, ez főként stúdiókban használható ki, mert a hallgató éppen ennek alapján ítéli meg a felvevő helyiség „akusztikai tulajdonságait”. A késleltetett első visszaverődés nagyobb terem érzetét kelti.

Ám fontos megemlíteni, hogy az oldalirányú visszaverődések nemcsak időbeli alakulásukban, hanem irányhatásukban is jelentősen befolyásolják a teremérzetet. Egyes újabb objektív paraméterek bevezetése éppen ezen a tényen alapszik. Ilyen új paraméter pl.: az „oldalhatás” (Lateral Efficiency).

Figyelembe véve még az adott hangok intenzitásszintjét legtöbb esetben a közvetlen hang a legnagyobb szintű és az első hullámsorozat 2...8 dB a szintcsökkenéssel követi, de egy visszhang, a környezettől függően, akár 6 dB- lel is kiemelkedhet. Ennek ellenére a hang érzet kisimul a hallórendszerünk integráló hatásának köszönhetően. Ám az első 40 ms alatt érkező hangjelekre a Haas-hatás is érvényes, vagyis még akkor sem bomlik meg a közvetlen hangérzet, ha a későbbi impulzusok némelyike a közvetlen hangnál nagyobb intenzitású.

Az újabb vizsgálatok során kiderült, hogy a finomabb elemzés nem ilyen elnéző az egymás után érkező hangjelek agyi értékelésének megítélésében. Először is az derül ki, hogy második hang érzékelésének lehetősége a visszaérkező impulzus időbeli hosszától is függ. Ezen kísérletek eredményeit a e a

33. ábrán látható. A 33. ábra lényegében az első front törvényének határgörbéi.



33. ábra, Első hullámfront törvényének egyszerű ábrázolása.

A természetes hangjelenségek nem túl rövid időtartamúak, hanem legkevesebb 5... 15 ms, átlagban pedig 30.. 60 ms ideig tartottak. Az impulzusjelleg helyett inkább az átmeneti jelleg uralkodik. Ez beszédre erősen, zenére valamivel kevésbé jellemző. Az átmenetek által a kép elmosódottabbá válik, de a teremadottságoktól függően a jelleg pszichológiailag felismerhető marad.

3.4.2 HANGTISZTASÁGI FOK

Egy teremben nem minden esetben előnyös, ha a tér minden pontjában azonos az energia sűrűség, tehát nagy a diffúzitás és az érthetőség csökkenése a diffúzitás okozta elmosódás miatt következhet be, vagyis a diffúzitás akusztikailag káros hatásának oka a tranziens folyamatok elnyújtásában kereshető. Úgy is mondhatnánk, hogy a hang nemcsak térben, hanem időben is diffúz lesz.

Sokáig nem volt olyan objektív mérőszám, mellyel össze lehetne hasonlítani egy terem akusztikai jellemzőit beszéd érthetőség és zenei minőség szempontjából, erre vezették be a *hangtisztaság* (Definition, Clearness, Deutlichkeit) fogalmát. Tehát ezen mennyiség annak jellemzésére lett létre hozva,

hogy az egyes összetevők a hangkeverékben is felismerhetők és egymástól megkülönböztethetők-e. Fontos szerepe van mikor egy teljes zenekari hangzásban, hogy felismerhetők az egyes hangszerek sajátossága és jelenléte. A hangtisztaság akkor tökéletes, ha egy összeetet, hangból minden hangszert külön-külön tisztán fel tudunk ismerni,

A hangtisztaság tehát szintén szubjektív mennyiség, amely arra utal, hogy a hangkép egyes hangjai nem folynak össze, elkülönülnek egymástól és tisztán hallhatók. A diffuzitás és a hangtisztaság ellentétes fogalmak és számértékkel külön-külön nem jellemezhetők, pontosabban hangtisztasági foknak nevezni. Tehát a diffuzitás növelése a hangbenyomás egységességét és tömörségét fokozza, de ugyanakkor csökkenti a hangtisztaságot.

Összességében nézve a két tényező nagymértékben befolyásolja a hangérzetet. Így sok esetben a diffuzitás és hangtisztaságnak egyensúlya egyetlen mikrofonnal nem is valósítható meg, ilyenkor egy távolabbi és egy esetleg több közelebbi mikrofonnal kell dolgozni. Egyik példa a nagy kórusművek felvétele, ugyanis a kórusművek a leghosszabb utózengési időt kívánó művek, de ugyanakkor a szövegérthetőség is nagyon fontos. Megoldás lehet az is, ha a diffúz térben elhelyezett mikrofon mellett, egy másik, kitűnő szövegkiejtésű kisebb csoportok közelében, külön irányított mikrofont helyezünk el. További beállításokat, mint például az egységes hanghatás és a szövegérthetőség egyensúlyát a keverőasztal mellől szabályozhatjuk.

A hangtisztaságot tehát a közvetlen úton érkező és a később érkező zengő hullámtömeg közti arány dönti el. A *Haas-féle* vizsgálatok az első 30...50 ms időintervallumba teszik a közvetlen hanggal együtt felfogott hullámcsomag beérkezési idejét. Ami ezután érkezik, az első megközelítésben már zengő hang.

A hangtisztasági fokot úgy lehet meghatározni, mint egy rövid idejű impulzus első 50 ms alatt érkező hangenergiájának és az összes hangenergiának a hányadosát:

$$h = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Eszerint, akkor 100%-os a hangtisztaság ($h=1$) ha 50 ms alatt érkezik minden hangenergia viszont ha az első 50 ms alatt egyáltalán nem kapunk visszaverődést, vagyis az időkésés retesz 50 ms-ra tolódik ki, a hangtisztaság értéke alacsonyra adódik.

Egy példa egy hangversenystúdióban egy a balra a központi elhelyezésű hangforrással, jobbra pedig az oldalt a falhoz közel elhelyezett hangforrással kapott eredményekkel a helyi ingadozás viszonylag nem nagy (38...59%) eredményeket kapunk, de az értékek a hangforrás helyétől is függenek, vagyis a zenekari előadás esetén nem minden hangszert hallunk egyforma hangtisztasággal. Míg egy hosszú utózungési idejű templomban, 10...40%-os hangtisztasági fok értékek voltak mérhetők, ezúttal szabályszerűen a hangforráshoz közel a legnagyobb és tőle távolodva egyre kisebb érték tapasztalható.

A "jó akusztikához" ugyanis elegendő nagy diffuzitást és ugyanakkor elegendő nagy hangtisztaságot kívánunk meg, és ez a két követelmény látszólag ellentmondásban van egymással. Kiderült, hogy a visszaverődések számának és intenzitásának időbeli eloszlása a hely jellemzője és az akusztikai minőségi ítélettel összhangban van. Egyben azonban az is kiderült, hogy az 50 ms nem egy éles határ. Előállhat olyan helyzet, hogy a már említett határ előtt vagy után van erős visszhang, mely csak a képletet használva a nagy késleltetésű, jobban zavaró visszhangok esetén, ugyanakkora értéket kapunk mintha 50 ms után közvetlenül lett volna.

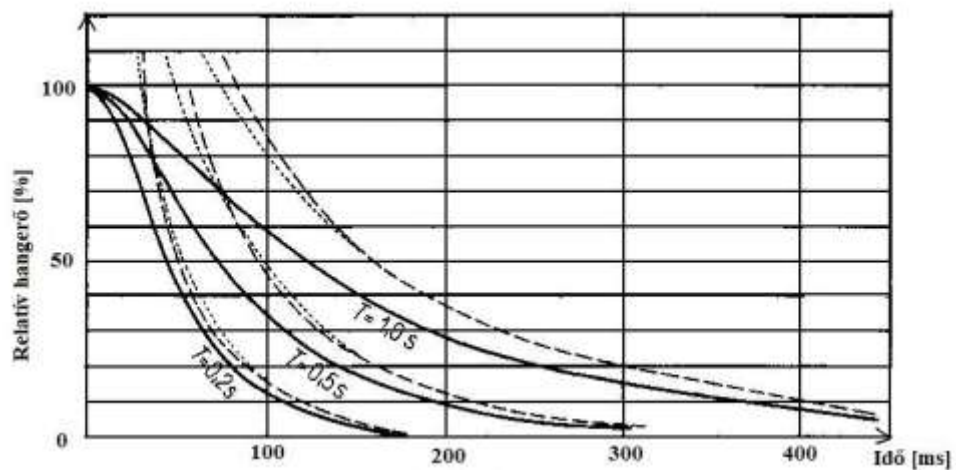
3.4.3 VISSZHANGFOK

A hangtisztaság megállapításánál nagy éles határt határoztak meg, akkor mikor azt mondták, hogy minden 50 ms után érkező hang, zavaró. Ugyanis a fül nem tart zavarónak minden 50 ms után érkező hangot, ha annak amplitúdója nem halad meg egy adott értéket és, ha ez a hang nem szemből érkezik.

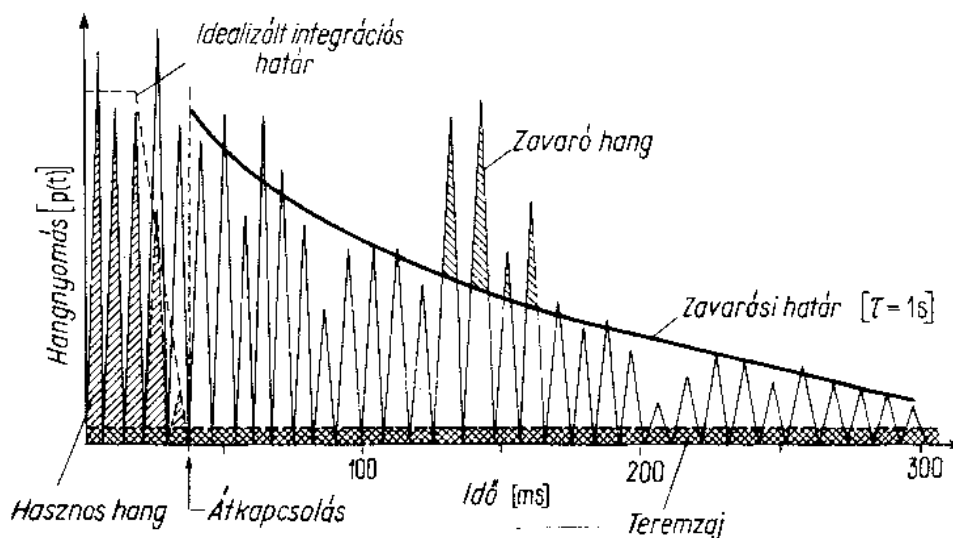
Korábbi kísérletek és saját tapasztalatai alapján **Henry Niese** új módszert dolgozott ki a hasznos és zavaró hang viszonyának jellemzésére az '50-es

években. Megállapítása szerint a különböző utózungési időkhöz tartozó 50%-os zavarási görbéknek és maguknak az utózungési görbéknek a kapcsolatát. **Niese** megállapított olyan határ görbét, amely jól egyezett az, **Haas** vagy **Muncey** korábban megállapított, 50%-os zavarási görbéivel. A 34. ábrán megfigyelhető folytonos vonal a mérhető hangerősség esését, a pontozott a **Niese** által számított, és a szaggatott vonal a **Nickson-féle** 50%-os zavarási görbéket. Az utóbbiakkal jó egyezés tapasztalható.

Niese mérése során úgy választotta szét a hasznos és zavarónak mondott, hogy az első 17 ms alatt beérkező hullám hasznosnak vehető továbbá hasznosnak tekinti a fül saját lecsengési görbéje alatti energia területét.[25.]



34. ábra, Az elhaló hangerő görbéi (kihúzott görbék), a Niese által számított (pontozott vonalak) és a Nickson-féle mért (szaggatott vonalak) 50%-os zavarási görbék különböző utózungési idők mellett az idő függvényében Niese alapján.



35. ábra, A Niese-féle visszhangok meghatározásához.

Niese mérései és mások vizsgálódásai alapján lecsengési időt 33 ms-ra választotta, mely megegyezik mások által az amplitúdóra vonatkozóan az 50 ms. A 35. ábrán **NIESE** féle határok láthatók

Tehát 33 ms időhatár után kezdődnek a zavaró hangok, és a módosított utózengési görbével meghatározott lecsengő érték a visszaverődések jelentkező szintjét két csoportra osztja, a görbe alatti részeket figyelmen kívül hagyta, míg a görbe felé nyúló hangokat már zavarónak tekinti. [2.] Ezeket matematikailag is felírta:

$$Z = \int_{33ms}^{\infty} [|p(t)| - B(t)]^2 dt$$

A hasznos jel felírás egyszerűbb hisz csak az első 33 ms-ot kell figyelembe venni:

$$H = \int_0^{33ms} [A(t)|p(t)|]^2 dt$$

[2.]A Z egyenlethez látható, hogy kell egy B(t) függvény, maga igencsak bonyolult kifejezés, ám egy közelítő képlettel egyszerűen meghatározható:

$$B(t) \approx k e^{-t/\tau}$$

Ezek után már meghatározhatjuk a NIESE által bevezetett az új objektív teremakusztikai paramétert, mely neve *visszhangfok (Echograd)*:

$$\varepsilon = \frac{Z}{Z + H}$$

A visszhangfok zérushoz közelít azon esetben, ha a hasznos energia mellett nagyon kevés a zavarónak tartott jel 100 %-hoz közelít, ha a sok zavar mellett a hasznos hang már nagyon elenyésző, de 100 % ill. 0 % sohasem lehet.

A vizsgálatok során még egy fontos észrevételt tett, hogy a visszhang időtartománybeli vizsgálata során más a jobb és más bal fül helyén mért eredmény, pl.: $\varepsilon_{\text{jobb}}=2\%$ míg $\varepsilon_{\text{bal}}=20\%$. Ezért zárt termekben az egy mikrofonos mérés nem ad teljes képet a hangképről. Ezért a két fülnek megfelelő műfejes, kétmikrofonos mérési eljárást dolgozott ki, és az adatok átlagát tekintette a visszhangfok valódi értékének.

Am további vizsgálódásai során az átlagolás, mint mérési módszer nem vált be, de sikerült ezen kívül összefüggést találnia a szótagérthetőség változása és a visszhangfok között. Ezzel és más szorzó figyelembevételével a korrigált k tényező összefüggésben van a visszhangfokkal.

$$k_5 = \sqrt[4]{1 - \varepsilon}$$

A módosított tényezővel mért értékek jó néhány teremben végzett vizsgálattal igazolták. Hisz tudjuk, hogy egy helyiségben az érthetőség erősen változik hely függvényében, ám ez a régóta ismert jelenség jól magyarázza a Niese-féle felismerés.

Niese eljárása rámutat arra, hogy a beszéd célú és a zenei célú objektív paraméterek között összefüggés teremthető. Későbbi vizsgálatok során kiderült, hogy a már említett integrálok időértékei meghatározták, hogy mely paraméterről van szó.

Niese eljárás egyik nagy problémája, hogy a visszhangfok az $A(t)$ és $B(t)$ módosító tényezők megválasztása miatt egyik paraméternek sem ideális. Mind

zenére mind pedig beszéd vizsgálatára javítottak az egyenleteken. Az egyik ilyen megoldás azáltal finomította az eljárást, hogy az úgynevezett ideális utózengési folyamatot tekintette érvényesnek, nem pedig a NIESE által módosítottat. Ekkor a $B(t)$ így alakul:

$$B(t) = B_0 e^{-13,8t/T}$$

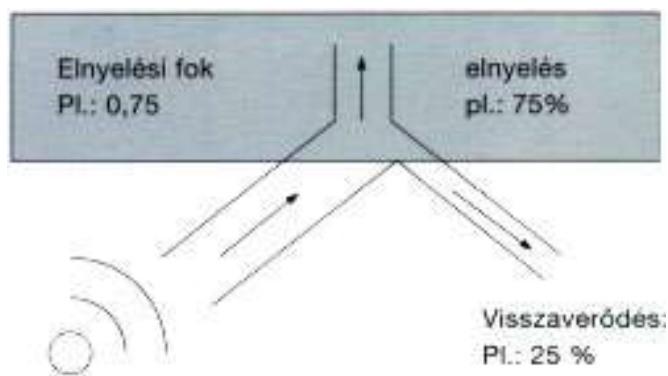
Természetesen így meghatározott visszhangfok (ϵ') más kapcsolatba kerül az érthetőséggel:

$$k_{\epsilon'} = \sqrt[3]{1 - \epsilon'}$$

Ezzen esetben az érthetőség már csak a hangerőtől és k_{ϵ} -től függ. Mindez közel áll az általunk bevezetett egyszerű érthetőség meghatározási módszerhez valamint a sokkal tökéletesebb RASTI-eljáráshoz.[25.]

3.4.4 UTÓZENGÉSI IDŐ

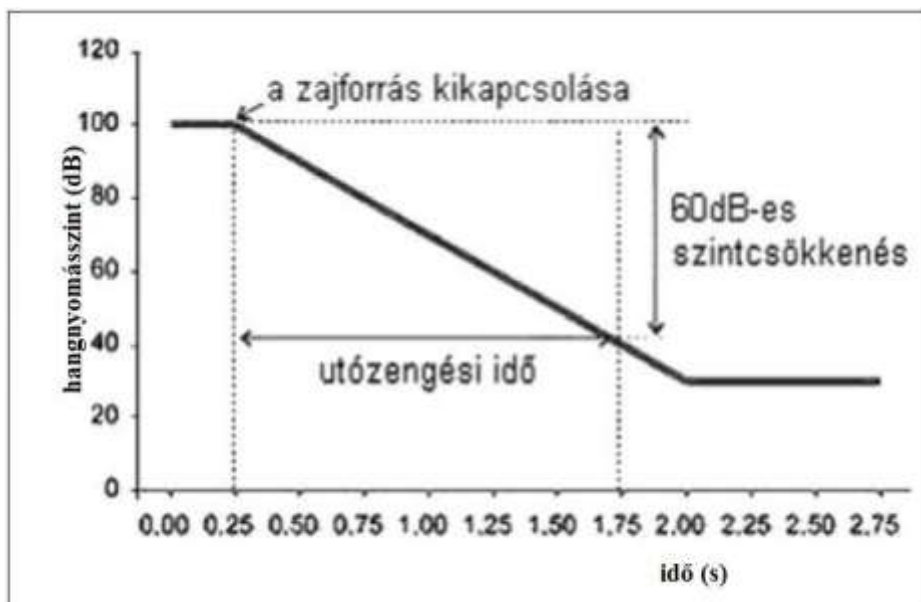
Mint láthatjuk, egy teremben az akusztikai gerjesztés megszüntetésével nem szűnik meg azonnal a térben a hang energia, hanem exponenciális függvényt követve csökken. Ezt nevezik *utózengésnek*. Ezen jelenség szoros kapcsolatban áll a visszhangossággal, hisz a jelenség úgy alakul ki, hogy az adott teremben a hangenergia többszörösen visszaverődik és a falfelületeknél elnyelődést is szenved el. Lásd 36. ábra.



36. ábra, Falfelületeknél elnyelődő hangenergia.

Az *utózengési idő* az egyik olyan mennyiség, melyet nagyon egyszerűen ki lehet számolni az adott helyiségre, mindössze a falakat borító anyag elnyelési tényezőjének (α) az ismerete, felülete méret (S) ill. a terem térfogata (V) kell hozzá. Ezen összefüggés kidolgozásában **W. C. Sabine** ért el sikereket. Az ő javaslatára határozták meg úgy az utózengési időt, hogy az az időtartam, amíg az eredeti hangnyomásszint a 60 dB-lel csökken, 37. ábra.

$$T_u = 0,163 \frac{V}{\alpha * S}$$



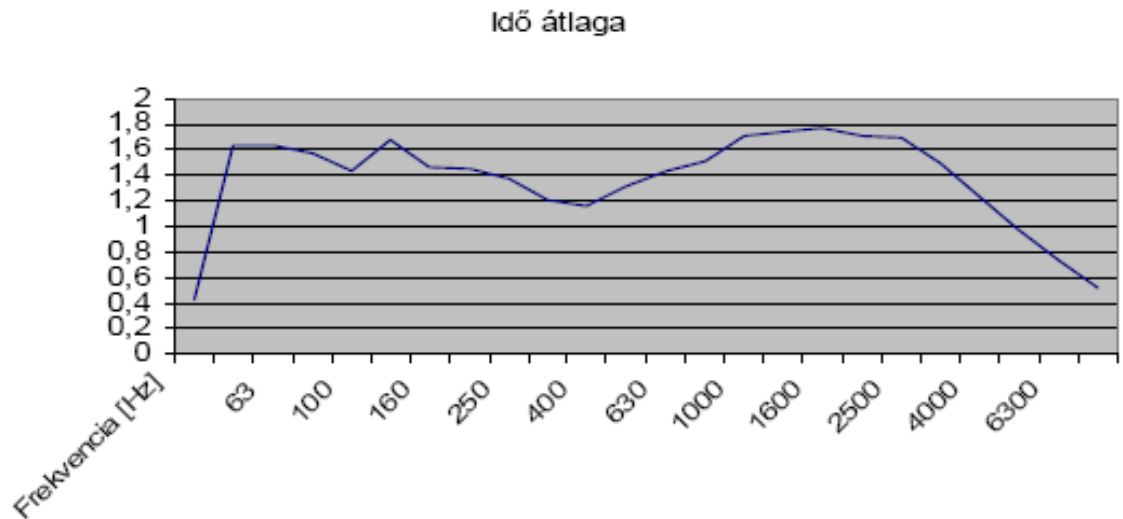
37. ábra, Grafikon az utózengési időmegértéséhez.

Mivel nagyon ritka az olyan helyiség, ahol minden falfelület azonos anyaggal van beborítva, ezért az ilyen helyiségek utózengési idejének számítására találták ki a következő képletet:

$$T_u = 0,163 \frac{V}{\sum_n \alpha_n * S_n}$$

Ahol az α_n az egyes rész falfelületek elnyelési tényezője, míg a S_n az adott rész falfelület nagysága. Egy terem jellemzésére persze az utózengési időt a teljes

hangfrekvenciás tartományba kellene elvégezni, de általában sávokra osztjuk fel a spektrumot és e rész spektrum közepén végezzük el a mérést. Így egy komplex képet kapunk a helyiség akusztikai jellemzéséhez. A 38. ábrán egyetemünk D1-es termékének utózungési ideje látható széles spektrumban.



38. ábra, D1-es termék utózungési ideje.

4. VISSZHANG VIZSGÁLAT, EREDMÉNYEK és MEGFIGYELÉSEK

4.1 VIZSGÁLATI ELJÁRÁSRÓL

A már fent említett elmélet tudatában hozzá lehet állni a mérés felépítéséhez. A már említett sok vizsgálati eljárás közül egy általam kidolgozott eljárást kezdtem kidolgozni. Ugyanis a vizsgálat során a vizsgált személyek akusztikai témában már jártas, vagy éppen akkor tanult személyek voltak, pl.: az egyetemünk hallgatósa, továbbá minden személyt tájékoztattam a vizsgálat előtt, a vizsgálat lépéseiről, jelen esetben összesen 4. pont. Kitértem a vizsgálat során két zenei műfajra, klasszikus zene, rock zene, abból az okból, hogy milyen hatásról számolnak be a személyek az adott zeneszámmal kapcsolatban. Továbbá vizsgáltam még egy másik vizsgálati pontban a magyar minta mondatok érthetőségét, és azt, hogy az impulzusokra milyen hatással van a visszhang. Minden pontban több késleltetést és különböző csillapítású visszhangot is megvizsgáltam.

Így neki láthattam a mintahangok szerkesztésének (részletesebben a következő pontban) és a vizsgálatra történő összeállításra. Az előzetes tesztek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az egyes minták hosszát csökkenteni kell, az eredeti méretük töredékére és még további minták beiktatásával pontosabb képet kapunk a visszhangok hatásairól, minden pontban. Az eredeti mintákat tehát maximálisan 26 mp hosszúságúra rövidítettem le mely saját megítélésem és mások megítélése szerint is megfelelő hosszúságú, ahhoz, hogy eldönthető legyen az akusztikai hatás.

A vizsgálat során a személyek egy fejhallgatón keresztül hallgatták meg az adott mintát és válaszoltak, hogy az adott mintát melyik adott kategóriába sorolják. Mivel a vizsgálat során a saját számítógépemről történt így ez a körülmény is minden esetben azonos volt, természetesen ügyeltem arra, hogy

minden beállítás azonos legyen. A fejhallgató következtében a külső környezet nagymértékben nem befolyásolta a mérést, sőt egyáltalán nem volt rá hatással. Ennek következtében ugyan úgy lehetett a vizsgálatot folytatni a labor helyiségben, mint egy csendesebb kollégiumi helyiségben. Továbbá a mintákat véletlenszerűen játszottam le így kiküszöbölve annak a veszélyét, hogy ha valamilyen sorrendet állít fel az ember, akkor a vizsgált alany füle „hozzászokik” a szabályszerűséghez, így ez is módosítaná az eredményt.

4.2 MINTÁKRÓL és ELŐÁLLÍTÁSUK.

A mintákat az *Adobe Audition 1.5* (39. ábra) programmal készítettem, mely egy rendkívül elterjedt és sokoldalú program. Ugyan úgy alkalmas több csatornás felvételek szerkesztésére, mint egyszerű monó fájlok szerkesztésére. A monó felvételek nagy előnye még ezen esetben az irányhallás kiküszöbölésére, és az is hogy az esetleges szerkesztések miatti elcsúszás. Mivel a lejátszás során zavaró lehet, hogy csak egy oldalról jön a hang, e mintákat áll sztereóvá alakítottam vissza, úgy hogy mindkét oldal 50 %-os elosztásban. Továbbá minden mintára jellemző, hogy egyszerű visszhanggal láttam el. A mintákat wav kiterjesztésű hang fájlként tárolta, mely veszteségmentes tömörítés nélküli PCM kódolást használ. Az első három vizsgálati ponthoz a program által adott lehetőségek segítségével állítottam elő a mintákat, míg az utolsó pontban már teljes egészében én vágtam össze a mintát.



39. ábra, Adobe Audition 1.5 felépítése.

4.2.1 1. VIZSGÁLATI PONT

Az 1. ponthoz, a beszédérthetőség vizsgálatához, az MTBA adatbázis minta mondatait használtam. Mivel megfelelő minőségben nem volt elérhető saját felvételt készítettem ugyanazon mondatok felhasználásával. A felvétel a L1/119-120-as laborban készült.

Minden mondat magyar nyelvű és átlagosan 4 mp hosszúságúak.

A minta mondatok szövege:[24.]

- "Ebben a változatban mindössze egyszer játszottam kilenc évvel ezelőtt."
- "A legtöbbben másokét szajkózzák, abban a hitben, hogy a sajátjuk."
- "Nagy hiba volt nem foglalkozni a migrációs szabályozás kérdésével."
- "Az egyik a különböző szófajok majdnem teljes felcserélhetősége."

A vizsgálatok megkezdése előtt számtalan minta hangot készítettem különböző késleltetésekkel és más-más visszhangcsillapításokkal, -1 dB-es -3 dB-es -6 dB és -10 dB-es lépcsőkben készítettem el a mintákat melyekből saját és

konzulensem belátása szerint kiválasztottuk a végleges vizsgálatra szánt hangokat, így eset a választás a -1 dB, -3 dB, és a -6 dB-es csillapítású mintákra.

Természetesen ezzel egy időben a visszhangok késleltetésére is ügyelve történt a válogatás. Mindezek meg találhatók a mellékelt lemezen.

Ezen pontban a vizsgált személynek az alábbi kategóriák valamelyikébe kellett be sorolni az adott mintát:

Semmi változás	Térbeliség (Prec. Effect)	Visszhang, de könnyen érthető	Visszhang és nehezen érthető	Érthetetlen
----------------	------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-------------

4.2.2 2. VIZSGÁLATI PONT

A 2. ponthoz már egy zenei műfajt választottam, a sokk közül még pedig a rock műfajból, még pedig a mindenki számára ismert *EDDA* együttes egy dall részletét.

Pontosan a *Edda - Változó idők* (1988) lemez „*Ég a házunk*” című dalának első 0 perc 4 mp -től 0 perc 28 mp -ig

Az adott minta dalszövege:

„A házunk ég, talán az egész ég!

De nem biztos, nem biztos semmi se még.”

A végleges minta kb. 24 mp hosszú, és mint az előző pontban itt is ugyanazon csillapítás értékekkel továbbá itt is majdnem teljesen ugyanazon késleltetésekkel. Néhány vizsgálat után azt a visszajelzést kaptam, hogy e vizsgálati pont túl hosszú, ez érthető a sokk minta következtében, de jelentős átalakítást nem alkalmaztam, mert akkor nem kapnék megfelelő képet a hatásokról, és a már meglévő eredményeket is befolyásolná.

Ezen pontban a vizsgált személynek már csak e kategóriák valamelyikébe kellett be sorolni az adott mintát:

Semmi változás	Térbeliség (Prec. Effect)	Egyértelműen visszhangos	Élvezhetetlenül rossz (túl nagy visszhang)
----------------	------------------------------	-----------------------------	---

4.2.3 3. VIZSGÁLATI PONT

A 3. ponthoz már egy gyökeresen másik zenei műfajt választottam, még pedig a mindenki számára ismert **Beethoven** egyik 9. szimfóniájának egy részletét.

Pontosan a *Mások felvonásból* a 18 perc 3 mp –től a 18 perc 29 mp –ig.

Mivel az előzetes vizsgálatok során kitűnt, hogy nincs olyan nagy hatással a visszhang a zene minőségére itt alkalmam adódott a minták számának csökkentésére, de minták hossza változatlanul 26 mp maradt. Ezen pontban a vizsgált személynek ugyanazon kategóriák valamelyikébe kellett be sorolni az adott mintát, mint az előző pontban:

Semmi változás	Térbeliség (Prec. Effect)	Egyértelműen visszhangos	Élvezhetetlenül rossz (túl nagy visszhang)
----------------	------------------------------	-----------------------------	---

4.2.4 4. VIZSGÁLATI PONT

A 4. pontban a visszhangok impulzusokra történő hatást vizsgáltam. A mintát a program által generált fehér zajból vágtam ki 6 ms hosszúságban. Továbbá a mintákban más hangokat helyeztem, el melyek jelzik a minta végét a vizsgált személynek, egy 400 Hz-es halk szinusz hang 219 ms hosszúságban (40. ábra).

Ezen pontban a vizsgált személynek egy egyszerű válaszra kellett válaszolniuk: „Hány impulzust hall ön?”



40. ábra, Példa a 4. pontban használt mintáról. (vízszintes tengelyen az idő, függőleges tengelyen pedig az amplitúdó)

4.3 VIZSGÁLATOK

Mint már említettem a vizsgálat során a személyek egy fejhallgatón keresztül hallgatták meg az adott mintát és válaszoltak, hogy az adott mintát melyik adott kategóriába sorolják. A fejhallgató következtében a külső környezet nagymértékben nem befolyásolta a mérést, sőt egyáltalán nem volt rá hatással. Ennek következtében ugyan úgy lehetett a vizsgálatot folytatni a labor helyiségben, mint egy csendesebb kollégiumi helyiségben. Továbbá a mintákat véletlenszerűen játszottam le így kiküszöbölve annak a veszélyét, hogy ha valamilyen sorrendet állít fel az ember, akkor a vizsgált alany füle „hozzászokik” a szabályszerűséghez, így ez is módosítaná az eredményt.

A vizsgált személyek eloszlása nemük szerint az alábbi volt:

Férfi	50 fő
Nő	6 fő

Átlagos életkor a vizsgált alanyoknál, nemekre lebontva:

Férfi	23
Nő	20
Összesen	23

4.4 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A mérési eredmények az pontokra bontva az alábbi, részletesebb összefoglaló táblázat a II. Mellékletben található. Az alábbi táblázatok tartalmazzák a megfigyeléseket továbbá azt, hogy mekkora késleltetés esetén volt ez megfigyelhető, a visszhangok csillapítását külön táblázat tartalmazza.

4.4.1 1. VIZSGÁLATI PONT

Megfigyelések %-osan, külön táblázatokban a különböző csillapítások.:

3. táblázat, Megfigyelési eredmények -1 dB-es csillapítás esetén az 1. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang; Könnyű érthetőség	Visszhang; Nehéz érthetőség	Érthetetlen
5	29%	59%	13%	0%	0%
10	13%	71%	7%	0%	0%
20	5%	63%	27%	0%	0%
30	4%	52%	38%	2%	0%
40	0%	43%	46%	5%	0%
50	0%	25%	57%	11%	0%
70	0%	14%	54%	20%	2%
90	0%	4%	45%	41%	0%
120	0%	4%	36%	54%	2%
150	0%	0%	48%	43%	2%
200	0%	0%	45%	50%	2%

4. táblázat, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítás esetén az 1. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang; Könnyű érthetőség	Visszhang; Nehéz érthetőség	Érthetetlen
5	45%	54%	2%	0%	0%
10	29%	61%	5%	0%	0%
20	5%	70%	14%	2%	0%
30	5%	70%	20%	4%	0%
40	4%	57%	29%	4%	0%
50	0%	30%	59%	5%	0%
70	0%	11%	64%	18%	0%
90	0%	2%	61%	29%	0%
120	0%	0%	54%	39%	4%
150	0%	2%	36%	55%	4%
200	0%	2%	43%	57%	2%

5. táblázat, Megfigyelési eredmények -6 dB-es csillapítás esetén az 1. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang; Könnyű érthetőség	Visszhang; Nehéz érthetőség	Érthetetlen
5	43%	46%	4%	0%	0%
10	29%	61%	5%	0%	0%
20	13%	75%	7%	2%	0%
30	7%	66%	20%	0%	0%
40	2%	63%	23%	4%	0%
50	0%	43%	46%	2%	0%
70	0%	14%	63%	14%	0%
90	0%	4%	70%	25%	2%
120	0%	2%	61%	23%	4%
150	0%	5%	54%	30%	2%
200	0%	5%	59%	27%	2%

4.4.2 2. VIZSGÁLATI PONT

Megfigyelések %-osan, külön táblázatokban a különböző csillapítások.:

6. táblázat, Megfigyelési eredmények -1 dB-es csillapítás esetén a 2. vizsgálati pontban.

Késleltetés(ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang,	Élvezhetetlen
10	7%	73%	11%	7%
25	0%	48%	21%	21%
50	4%	50%	32%	4%
75	5%	36%	48%	2%
100	0%	13%	54%	29%
150	0%	2%	27%	57%
200	2%	2%	41%	52%

7. táblázat, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítás esetén a 2. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang,	Élvezhetetlen
10	14%	57%	23%	2%
25	5%	43%	21%	23%
50	41%	36%	14%	2%
75	2%	38%	41%	5%
100	4%	21%	46%	13%
150	0%	5%	38%	32%
200	0%	4%	46%	48%

8. táblázat, Megfigyelési eredmények -6 dB-es csillapítás esetén a 2. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang,	Élvezhetetlen
10	46%	41%	5%	0%
25	9%	63%	16%	9%
50	9%	50%	30%	2%
75	27%	39%	25%	0%
100	2%	43%	36%	5%
150	4%	20%	48%	11%
200	2%	27%	55%	11%

4.4.3 3. VIZSGÁLATI PONT

Megfigyelések %-osan, külön táblázatokban a különböző csillapítások.:

9. táblázat, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítás esetén a 3. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang,	Élvezhetetlen
25	41%	54%	4%	0%
50	41%	43%	14%	0%
100	29%	38%	30%	0%
200	30%	29%	39%	0%

10. táblázat, Megfigyelési eredmények -6 dB-es csillapítás esetén a 3. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)\Megfigyelés	Semmi Változás	Térbeliség; Első hu.fr. tr.	Visszhang,	Élvezhetetlen
25	43%	52%	4%	0%
50	50%	39%	7%	0%
100	54%	30%	11%	0%
200	43%	32%	21%	0%

4.4.4 4. VIZSGÁLATI PONT

Átlagosan számolt impulzusok száma a négyes vizsgálati pontban (Részletesebben a II. Mellékletben):

11. táblázat, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítás esetén a 4. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)	Átlagos darabszám
5	1,25
10	1,61
25	1,89
50	2,07
75	1,98
100	2,00

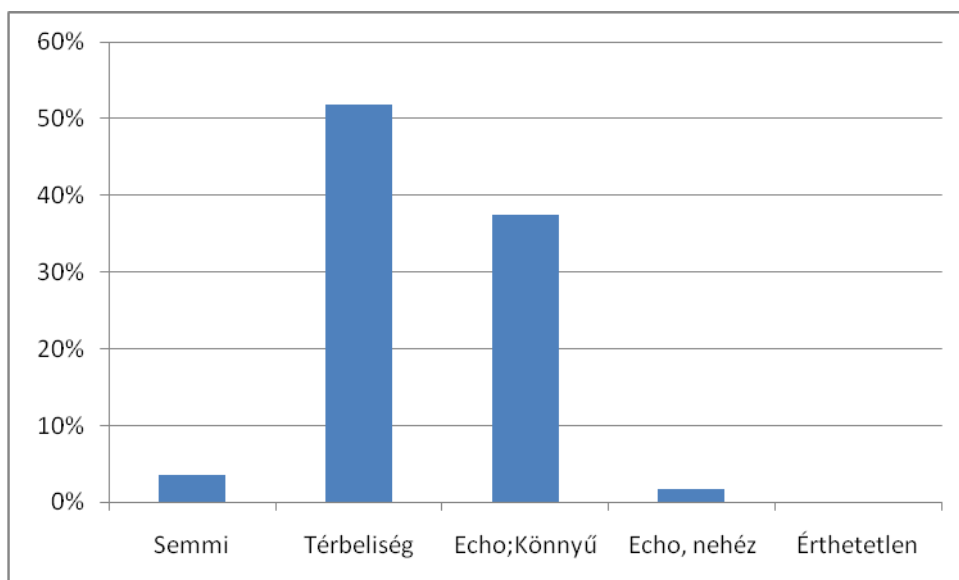
12. táblázat, Megfigyelési eredmények -6 dB-es csillapítás esetén a 4. vizsgálati pontban.

Késleltetés (ms)	Átlagos darabszám
5	1,32
10	1,61
25	1,86
50	2,00
75	2,02
100	2,00

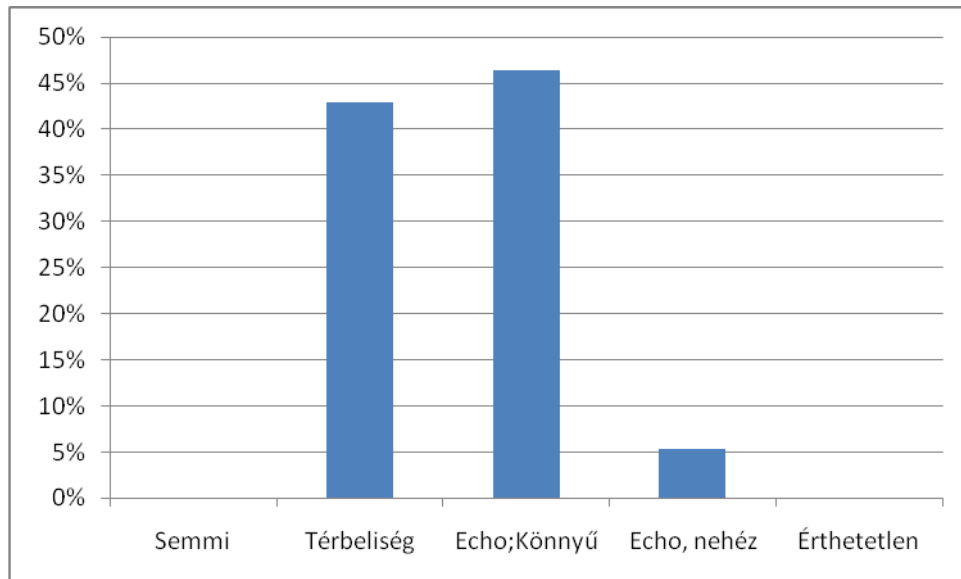
4.5 MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Első látásra ezen táblázatok túl összetettnek és bonyolultnak látszanak, de nézzük kirészletezve.

Az első rész, azaz a visszhangok beszédre történő hatását adott, már sokan vizsgálták többek között **Haas, Cremer**, ők arra a megállapításra jutottak, hogy a beszéd esetén 35 ms késleltetés esetén az első hullámfront törvényt (térbeliség), mint jelenséget tapasztalták. Az én vizsgálataim során egy 30 ill. 40 ms-os késleltetést használtam. Látható, hogy míg 30 ms esetén a többség (52 %) inkább első hullámfront törvényt nevezte meg, de 40 ms esetén már a vizsgált alanyok 46 % - ka mondta az, hogy inkább visszhangnak (echo) érzékeli a mintát (41.ábra, 42 ábra). A megfigyelések közötti nem éles átmenet azzal magyarázható, hogy a jelenségek megnevezésében sincs éles határvonal. 50 ms és felette már a vizsgált személyek nagy hányada visszhangot állapított meg.

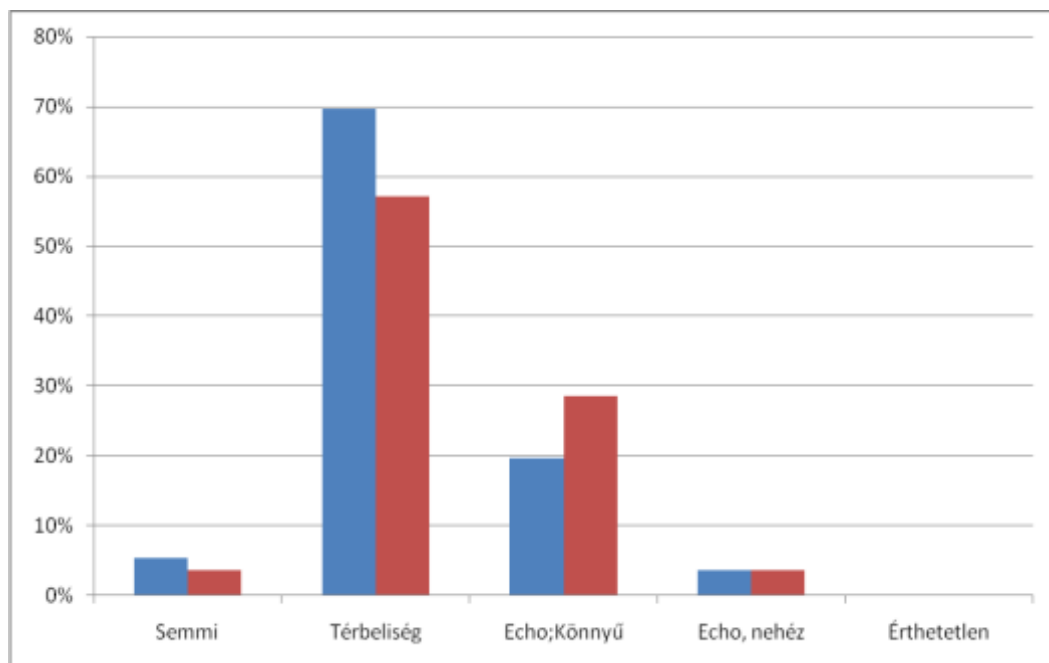


41. ábra, Megfigyelési eredmények -1 dB-es csillapítású visszhanggal, 30 ms-os késleltetés esetén.



42. ábra, Megfigyelési eredmények -1 dB-es csillapítású visszhanggal, 40 ms-os késleltetés esetén.

Nagyobb visszhang csillapítások esetén (-3 dB, - 6 dB) már nagyobb elkülöníthető volt visszhang és térbeliség, 43. ábra, ám itt a nagy váltás a visszhangra, mely 50 ms esetén jelentkezett. Tehát kisebb amplitúdójú visszhang esetén nagyobb késleltetés kell a megfelelő zavar elő állítására. Ugyanez a helyzet – 6 dB-es csillapítás esetén ugyanis itt, viszont itt már a már említett éles határ 70 ms-ra ugrik.

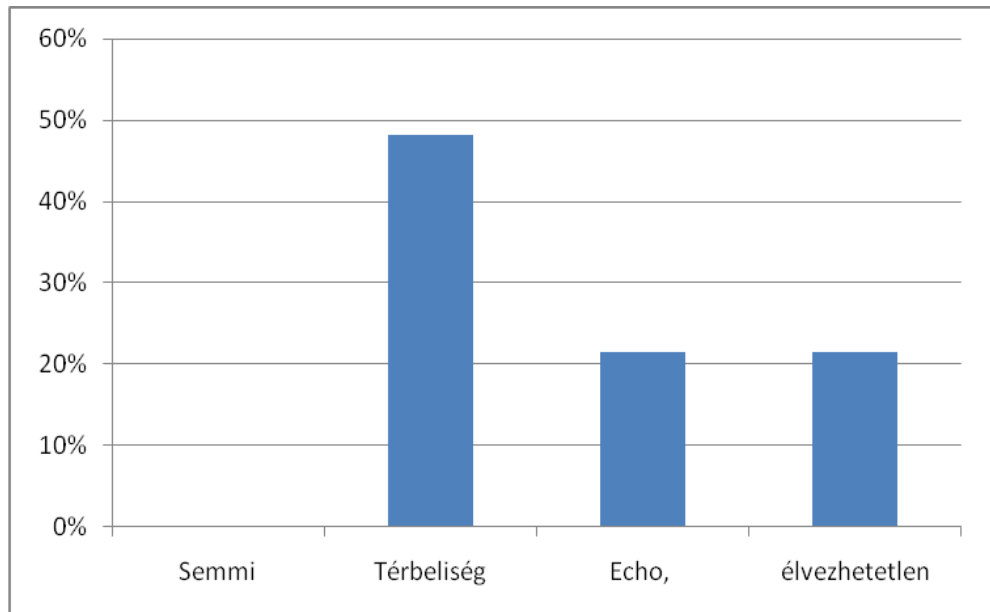


43. ábra, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítású visszhanggal, kék oszlopokkal a 30 ms, piros oszloppal a 40 ms-os késleltetés esetén.

Az, hogy vizsgálatok során nagyon kevés olyan személy volt, aki azt mondta, hogy érthetetlen az adott mondat, annak tudható be mindet mondat magyar nyelvű volt és ilyen esetben az ember saját belső „hibajavítása” segít a szöveg megértésében, ugyanis a legnagyobb érték 4 %.

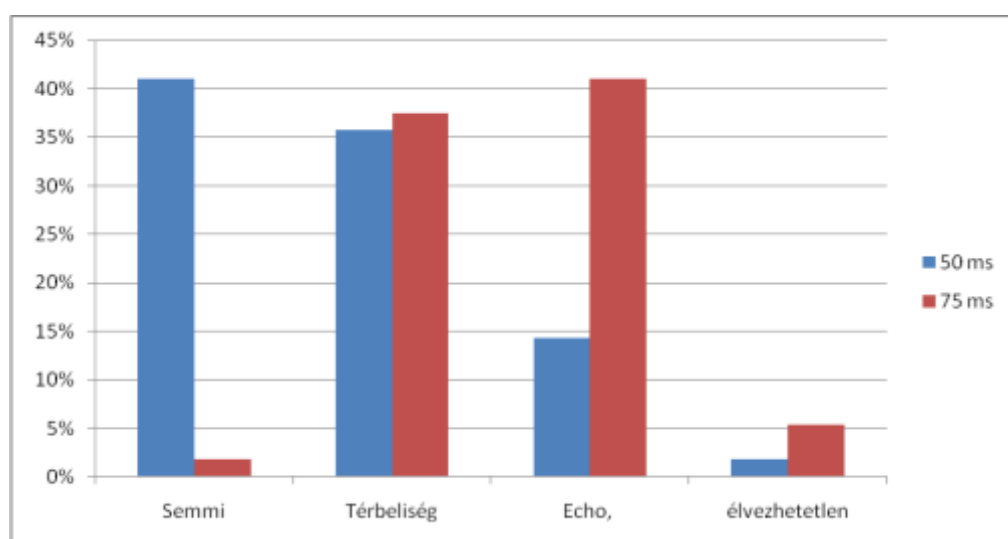
A második, ill. harmadik vizsgálati pontban már a zenére történő hatásukat vizsgáltam, két eltérő zenei műfajban: rock és klasszikus zene.

Itt az eredmények hasonlóan alakultak az előzőponthoz képest, de itt már a zene élvezhetőségében nagyon nagy szerepet játszott egy kisebb késleltetés is, 44. ábra.



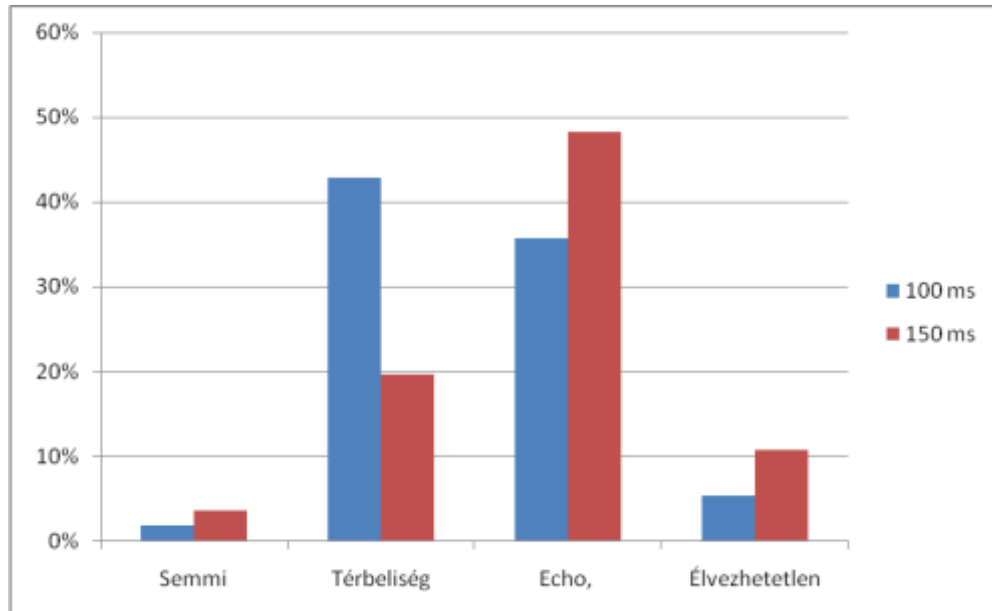
44. ábra, Megfigyelési eredmények -1 dB-es csillapítású visszhanggal, 25 ms-os késleltetés esetén, a 2. vizsgálati pontban.

Az itt már emlegetett határ szintén elmosódik, de kijelenthető, hogy 50 és 75 ms-os késleltetés között található. Nagyobb csillapítások esetén ez a váltás magasabb értékek felé nyúlik: -3 dB esetén még 50 ms és 75 ms közötti tartományba (45. ábra), de már -6 dB-es csillapítás esetén már 100 és 150 ms közötti tartományba esik ez a határ, 46. ábra.



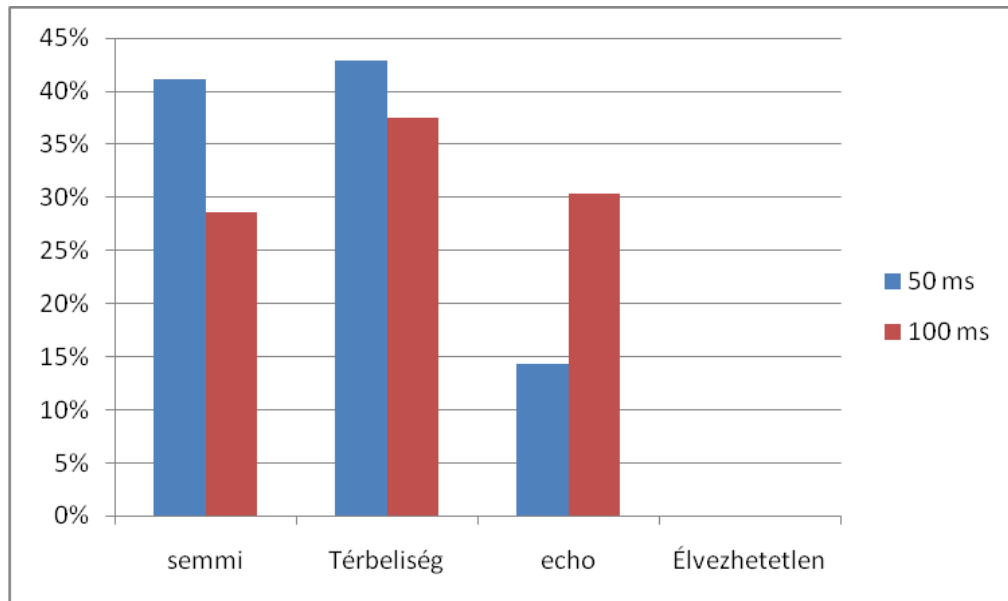
45. ábra, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítású visszhanggal, kék oszlopokkal a 50 ms, piros oszlop a 75 ms-os késleltetés esetén, a 2. vizsgálati pontban.

A 50 ms-os késésletetés esetén adódó kiugró érték a „Semmi” hatásra vonatkozólag, azt takarja, hogy az vizsgált személyek egy jelentős hányada ne számolt be számot tevő különbségről.



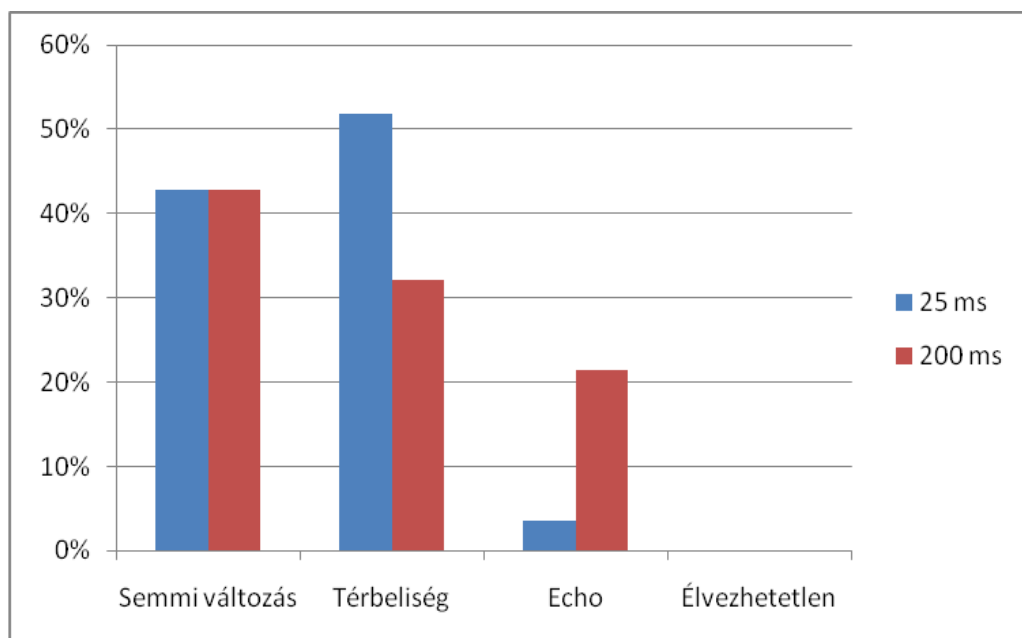
46. ábra, Megfigyelési eredmények -6 dB-es csillapítású visszhanggal, kék oszlopokkal a 100 ms, piros oszloppal a 150 ms-os késletetés esetén, a 2. vizsgálati pontban.

A harmadik vizsgálati pontban már a visszhangok klasszikus zenére történő hatását vizsgáltam. Az előzetes vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy nincs érzékelhető hatása és a további vizsgálatok is erre a következtetésre utaltak. Az egyenletes eloszlás arra enged következtetni, hogy a vizsgált alanyokban nem alakult ki egyértelmű érzet a visszhang érzetére vonatkozólag, de azért az alanyok nagy része első hullámfront törvényt (térbeliség) mint, jelenséget felismerték. (47. ábra)



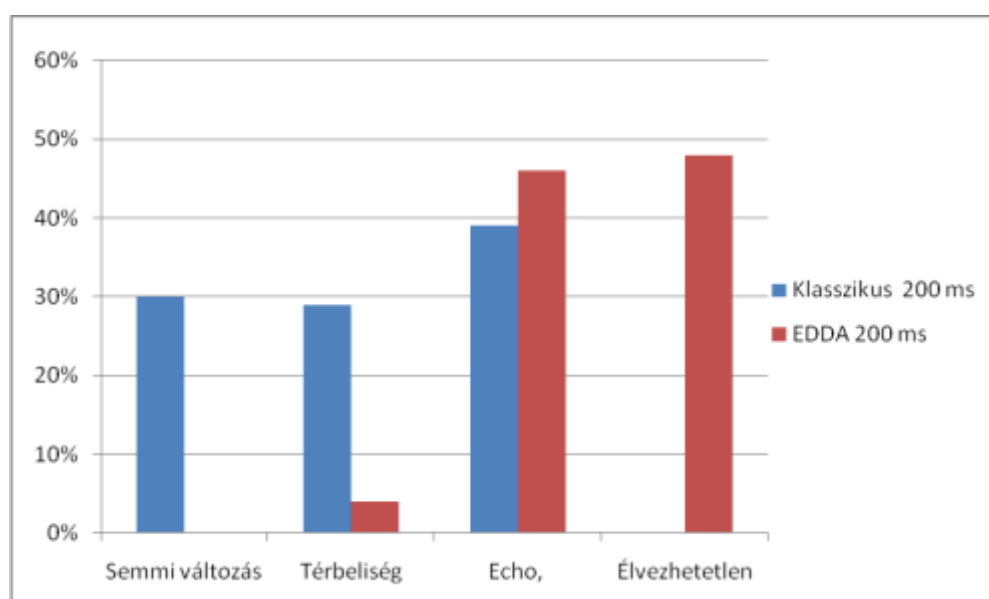
47. ábra, Megfigyelési eredmények -3 dB-es csillapítású visszhanggal, kék oszlopokkal a 50 ms, piros oszloppal a 100 ms-os késleltetés esetén, a 3. vizsgálati pontban.

Nagyobb csillapítás esetén is hasonló a helyzet sőt itt csak kis késleltetések esetén hallottak ki a első hullámfront törvényt és csak nagy késleltetés esetén számoltak be visszhangról, 48. ábra.



48. ábra, Megfigyelési eredmények -6 dB-es csillapítású visszhanggal, kék oszlopokkal a 25 ms, piros oszloppal a 200 ms-os késleltetés esetén, a 3. vizsgálati pontban.

Összegezve a két vizsgálati pont eredményeit, belátható hogy a visszhangoknak rock zenére történő hatása sokkal jelentősebb, mint klasszikus zenére. Ez megfigyelhető a 49. ábrán, ahol a két pont eredményeinek egy összegzett grafikonja látható. Megfigyelhető, hogy míg az első pontban a 200 ms-os késleltetés legtöbb esetben „Élvezhetetlené” tette a zeneművet, addig klasszikus esetben ez még csak visszhangról számolt be a vizsgált személyek 39 %-ka.



49. ábra, Megfigyelési eredmények a – 3 dB-es csillapítás és 200 ms-os késleltetés esetén a 2. és 3. vizsgálati pontban egyszerre.

Az utolsó lépésben pedig a visszaverődések impulzusokra történő hatását vizsgáltam. Itt az eredmények már egyértelműek. A személyek akkor tudták az első impulzust elkülöníteni a késleltetettől, ha az impulzus és a késleltetett impulzus közötti távolság legalább az impulzus négyszerese, ez mindkét csillapítás esetén fennáll, 13. táblázat.

13. táblázat, 4. vizsgálati pont eredményei átlagolva, részletesebben a II. mellékletben.

Csillapítás - 3dB esetén a késleltetés	Átlagosan számolt impulzusok száma	Csillapítás - 6 dB esetén a késleltetés	Átlagosan számolt impulzusok száma
5	1,25	5	1,32
10	1,61	10	1,61
25	1,89	25	1,86
50	2,07	50	2,00
75	1,98	75	2,02
100	2,00	100	2,00

5. ÖSSZEGZÉS

Első gondolatra azt gondolhatná az ember, hogy a hallásuk egy egyszerű folyamat, de belátható, hogy ez közel sem igaz. Figyelembe kell venni a fül nem lineáris frekvencia menetét és az is hogy egyes esetekben kialakulhat a hang elfedés jelensége is ha van egy zavarónak tartott hang. A különböző frekvenciájú hangok ezen okok miatt nem hasonlíthatók össze objektív módon. Ezen problémák ellen hozták létre a *son* és *phon* mértékegységeket, hogy a különböző frekvenciájú hangok összehasonlíthatóvá váljanak. Beláthatjuk, hogy a hallás folyamata ilyen összetett. Részeltessen, megismerkedhetünk az *egyszerűvisszhangokkal* és kialakulással és néhány az idő folyamán előforduló terem akusztika problémával, mind hazai mind pedig külföldi példán keresztül (pl.: *Royal Albert Hall*; *Erkel F. Színház*). Ám nem csak egyszerű visszhangok tudnak kialakulni egy helyiségben, hanem sokkal jellemzőbb a csörgővisszhang és ennek egyéb ritkábban megfigyelhető változatai, *zenei visszhang*, *sorozatvisszhang*. Ezekről is olvashatunk részletes magyarázatot. Két jellemző hatásról is olvashatunk, melyek előfordulhatnak egy a nagy közönségnek szánt előadó teremben (pl.: kupolahatás). Arról, hogy milyen szubjektív hatások alakulhatnak ki egy emberben akkor, ha már egy terem visszhangos, már sokan, sokféleképpen (pl.: **H. Haas**) vizsgálták, és örökérvényű következtetéseket vontak le ezen eredményeikből, melyek örökérvényesek. Ezen eredményekből később több olyan objektív mérőszámot hoztak létre, melyekkel jellemezhető egy adott helyiség teremakusztikai szempontból (pl.: *visszhangfok*). Kitértem még a beszédérthetőség vizsgálatára, mely nem egyszerű feladat akkor, ha hiteles méréseket szeretnénk készíteni. Saját vizsgálataim során is hasonló eredmények születtek, mint az már a nálam korábban végzett személyek kaptak, továbbá kitértem nem csak a beszédérthetőség vizsgálatára, hanem két eltérő zenei műfajra milyen hatással vannak a visszhangok.

Tehát bármilyen teremben is építünk nem szabad a visszhangok kialakulásának veszélye felett elsiklani, még akkor, sem ha egy egyszerű előadó teremről van szó, akkor meg semmiképp, ha ott zenei műveket is hallgathatunk.

6. MELLÉKLETEK

I. melléklet: Kérdőív a visszhang vizsgálatához.

II. melléklet: Összegzett mérési eredmények.

III. melléklet: DVD-lemez.

I. melléklet:

Kérdőív a visszhang vizsgálathoz

Készítette: Szabó Arnold, hallgató

Életkor:

Nem: Férfi Nő

A vizsgálatot a vizsgálatvezető által megadott hangokkal kell elvégezni.

1. vizsgálati pont

Hangminta: MTBA adatbázis minta mondata, magyar nyelvű, süketszobai felvétel;

hossza: ~4 mp

Csillapítás/észlelés	Semmi változás	Térbeliség (Prec. Effect)	Visszhang, de könnyen érthető	Visszhang és nehezen érthető	Érthetetlen
- 1 dB					
- 3 dB					
- 6 dB					

2. vizsgálati pont

Hangminta: EDDA, stílusa rock; hossza: 24 mp

Itt a kérdés az alábbi:

Csillapítás/észlelés	Semmi változás	Térbeliség	Egyértelműen visszhangos	Élvezhetetlenül rossz
- 1 dB				
- 3 dB				
- 6 dB				

3. vizsgálati pont

Hangminta: Beethoven; stílusa klasszikus; hossza: 26 mp

Itt a kérdés az alábbi

Csillapítás/észlelés	Semmi változás	Térbeliség	Egyértelműen visszhangos	Élvezhetetlenül rossz
- 3 dB				
- 6 dB				

4. vizsgálati pont

Hangminta: rövid impulzusszerű hang; hossza: 5 mp

Csillapítás/észlelés	Hány impulzust hall ön az alábbi késleltetések esetén?					
	[ms]					
	5	10	25	50	75	100
- 3 dB						
- 6 dB						

Vélemény egyéb megjegyzések a vizsgálatról:

II. melléklet:

Vizsgálati eredmények részletesen. A táblázatok a személyek számát tartalmazzák az első három pont esetén a 4 pont esetén pedig a számolt impulzusok számát.

1. vizsgálati pont.

Visszhang csillapodása -1 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Visszhang ; Könnyű érthetőség	Visszhang , nehéz érthetőség	Érthetetlen-en
	5 ms	16	33	7	-	-
	10 ms	7	40	4	-	-
	20 ms	3	35	15	-	-
	30 ms	2	29	21	1	-
	40 ms	-	24	26	3	-
	50 ms	-	14	32	6	-
	70 ms	-	8	30	11	1
	90 ms	-	2	25	23	-
	120 ms	-	2	20	30	1
	150 ms	-	-	27	24	1
	200 ms	-	-	25	28	1
Visszhang csillapodása -3 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Visszhang ; Könnyű érthetőség	Visszhang , nehéz érthetőség	Érthetetlen-en
	5 ms	25	30	1	-	-
	10 ms	16	34	3	-	-
	20 ms	3	39	8	1	-
	30 ms	3	39	11	2	-
	40 ms	2	32	16	2	-
	50 ms	-	17	33	3	-
	70 ms	-	6	36	10	-
	90 ms	-	1	34	16	-
	120 ms	-	-	30	22	2
	150 ms	-	1	20	31	2
	200 ms	-	1	24	32	1

Visszhang csillapodása -6 dB	Késlelte tés	Semmi változá s	Térbeliség; Első hu. tr	Visszhang ; Könnyű érthetőség	Visszhang , nehéz érthetőség	Értheteti -en
	5 ms	24	26	2	-	-
	10 ms	16	34	3	-	-
	20 ms	7	42	4	1	-
	30 ms	4	37	11	-	-
	40 ms	1	35	13	2	-
	50 ms	-	24	26	1	-
	70 ms	-	8	35	8	-
	90 ms	-	2	39	14	1
	120 ms	-	1	34	13	2
	150 ms	-	3	30	17	1
	200 ms	-	3	33	15	1

2. vizsgálati pont.

Visszhang csillapodása -1 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Egyértelmű visszhang; Echo,	Élvezhetetlen
	10 ms	4	41	6	4
	25 ms	-	27	12	12
	50 ms	2	28	18	2
	75 ms	3	20	27	1
	100 ms	-	7	30	16
	150 ms	-	1	15	32
	200 ms	1	1	23	29
Visszhang csillapodása -3 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Egyértelmű visszhang; Echo,	Élvezhetetlen
	10 ms	8	32	13	1
	25 ms	3	24	12	13
	50 ms	23	20	8	1
	75 ms	1	21	23	3
	100 ms	2	12	26	7
	150 ms	-	3	21	18
	200 ms	-	2	26	27
Visszhang csillapodása -6 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Egyértelmű visszhang; Echo,	Élvezhetetlen
	10 ms	26	23	3	-
	25 ms	5	35	9	5
	50 ms	5	28	17	1
	75 ms	15	22	14	-
	100 ms	1	24	20	3
	150 ms	2	11	27	6
	200 ms	1	15	31	6

3. vizsgálati pont.

Visszhang csillapodása -3 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Egyértelmű visszhang; Echo,	Élvezhet etlen
	25 ms	23	30	2	-
	50 ms	23	24	8	-
	100 ms	16	21	17	-
	200 ms	17	16	22	-
Visszhang csillapodása -6 dB	Késleltetés	Semmi változás	Térbeliség; Első hu. tr	Egyértelmű viszhang; Echo,	Élvezhet etlen
	25 ms	24	29	2	-
	50 ms	28	22	4	-
	100 ms	30	17	6	-
	200 ms	24	18	12	-

4. vizsgálati pont.

Számolt impulzusok száma adott késleltetés és - 3 dB csillapítás esetén						Számolt impulzusok száma adott késleltetés és - 6dB-es csillapítás esetén					
5 ms	10 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms	5 ms	10 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms
1	4	2	2	2	2	3	1	2	2	2	2
2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	3	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	2	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
1	4	4	2	2	2	1	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2
3	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2

3	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	1	2	3	2	2	1	2	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	1	3	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	2	3	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2
Számolt impulzusok száma adott késleltetés és - 3 dB csillapítás esetén						Számolt impulzusok száma adott késleltetés és - 6dB-es csillapítás esetén					
5 ms	10 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms	5 ms	10 ms	25 ms	50 ms	75 ms	100 ms
1	1	2	4	2	2	1	2	1	2	2	2
1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2
1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2
1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2
2	1	2	2	2	3	1	2	1	2	2	2
1	2	1	2	1	1	1	2	3	2	3	2
1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2
1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2
1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2

Irodalomjegyzék

- [1.] Tarnóczy T. ; Teremakusztika I., Akadémia Kiadó (1986.)
- [2.] Tarnóczy T. ; Teremakusztika II., Akadémia Kiadó (1986.)
- [3.] Sirkó Zs. ; Kép és Hangtechnika, (1981.)
- [4.] Reis F. ; Építészeti akusztika, BME (1994.)
- [5.] Tarnóczy T. ; Zenei akusztika, Akadémia Kiadó (1982.)
- [6.] William A. Yost and Sandra J. Guzman; The precedence effect, (1999.)
- [7.] Tarnóczy T. ; Hangnyomás, hangosság, zajosság, Akadémia Kiadó (1984.)
- [8.] G. Kropuenske; Measuring Speech Intelligibility, (2008.)
- [9.] Dr.-Ing. Ivar Veit; fordító: Szabó György, Műszaki Akusztika, Műszaki Akusztika (1977.)
- [10.] Reis F. ; Az épületakusztika alapjai; TERC (2003.)
- [11.] Vajda Zoltánné, Szakács Gy. ; Passzív akusztikai védelemre alkalmas épületszerkezetek (1989.)
- [12.] Szirtes I.; Akusztika – misztikum és tudomány, cikk, Diszkrónika+stage-ből (2005.)
- [13.] Andreas Holzinger: A multimédia alapjai, Kiskapu (2004.)

- [14.] Gósy m.: Tanulmányok a beszédprodukció és a beszédpercepció területeiről MTA Nyelvtudományi Intézet (2005.)
- [15.] Fürjes A. T. : A teremakusztikai tervezés szerepe az építészeti akusztikában, céges kiadvány (2003.)
- [16.] Szigetvári A. : Az elektroakusztikus és számítógépes zene története és irodalma (2006.)
- [17.] Szirtes I. : Akusztikai Szemle, folyóirat 2005-ös évi 1.-4. szám (2005.)
- [18.] <http://www.teletechnika.hu/> (2009. szep.)
- [19.] <http://www.isover.hu/> (2009. szep.)
- [20.] <http://mek.niif.hu/04900/04996/html/leonardoirasai0010.html> (2009. szep.)
- [21.] <http://gain11.wordpress.com/> (2009. okt.)
- [22.] <http://www.acousticsciences.com/> (2009. okt.)
- [23.] Wersényi Gy. : A térbeli hallás, BME-TTT egyetemi segédlet (1998.)
- [24.] <http://alpha.tmit.bme.hu/speech/> (2009. okt.)
- [25.] Raum- und Bauakustik (1999.)
- [26.] Die Ära von Walter Reichardt an der TH/TU Dresden (2003.)
- [27.] Kojnok J. : AKUSZTIKA és ZAJSZENNYEZÉS diasorozat (2005.)

[28.] <http://www.kobakbt.hu/jegyzet/AudioTechnologia/AudioTechnologia.htm>
(2009. okt.)

[29.] http://alpha.tmit.bme.hu/speech/publ_ikta.php