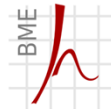


Teremakusztika

Augusztinovicz Fülöp

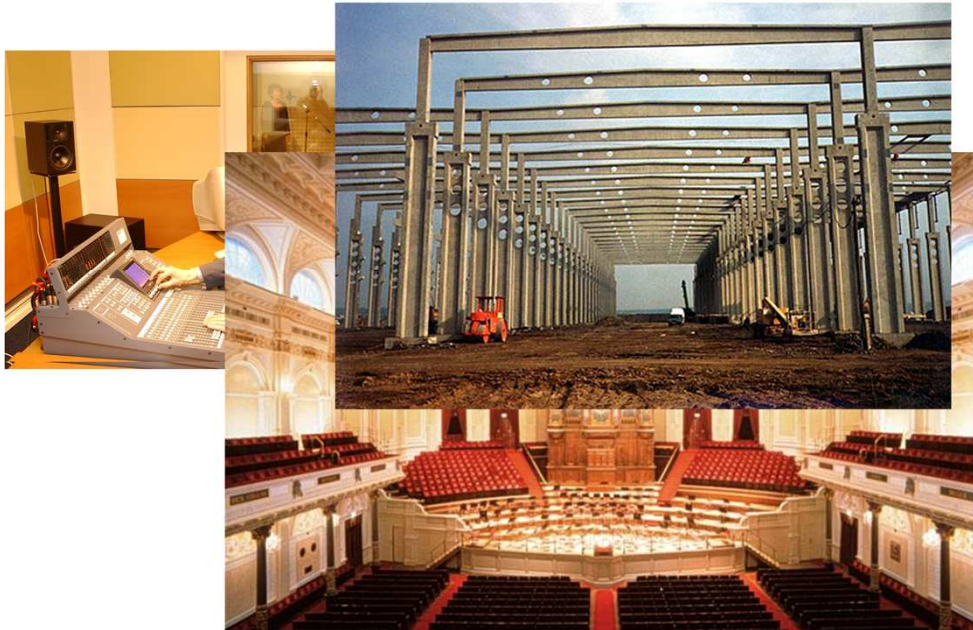


Híradástechnikai Tanszék

Tartalom

- A (hullámhosszhoz viszonyított) kis és nagy terek fogalma
- Közvetlen és diffúz hangtér
- Utószengés fogalma és jellemzői
- A hangelnyelés és utószengés összefüggései

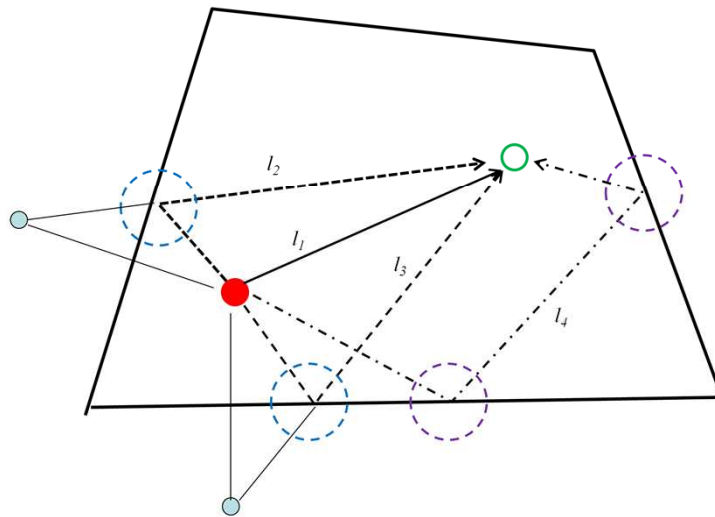
Mi a kicsi, és mi a nagy?



A bemutatott képeken a terek jellemző méretét a működési frekvenciatartomány középértékéből számított hullámhosszhoz viszonyítva beszélhetünk kis térről (stúdió), nagy teremről (hangversenysterem) vagy lapos, hosszú teremről (ipari csarnok).

A teremakusztika a kis terekre hullámelméleti módszereket, a nagy terekre statisztikus elméletet alkalmaz, a hosszú terekre különböző tapasztalati közelítéseket használhatunk. Kis terekben a terem sajátfrekvenciái ($\cong$ rezonanciái) fontos szerepet játszanak,. Nagy termekben a sok visszaverődés miatt sajátfrekvenciákat nemigen figyelhetünk meg, a számos visszaverődés a hangenergia nagyjából egyenletes térbeli eloszlását eredményezi – az ilyen teret diffúznak nevezzük.

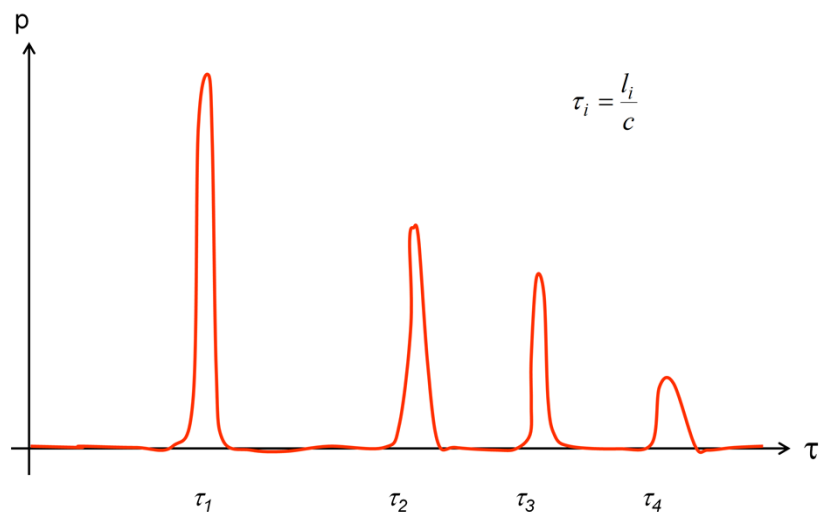
Visszaverődések



Zárt terekben a merev falakon történő visszaverődések a hanghullámok irányát és fázisát változtatják meg, és mindig energiavesztéssel járnak, amit hangelnyelésnek nevezünk.

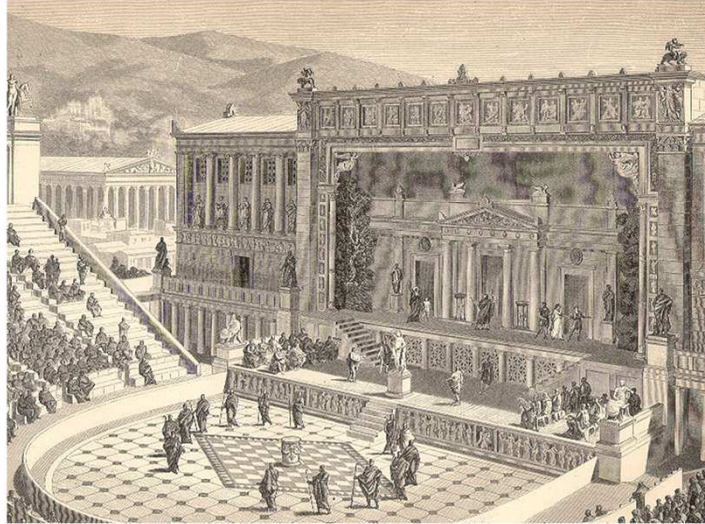
A visszaverő felületek úgy viselkednek, mintha mögöttük egy-egy tükörforrás működne. Az egyes visszaverődésekkel létrejövő hangutak hossza egyre nő, ezért a hullámok amplitúdója csökken.

Leíró legfőbb jellemző: impulzusválasz



Az egyes visszaverődésekhez időben egyre később beérkező és – a gömbhullámok $1/r$ terjedési törvénye miatt – egyre csökkenő amplitúdójú hullámok tartoznak, amit az impulzusválasznak nevezett függvény (egységnyi energiatartalmú, elvben végtelen rövid időtartamú gerjesztő impulzusra adott válasz) jellemez.

Visszaverődések szerepe az ókori színházakban: már a régi görögök is...



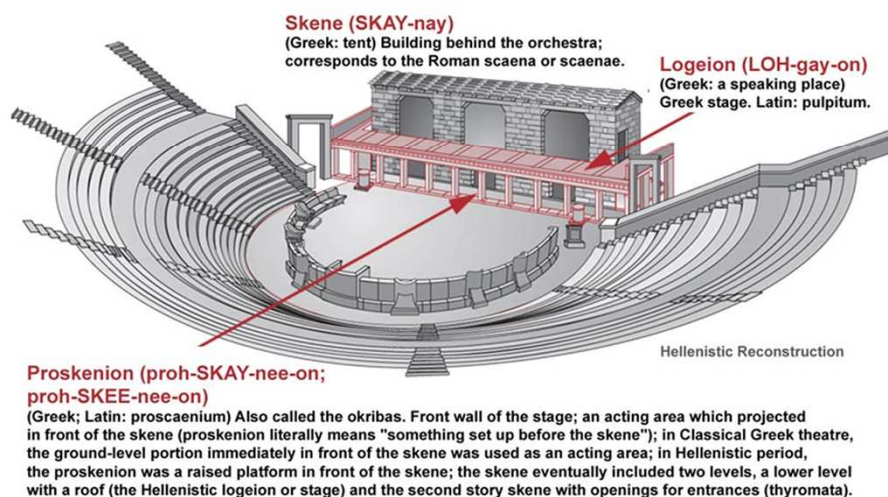
A visszaverődéseket már az antik színházépítők is ismerték és ki is használták. A bemutatott kép az athéni Dionüszosz-színházat eredeti állapotában mutatja, egy XIX: századi szerző feltételezése alapján (Forrás: *Pierers Konversationslexikon*, herausg. von J. Kürschner. 7. Auflage, Deutsche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1891).

Visszaverődések szerepe az ókori
színházakban: már a régi görögök is...



Ugyanaz, mai állapotában.

A görög színházak elemei és szerepük

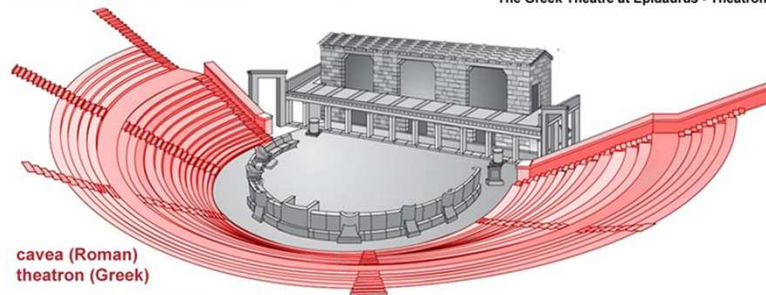


Az ókori görög színházakban a játék más volt, mint a mai színházakban. A színészek alig mozogtak, szerepeiket álló helyzetben, a Logeion-nak nevezett építményen („ahol beszélnek”) mondták el, és itt helyezkedett el a beszédkórus is. A logeion mögé épített szerkezet eredetileg egy öltözősátor volt (szkéné = sátor), amit később épített szerkezettel helyettesítettek, hogy az arról visszaverődő hangokat is hasznosítsák. Fontos akusztikai szerepe van még a középen elhelyezkedő kör alakú térnek (orkhésztra – „ahol táncolnak”) is, ami egyébként a táncosok számára szolgált.

Nézőtér (theatron) [hangelhajlás, -elnyelés]



The Greek Theatre at Epidaurus - Theatron View



A nézőtér folyamatosan emelkedik, hogy mindenki lássa a színészeket, ki tudják használni az emelkedő felület mellett felfelé áramló meleg levegő hangerősítő hatását és további visszaveréseket vigyenek be a hangterjedés útjába.

Nézőtér

- Orkhésztra (a táncosok helye): talajvisszaverés!



Theatre at Priene, Turkey - Orchestra Detail



Theatre at Delphi, Greece - Orchestra Detail



Theatre at Epidauros, Greece - Orchestra Detail



Theatre of Dionysus, Athens, Greece - Orchestra Detail

Négy, viszonylag jó állapotban fennmaradt antik színház: a priénéi, a delfi, az epidauruszi és az athéni színház mai állapotban.

Maszk

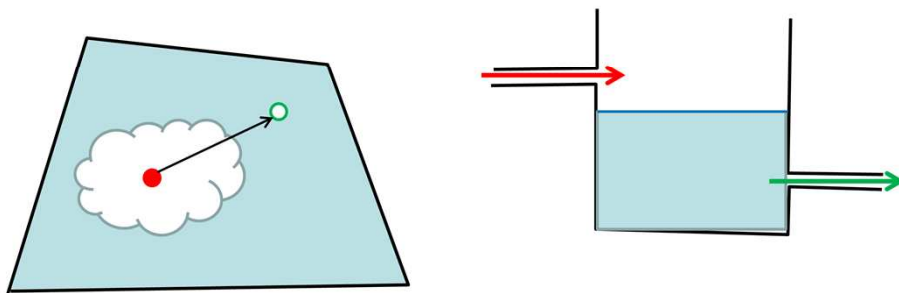
- maszk: hangerősítő, impedanciaillesztő elem



A görög színészek vagy tragikus, vagy komikus szerepeket alakítottak. A nagyméretű színházakban a mimika eszköztárát nem használhatták, ezért a játszott karaktert maszkkal fejezték ki. A maszkok papírmaséból vagy fafaragással készültek, és a szemléltetésen kívül fontos akusztikai erősítő szerepük is volt a száj körül kialakított tölcsér révén.

A visszaverődések leírása / 1

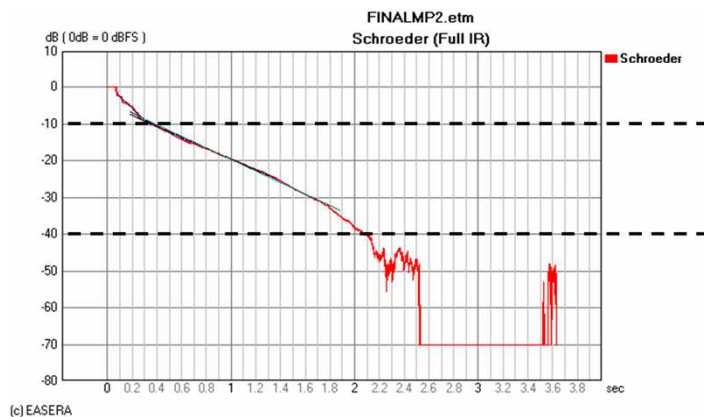
Energiaviszonyok figyelembevétele: a forrás energiával tölti a rendszert, a falak elnyelése pedig energiát von ki belőle



A hangvisszaverődések energianyelő szerepet játszanak, az elveszett energiát a hangforrás(ok) pótolják. Idővel a tér energiával töltődik fel, a betáplált és elnyelt energia pedig egyensúlyba kerül, amit egy tartályba befolyó és onnan kifolyó vízzel szemléltethetünk.

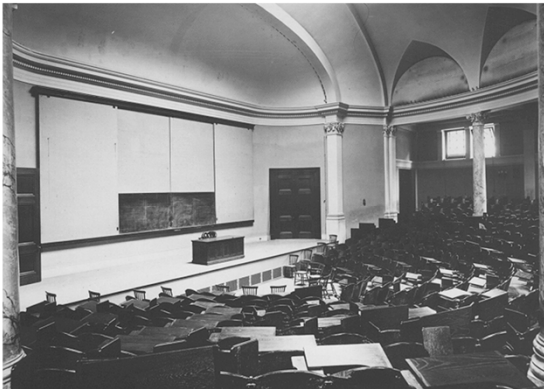
A visszaverődések leírása / 2

Az utózengési idő fogalma: az az időtartam, ami alatt a hangtér energiatartalma milliomodrészére csökken. Ez hangnyomásszintben kifejezve 60 dB-es csökkenésnek felel meg.



Ha a hangforrást kikapcsoljuk, a térben felhalmozódott energia lassan elfogy: ez a folyamat az *utózengés*. Az utózengési folyamat már nem függ a gerjesztéstől (hangforrásoktól), csak a terem tulajdonságaitól, ezért – viszonylag - jól használható a terem jellemzésére. Mérése minden teremakusztikai vizsgálat alapját képezi, de a termék részletes minősítéséhez nem elegendő. Mérése mesterséges hangimpulzussal (riasztópisztoly, szikraköz), véletlen zajjal, seprert szinusszal vagy álvéletlen jelsorozattal történhet.

A modern teremakusztika megalapítója



Fogg-előadóterem

W. C. Sabine (1868-1919)



A modern teremakusztika megalapítója, Sabine nagyon egyszerű eszközökkel: orgonasíppokkal és stopperórával jutott el az utózengési idő számítására alkalmas első összefüggéshez, amit a Fogg-előadóterem nagyon rossz akusztikájának vizsgálata és javítása kapcsán ismert fel.

Utózungési idő

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{R} \cong 0.16 \frac{V}{A\bar{\alpha}} = 0.16 \frac{V}{A_1\alpha_1 + A_2\alpha_2 + \dots + A_n\alpha_n}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A_1\alpha_1 + A_2\alpha_2 + \dots + A_n\alpha_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i\alpha_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$$R = \frac{A\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \cong A\bar{\alpha}$$

- Befolyásoló paraméterek:
 - egyenes arányossággal: terem V térfogata
 - fordított arányossággal: átlagos hangelnyelési fok, $\bar{\alpha}$ és a határoló felületek összege, A

Az R teremállandó kis átlagos hangelnyelési fok esetén a határoló felületek összege és az átlagos hangelnyelési fok szorzatával egyenlő, amit egyenértékű elnyelő felületnek is nevezhetünk (valahány m²–nyi, 100 %-os elnyelés). Az átlagos hangelnyelési fok a különböző elnyelési fokkal rendelkező anyagok frekvenciafüggő jellemzőiből, a felülettel súlyozva számítható.

Teremállandó

19. táblázat A teremállandó átlagos értéke különféle térfogatú és rendeltetésű termekre

Térfogat [m³]	$\bar{\alpha} = 0,35$ (Előadó- terem)	$\bar{\alpha} = 0,3$ (Film- színház)	$\bar{\alpha} = 0,2$ (Színház, opera)	$\bar{\alpha} = 0,15$ (Hangver- senyterem)	$\bar{\alpha} = 0,07$ (Templom)
100	150	—	—	—	—
200	230	—	—	—	—
400	350	280	—	—	—
700	400	350	170	—	—
1 000	650	500	250	190	—
2 000	1150	900	450	350	160
4 000	1650	1400	700	550	240
7 000	2300	1900	900	710	320
10 000	2900	2400	1200	950	430
20 000	—	3800	1900	1430	640
30 000	—	—	2500	1900	860
40 000	—	—	—	2400	1000

228

Teremállandó:

$$R = \frac{A\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \cong A\bar{\alpha}$$

Elnyelési fokok értéke

- Tarnóczy: Teremakusztika
Műszaki Könyvkiadó, 1964.

23. táblázat Felületek, vakolatok és természetes anyagok elnyelési foka

Megnevezés	Vastagság [cm]	Frekvencia [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Öntött beton	—	0,010	0,012	0,016	0,019	0,023	0,035
Zománcsal festett beton	—	0,009	0,011	0,014	0,016	0,017	0,018
Gumiszőnyeg betonon	0,5	0,04	0,04	0,08	0,12	0,13	0,10
Linoleum betonon	0,2	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Szőnyeg betonon	1,2	0,09	0,06	0,24	0,24	0,28	0,11
Likacsos salakbeton	2,5	0,15	0,21	0,43	0,37	0,39	0,51
Meszeit téglaífal	—	0,012	0,013	0,017	0,020	0,023	0,025
Meszeitlen téglaífal	—	0,024	0,025	0,031	0,042	0,049	0,070
Sima művakolat	1,25	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	—
Gipszvakolat üreges téglaífal	1,9	0,013	0,015	0,020	0,028	0,040	0,050
Gipszvakolat faléceteten simítással	1,9	0,020	0,022	0,032	0,039	0,039	0,028
Mészvakolat téglaífal	1,25	0,020	0,035	0,050	0,065	0,040	0,045
Mészvakolat falra erősített fémhálón	1,9	0,038	0,050	0,060	0,085	0,043	0,056
Akusztikai vakolat téglaífalon, gyöngén fröcsköltve	1,25	0,14	0,18	0,22	0,31	0,37	—
Akusztikai vakolat fémhálón	1,9	0,31	0,39	0,42	0,47	0,50	0,45
Fapadió	2,2	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	—
Parafaréteg betonon	1,8	0,08	0,10	0,10	0,20	0,22	0,22
Szőrnyemez	2,5	0,12	0,32	0,51	0,62	0,60	0,56
Fényezett falemez	1,0	0,12	0,11	0,06	0,08	0,09	0,11
Vászor a faltól 15 cm-re	—	0,10	0,12	0,25	0,33	0,20	0,35
Szőnyeg nyemezrétegen	1,0 + 0,3	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Farostszövet ráncolva	—	0,03	0,12	0,15	0,27	0,37	0,42
Báronyfüggöny ráncolva	0,3	0,05	0,22	0,28	0,38	0,50	0,64

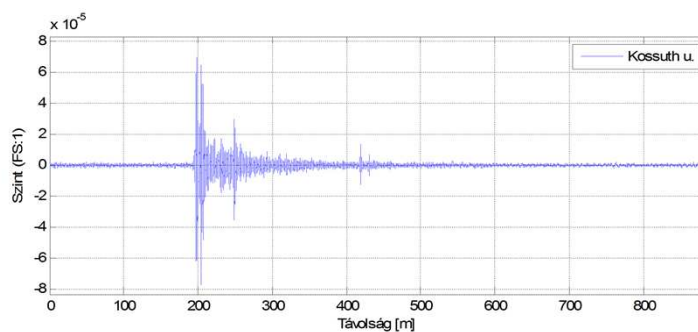
A visszaverődések leírása / 2

- Az utózengési idő problémája:
 - nem írja le helyesen az utózengési folyamat részleteit (csak makroszintű jellemző)
 - mérése éppen ezért nem megbízható
- Helyette:
 - impulzusválasz (impulse response, Impulsantwort) v. súlyfüggvény

A visszaverődések helyett ma egyre inkább az impulzusválaszt szokás mérni, mert abból sok információt nyerhetünk: számítható az utózengési idő, a frekvenciaátviteli függvény, és következtetni lehet a terem esetleges akusztikai hibáira is (zavaró többszörös visszhangok, belengési jelenségek a lecsengési folyamatban stb.)

Impulzusválasz / 2

- Fogalma: Dirac-impulzusra adott válasz
- Mérése
 - (régében) pisztollyal
 - szikraforrással
 - véletlen zajjal
 - seprő szinusszal



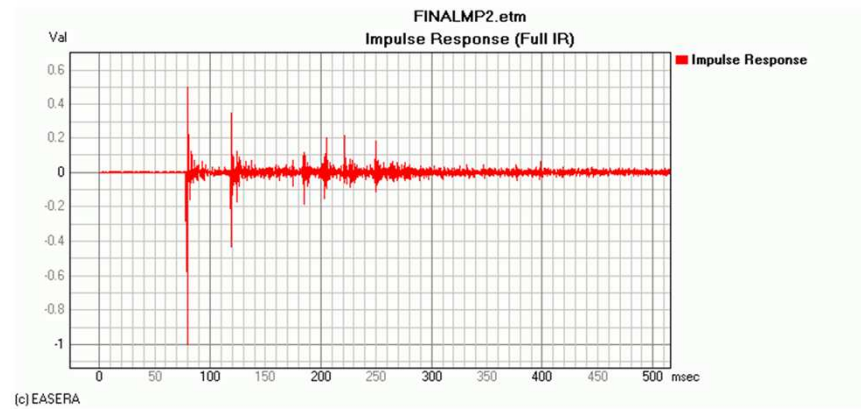
A bemutatott, valóságos körülmények között mért impulzusválaszt egy völgyben fekvő község (Sajóbábony) két pontja között mértük. Szemléltetés kedvéért az abszcisszát nem s-ban, hanem m-ben skáláztuk, így könnyebb felismerni a völgyet határoló két domboldal okozta visszaverődéseket.

Impulzusválasz / 3



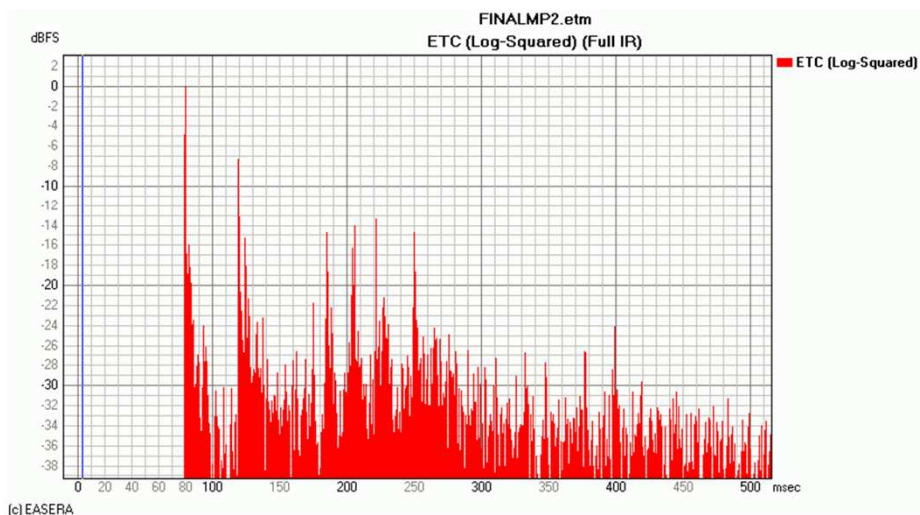
A hangminta egy merev falakkal határolt, nagy méretű és az árkádok mögött csatolt akusztikai tereket is magában foglaló terem impulzusválasza.

Mért impulzusválasz



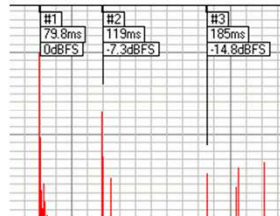
Egy másik teremben mért, egymástól jól elkülönülő visszhangokat mutató impulzusválasz példája.

Echogram



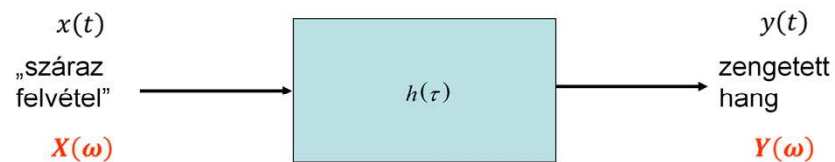
Az echogramot (ETC = Energy time Curve) az impulzusválasz négyzetre emelésével és logaritmálásával kapjuk. Termék akusztikai minőségének megítélésére különösen alkalmas. (A bemutatott echogram nem túl kedvező képet mutat: a visszaverődések nem egyenletesek, néhány kiemelkedő visszhang között nagy űr tátong, ami az egyes visszhangokat jól hallhatóvá és feltehetőleg zavaróvá teszi.)

Echogram / 2



Az egye visszaverődések ezen az ábrán tisztán azonosíthatók.

Zengetés



$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)$$

A mesterséges zengetés azon az elven alapszik, hogy a termék impulzusválaszának Fourier-transzformálásával a bemenő és kimenő jelek spektruma igen egyszerű kapcsolatba hozható. A mért vagy szimulált impulzusválaszt és a „száraz”, visszhangmentes bemenő jelet transzformálva, összeszorozva és a kapott választ visszatranszformálva megkapjuk azt az időfüggvényt, amit az adott száraz hangesemény kisugárzásakor észlelnénk az impulzusválasszal jellemzett térben vagy teremben.

Szöveg zengetése

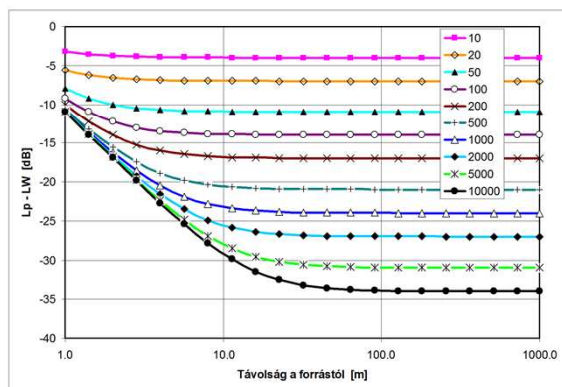
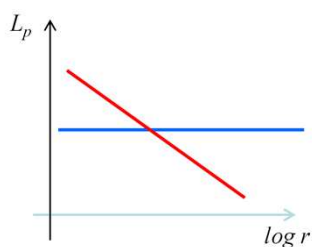


Példa a fertőrákosi kőfejtőben végzett méréssel mesterségesen megzengetett vers-előadásra.

A hangtér részei

- Közvetlen hangtér és zengőtér

$$L_p = L_W + 10 \log \left(\frac{1}{4r^2\pi} + \frac{4}{R} \right)$$



Ha egy teremben elhelyezünk egy hangforrást és azt működtetjük, az energiaegyensúlyi állapot bekövetkezése után a teremben kétféle hangteret különböztethetünk meg: a forrás közelében a közvetlen hangtér, távolban pedig a diffúz hangtér lesz uralkodó. A kétféle hangtér szintje a forrástól mért távolság logaritmusának függvényében egy ferde és egy vízszintes egyenessel szemléltethető, ami a fenti egyenletben a logaritmuson belüli két törtnek felel meg. A kétféle hangnyomás eredője a teremállandóval paraméterezve a jobb oldali görbeseregen látható.

Teremakusztikai modellezés



Fig. 1. Schlieren photograph showing reflections of ultrasound wave fronts in a sectional model of the Gewandhausaal in Leipzig. (Teddington – from Engl. [2]).

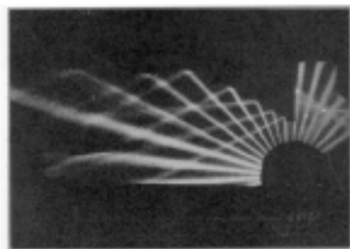


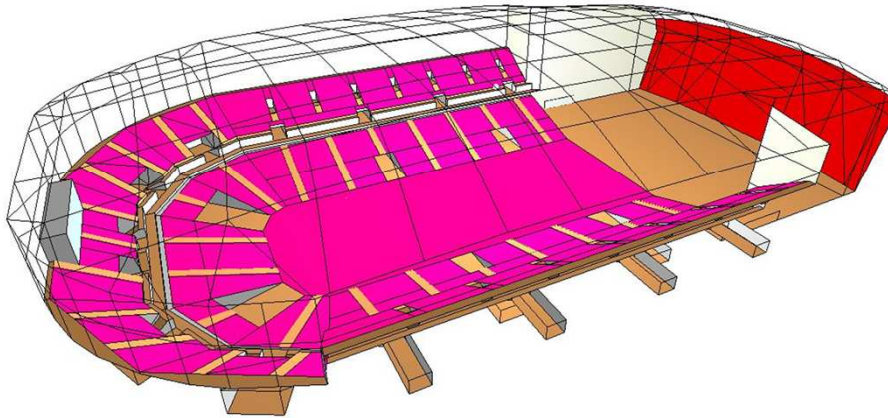
Fig. 2. Light beam investigation of reflections in a sectional model of Okuma Memorial Auditorium. (Satow, 1929 – from Knudsen [4]).



Fig. 5. View from a 1:10 scale model of the Major Hall for the Sydney Opera House (not the final design, but the last Utzon design around 1966). ([11] fig. 4.10).

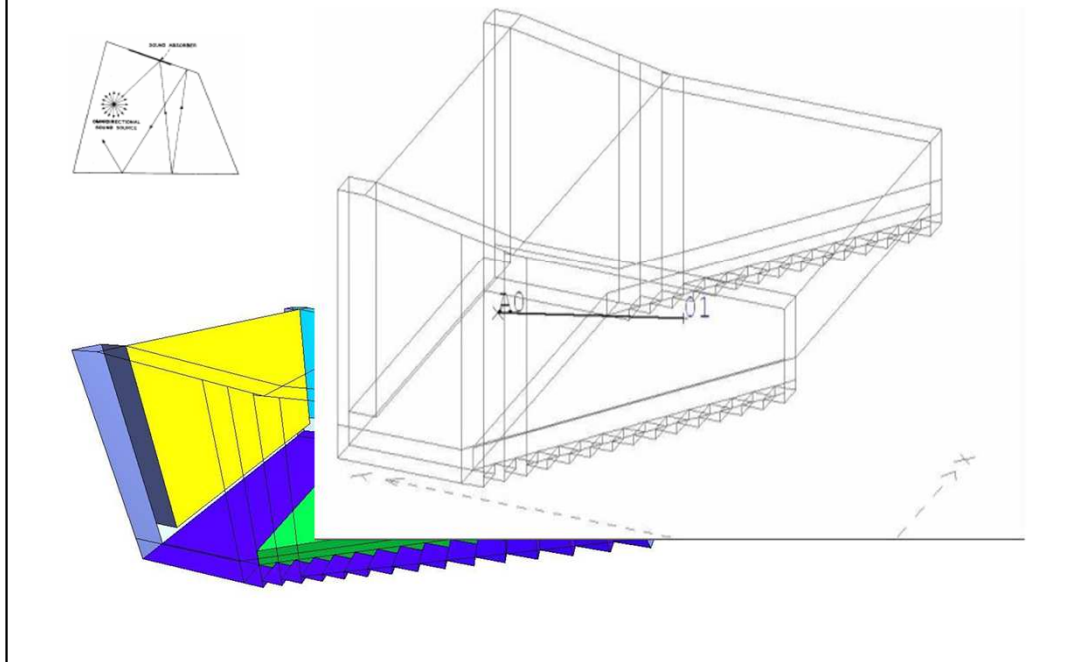
A teremakusztikai modellezés lehet egydimenziós és térbeli, a terjedést lehet optikai módszerekkel szemléltetni és valóságos, de a modell léptékének megfelelő arányban frekvenciában feltranszformált hangjelekkel, akusztikai módszerekkel vizsgálni.

Számítógépes modellezés



A mai, korszerű teremakusztikai elemzéseket számítógéppel segített, a hangsugarak visszaverődését tükörforrások bevezetésével követő szimulációs módszerrel végezzük. Az ábra a Papp László sportaréna modelljét mutatja, a különböző színek különböző hangelnyelési fokkal rendelkező anyagokat, ill. felületrészeket jelképeznek.

Számítógépes modellezés



Sugárkövetéssel meghatározott hangutak egy mozi nézőterén.