

Akusztika – misztikum és tudomány

Mindennapi életünkben számtalanszor kerülünk kapcsolatba szép és jó, illetve rossz élményeink révén e fogalommal. Természetesnek vesszük létezését, hiszen fülünk az egyik alapvető érzékszervünk, de vajmi keveset gondolunk tudatosan a mögötte megbúvó komplex tudományra.

Akusztika, más néven hangtan, a hang keletkezésének, terjedésének, elhalásának és ennek az élő szervezetre kifejtett hatásával foglalkozó tudomány.

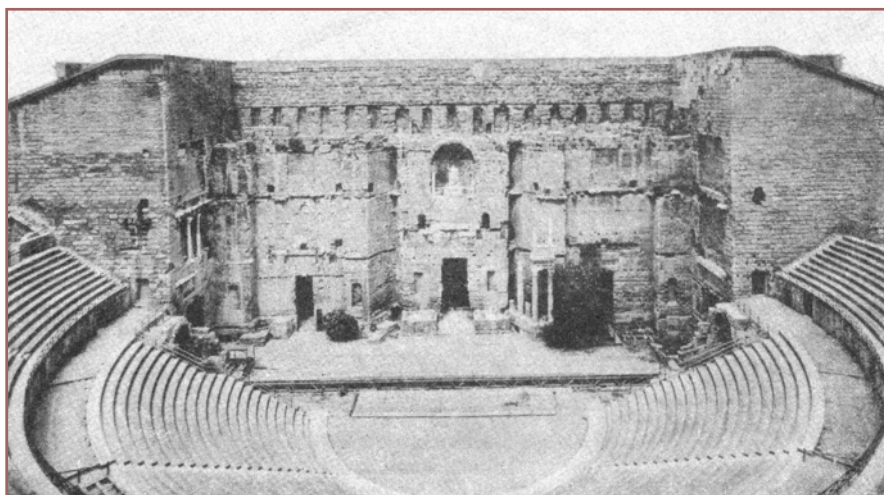
Egy önmagában nagyon szerteágazó, számos fejezettel rendelkező és máig sok kérdést felvető tudomány. A fizikai, az orvosbiológiai, a nyelvészeti, a zenei, az építészeti vonatkozásai mind mutatják, hogy nem kis szelete életünknek e fogalom. Ami nem csak a hallható hangok tanulmányozására szorítkozik, hanem a néhányszor tíz másodperces rezgésektől a másodpercenkénti százmilliárd rezgésig terjed. Tehát a föld rezgéshullámaintól a zenén keresztül a hőrezgésekig minden ide tartozik, függetlenül az átviteli közegtől. Minden, ami fizikailag felfogható mechanikai hullám. Ez egy igen nagy tartomány, ami nagyjából 12 nagyságrendet fog át (az arány billioszoros). Ebből a hallható hangok tartománya csak nagyjából 3 nagyságrend (az arány ezerszeres). Azaz a fizikai hangok tartományából a hallható hangoké csak egymilliárdnyi részt tesz ki. A hallható hangok akusztikáját tovább elemezve eljuthatunk az épületakusztikához, ami a rezgéscsökkentéssel, a zajcsökkentéssel, a belső és külső terek akusztikai minőségével foglalkozik. A zenei akusztikához, ami a zeneelmélettel, a hangszerek fizikájával, a pszichoakusztikához, ami a fülünk működésével és az agyi érzékeléssel, és nem utolsósorban a műszaki akusztikához, ami a fizikai haladásunk révén új lehetőségeket teremtve a zene közvetítésével és ennek

műszaki megoldásaival foglalkozik. Azokhoz a területekhez, amelyek egy zenész vagy zenével foglalkozó embernek fontosak lehetnek.

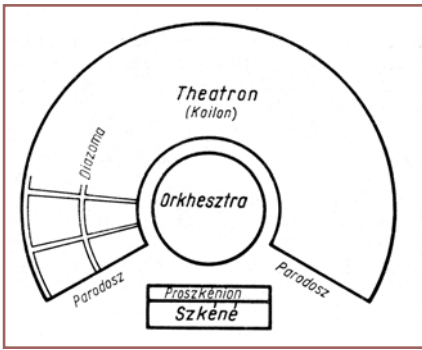
Az akusztika kialakulása a történelem régi korszakaiba nyúlik vissza. Már az ókorból találunk olyan építményeket, amik a tapasztalati úton megszerzett tudásnak a tudatos akusztikai kivitelezésére utalnak. Legelőször felismerték, hogy a szabad térben, sík felületen a beszéd nem túl nagy távolsáig érhető, hogy az emelkedők aljából a hang fölfelé sokkal érthetőbb, és messzebb hallható. Erre példa, hogy Krisztus a Genezáreti-tórol szólt a környező domboldalon ülő sok ezer emberhez. Az ilyen és ehhez hasonló helyek kitüntetett szerepet játszottak a szónoklások és a néphez intézett beszédek alkalmával. Később az ókor hajnalán rájöttek, hogy a szabad térben folyó színházi játékokat az épületek falai nem csak esztétikailag, hanem akusztikailag is

fokozzák. Ezek a tapasztalati megfigyelések vezettek az ókori színházak kialakulásához. Szintén az ókor nagy felfedezése a félkör alakú emelkedő ülésrend (*1. kép*). Rájöttek, hogy az érthetőséget a távolság szabja meg, és ezt a közönség emelésével javíthatják. Erre igen ékes példa a Delphói jósa (5000 fő), az Akropolisz alatti Dionüosz-szentély (17 000 fő).

Itt már megtalálhatóak a görög színház alapvető újításai. A kőborítás, kör alakú orkhesztra, az eleinte fa, később kőből épült öltöző, a szkéné. Az emelkedő ülésrendű nézőtér, a theatron. Később a szkéné kiegészült a proskénionnal, ami maga a színpad volt (*1. ábra*). Fontos, hogy a proskénion járófelülete mindig fából készült. Mint napjainkban. A fapadlójú dobogó akusztikailag kitűnő megoldásnak bizonyult. Magassága 3 m, de a római korban már csak 1,5 m. A kőből épült szkéné homlokfalai, mint hatalmas visszaverő felületek a nézőközönség felé irányították a színészek hangját, hasznosítva a hátsó visszaverődéseket. Épp ezért a proskénion nem lehetett túl mély, átlagosan 4-6 m, hogy ne alakulhasson ki zavaró visszhang. Az orkhesztra kőpadlózata is a hang visszaverésére és szétszórására volt hivatott. Mikor nagyszámú kórus szerepelt a darabban, az orkhesztra



1. kép: kőszínház



1. ábra: a kőszínház alaprajza

felületét szalmával szórták fel, hogy csökkentsék a visszaverődéseket. A theatron alakja is az emberi beszéd sajátosságainak megfelelően alakult. Az emberi beszéd erős irányítottsága miatt, a megfelelő érthetőség és hangerő elérésére a színház oldalsó és a hátsó részéről ki kellett zárni a nézőközönséget. Így alakult ki az ellipszis alakú nézőtér, aminek 25-30 fokos emelkedési szöget adtak. Az egymást követő szintek emelkedési szöge is egyre meredekebb volt. Érdekes, hogy a theatron kőszékeit úgy alakították ki, hogy szétszórják a hangokat, megakadályozva a visszhangok keletkezését. A sorok alá kővázákat helyeztek rezonátorok gyanánt, javítva a sorok hangerejét és érthetőségét.

A római színházak a görög elődjeihez képest jelentősen megváltoztak. Ezek a változások sokban javítottak, de sokszor rontottak az akusztikai viszonyokon. A theatron és az orkhesztra félkör alakúvá vált, így a közönség közelebb került a színpadhoz. Később az orkhesztra is nézőtér lett, ezzel elvesztve hasznos visszaverő jellegét.

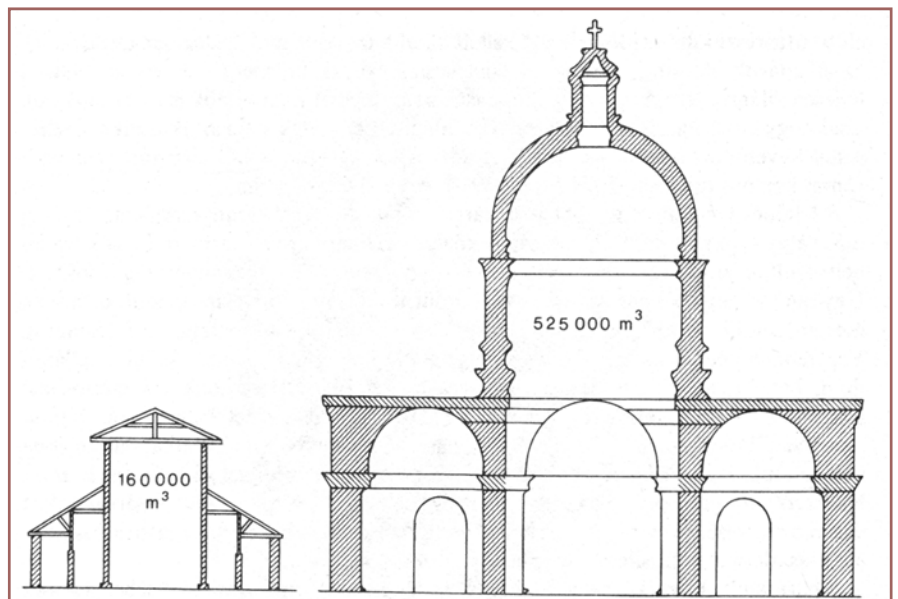
A színház teljes beépítésével hatalmas hangvető felületek keletkeztek. Ezek jelentősen növelték a hangeloszlást. E kor sajátossága a hatalmas méretek megjelenése (20 000 ember befogadása). A színpad szélessége elérte a 100 m-t, mélysége akár 25 m is lehetett, ami nem szolgált az akusztika javulására. Ezek a méretek inkább már csak látványosságot jelentettek és nem a tökéletes akusztikai viszonyokat. Megjelent a legfelső sorok mögött az árkados tetőszerkezet, ami a felső sorok érthetőségét és hangerejét javította, kihasználva e falak visszaverő képességét. Az orkhesztra eltűnik, páholysorok alakulnak, és megjelenik a függöny. Lassan eljutunk az egész színház teljes befedéséhez,

ahhoz az arculathoz, ami máig megmaradt. A görögök és a rómaiak is már szétválasztották a különböző célra szolgáló építményeket. Rájöttek, hogy egy univerzális épület nem építhető. Színházak, odeionok, arénák jelentek meg. Ezek kiegészítették egymást. A Colosseum 50 000 fős befogadó képessége már nem tette lehetővé az akusztikai elvárásoknak való megfelelést. Itt már a látványosság kapott fő szerepet. A rómaiaknak köszönhetjük a zárt terű vásárcsarnokokat. Itt tartották a népgyűléseket. A jó kialakítású, jó arányú, sík mennyezetű épületek képezik a későbbi jó akusztikájú előadótermek alapjait. Később ezekből fejlődött ki a kereszténység bazilikája.

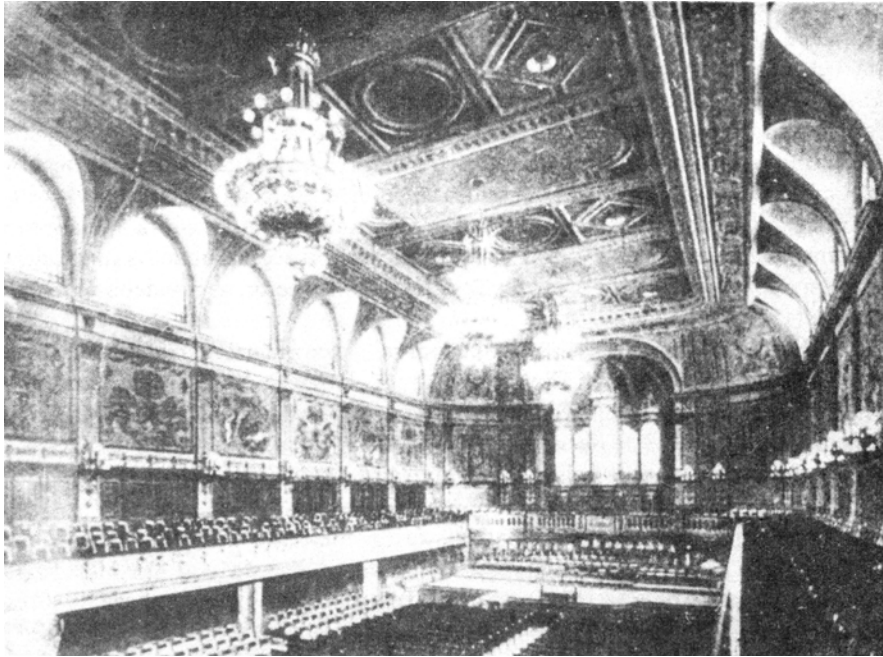
Az akusztika az ókorban szinte teljesen a színházépítészetre korlátozódott. A középkorban ez átalakult a templomépítészetté. A kereszténység elterjedésével a középkor uralma megsemmisítette a színház intézményét. Az újonnan épülő templomoknak és bazilikáknak a gyülekezethez szolgáló prédikációk és a közös énekek által támasztott követelményeknek kellett megfelelniük. Itt a másfajta érthetőség és az utózenge volt a meghatározó. A román stílusú – a későbbiekhez képest kisebb építmények – még megfelelő akusztikával bírtak, de a gótikus stílusnál megjelenő kupolák nagyban rontottak az adottságokon. Az építészet fejlődésével megjelenő hatalmas terek kezeletlen hangzást eredményeztek. A reneszánsz idején a még nagyobb méretek miatt az akusztikai viszonyok tovább romlottak (2. ábra).

A középkorra jellemző tudományos kutatás hiánya miatt jó pár évszázadig semmi fejlődés nem jelentkezett. A XVI. században jelentek meg az első zenei célra átalakított templombelsőök, dómok. Egyik ilyen híres dóm a lipcsei Thomaskirche, ahol számos művét adta elő J. S. Bach is, aki híres volt akusztikai igényességére. A XVII. században újra feléledt a színházépítészet. Ezek a színházak is alaprajzukat tekintve görög-római kinézetűek, de a nézősorokat egymás fölé helyezték el, és teljes tetőszerkezetet kaptak. Megjelent a kamarazeneeszeknek helyet adó zenekari árok is, és a forgószínpad. Ekkora a színházak már a ma is meglévő formát öltötték. A zene meghatározó jelleget adott a színházaknak. Sorra felépültek az első operaházak és hangversenytermek. Egészen a középkorig nem tudunk tudományos alapossággal megírt akusztikai művekről. Elsőként Galilei volt, aki forradalmasította a tudományt. A XVII. század közepén Athanasius Kircher-Phonurgia Nova című műve volt az, ami teljesen új alapokra helyezte az akusztikát. E mű tartalmaz először geometriai levezetéseket, hangterelés és hangvezetési terveket, foglalkozik a visszhangokkal, és az utózengevel. A hang hozzávetőleges terjedési sebessége is ekkor határozódik meg Mersenne, Gassendi segítségével.

A XVIII-XIX. században épült a legtöbb színház, opera és hangversenyterem. Sajnos ezekből napjainkra szinte egyik sem maradt fent (2. kép). Jellemzőik: hatalmas mé-



2. ábra: kis és nagy templom



2. kép: Lipcsei Gewandhaus

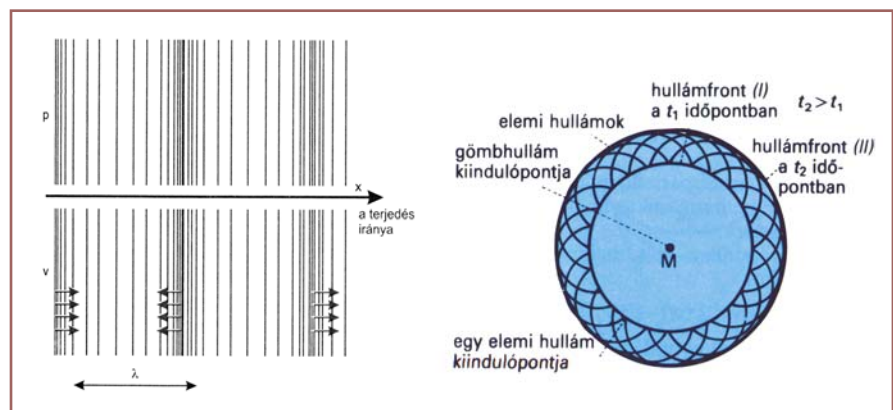
rettek, zenei célú, tudatos teremki-alakítás, a felhasználási területek szétválasztása és ebből fakadóan a jó akusztika.

Korunkban a termek sok tekintetben eltérnek a korábbiaktól. Mind méretükben, mind rendeltetésük szerint, mind kialakításukban. Sajnos rendszerint anyagi okokból megpróbálnak többcélú termeket építeni. Mint már láthattuk azonban, ez vagy egyáltalán nem lehetséges vagy igen nagy anyagi és eszközráfordítással és nem utolsósorban megfelelő személyzetrel próbálható meg, amire igen kevés jó példa van. Számítalan olyan eset van, amikor az építészetileg, funkcionálisan és anyagilag is megfelelően kialakított termekben az elektronikus hangosítást hívják segítségül az amúgy rossz akusztika mellé, mint varázspálcát tekintik a problémák megoldásának és ez sem vezet jó eredményhez. Valamikor régen az akusztikát a gyakorlati szükségesség keltette életre, és most ugyanaz próbálja a háttérbe szorítani.

A szabadtéri hangterjedés vizsgálata rámutat számos olyan fontos terjedési tulajdonságra, amit a határoló felületek nélküli térben egyszerű példákön keresztül könnyebben érthetünk meg. A szabadtéri hangterjedés jellemzője, hogy a fizikai hang terjedését nem befolyásolja semmilyen elnyelő vagy visszaverő felület. A valóságban ez a legkevésbé teljesül (pl. a földfelszín

visszaverő tulajdonsága, a levegő hangelnyelése). Ha egy hangforrást helyezünk egy határoló felületek nélküli térbe, az hangteret létesít maga körül. A hangforrásra a ki-sugárzott hangteljesítménye (L_w), míg a körülötte kialakuló hangtérra a hangnyomás (L_p) jellemző.

A forrás teljesítményszintje az $L_w(\text{dB})=10 \lg(W/W_0)$ ahol a $W_0=10^{-12}\text{W}$, míg a térben kialakuló hangnyomás-szint $L_p(\text{dB})=10 \lg(p^2_{\text{eff}}/p^2_0)$ ahol a $p_0=2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ (ami a hallásküszöb értéke is egyben) képletek alapján megvizsgáljuk, figyelembe kell venni, hogy a hangforrás a tér mely részébe hangteljesítményének mekkora részét sugározza. Attól függően, hogy a hangforrásunk milyen kiterjedésű – a lesugárzott hullámhosszhoz viszonyítva –, beszélhetünk pontszerű és vonalszerű vagy felületi sugárzókról (3. ábra).

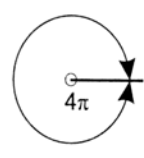
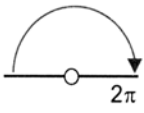
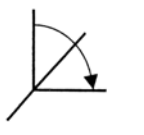
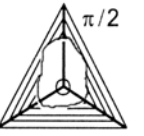


3. ábra: Pont- és vonalforrás

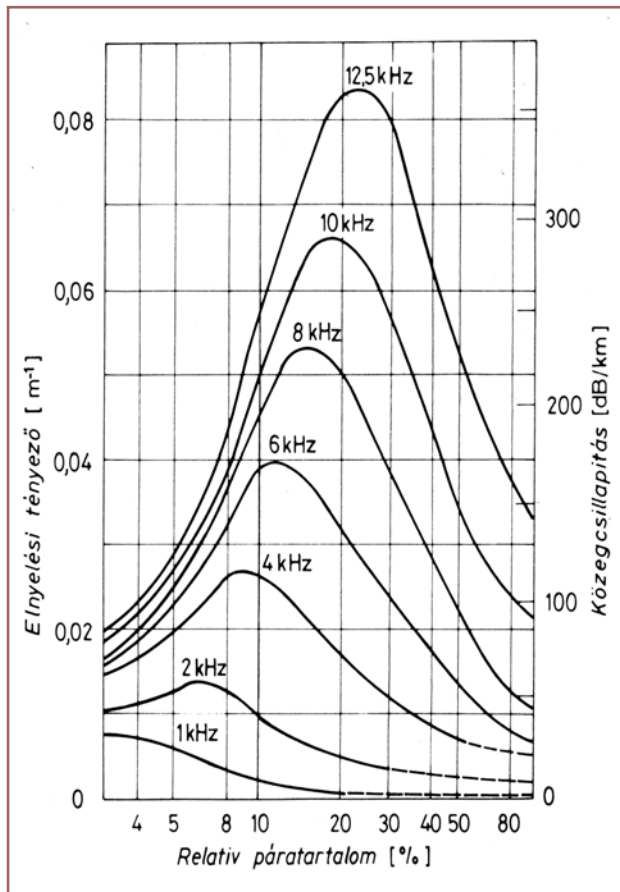
A pontszerű sugárzók a teljesítményüket a tér minden irányába gömbszimmetrikusan sugározzák. Irányítási tényezőjük 1. Ha a hangforrást valamilyen visszaverő felületre helyezzük (földfelszín) az irányítási tényezője 2 lesz, már csak a fél térbe sugároz. Ha a talajra merőlegesen emelt fal tövében helyezük el a hangforrást, akkor már csak a tér negyedébe sugároz és irányítási tényezője 4. Míg a három határoló felület találkozási pontjában, a sarokban elhelyezetté 8. Ez azt jelenti, hogy a sarokba elhelyezett hangforrás akkora hangnyomásszintet létesít, mint a 8xP teljesítményű teljes gömbsugárzó.

A 4. ábrán látható minden egyes térszög felezése 3 dB hangnyomásszint emelkedést eredményez. A térben kialakuló hangnyomásszint, pontsugárzók esetében a távolság megkétszerezésével 6 dB-lel csökken. Ha a sugárzónk azonos rezgésállapotú helyei a terjedés irányára merőleges síkot alkotnak, akkor sík vagy vonalsugárzóról beszélünk (pl.: autópálya).

A vonalsugárzókra is érvényesek a fentebb tárgyalt irányítási tényező változások. A lényeges különbség a távolság megkétszerezésénél jelentkezik, hiszen itt csak 3-4 dB lesz a hangnyomásszint csökkenés. A hangforrás hangteljesítményszintje és a tér hangnyomásszintje közötti kapcsolat függ a tér állapotától (hőmérséklet, páratartalom, szél). A levegőben egy hangforrás által keltett és tovaterjedő hang a levegőrészecskék sűrűlódása miatt csillapodik. Ezt a csillapító hatást a levegő hőmérséklete és relatív páratartalma befolyásolja. A hőmérséklet növekedésével és a relatív páratartalom csökkenésével a csillapítás növekszik, ami a mélyhangok esetében nem, de

Elrendezés vázlatja	Térszög
	4π
	2π
	π
	π/2

4. ábra: térszög a hangforrás helye alapján



5. ábra: a levegő hangelnyelésének függése a páratartalomtól és a frekvenciától

a magasaknál nagyobb távolságú terjedésnél frekvenciafüggő intenzitás csökkenést eredményez (5. ábra).

A levegőben a hang terjedési sebessége 15 °C-on 340 m/s, és a hőmérséklet növekedésével nő. Az általában előforduló nyomás és páratartalom változások a hang sebességére nincsenek számottevő hatással. A különböző hőmérsékletű légrétegekben a hang más-más sebességgel terjed. Két különböző hőmérsékletű közeg határfelületén mindig a hidegebb felé törik (6. ábra).

Az *a*-ábrán egy tavasszal bekövetkező esetet láthatunk, amikor a beszéd igen nagy távolságokra is hallhatóvá válhat, a hideg földfelszín feletti meleg légtömegeknek köszönhetően. A *b*-ábrán a különösen meleg nyári napokon szabadtéri előadásoknál bekövetkező esetet látjuk, ahol az embertömeg által sugárzott hő miatt a hang elhajlik a magasabban lévő hideg levegőrétegek felé. Ezért is tervezték például a görögök olyan meredeken a színházaiak üléssorait. A terjedésre hatása van a szélnek is. A szél irányából a hang terjedési sebességéhez a szél sebessége hozzáadódik, ezáltal megszébbre hangzik, míg vele szembe kivonódik, és a hang elhal. A szél felőli oldalon „süket” zóna is keletkezhet, ez a hatás azonban annyira időleges, hogy számításba vétele nem indokolt. Szabadtérben a hang terjedését a növényzet is csillapítja. Ez természetesen függ a növényzet fajtájától, az évszaktól, az aljnövényzet nagyságától. A kb. 50 m szélességű dús lombosított és aljnövényzetű erdősáv csillapítása 5-10 dB. Sajnos a növényzet (erdősáv) zajcsillapító hatása csak a közvetlen földfelszín közelében lévő zajforrások esetén hatásos és a hangforrás magasságát legalább 2 m-rel meg kell haladja az erdősáv magassága.

A belső terek akusztikájának a vizsgálata lehetővé teszi a hangforrás és az általa a helységben kialakuló hangnyomásszintek, a hangnyomásszintek helyfüggőségének, dinamikai tulajdonságainak (pl. visszhangosság) a vizsgálatát. A helység méreteinek, alakjának és határoló felületeinek a viszonyát a tereben kialakuló akusztikai körülményekkel.

A szabadtéri terjedés során említett hang elhajlási tulajdonsága a felületekkel határolt térben is jelentős. Egy nem megfelelően szellőztetett tereben, ahol a hőmérséklet felfelé emelkedik, a hanghullámok elhajlása miatt számos teremhangtanilag fontos mennyezeti visszaverődés megszűnhet (7. ábra).

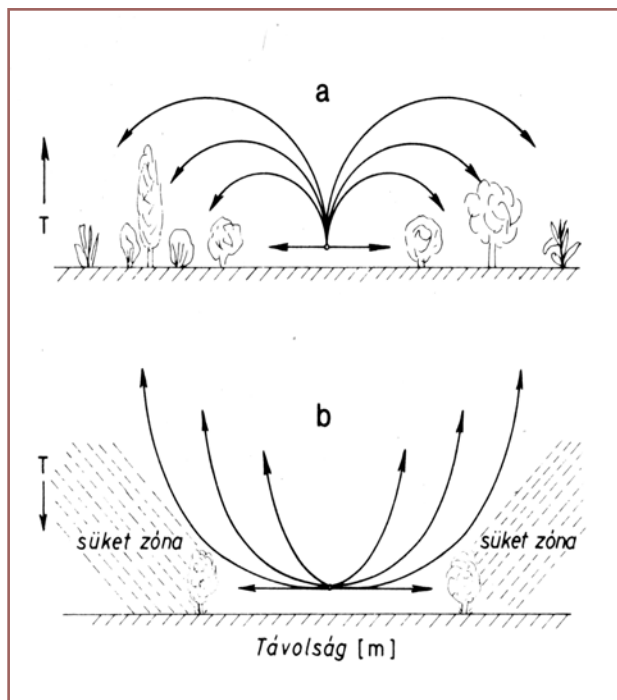
Ha fordított a hőmérsékleti viszony, a közönség kevesebb közvetlen hangenergiát kaphat, a fölfelé elhajló hangsugarak miatt. Emiatt kell az ülésorokat felfelé emelkedővé tervezni. Már a görögök is alkalmazták az akusztikai tereknek a geometriai tervezését, mellyel a térben kialakuló hanghullám terjedés igen jó közelítéssel modellezhető. Fermat (XVII. sz.) felismerte, hogy a hang két pont között a legrövidebb úton, egyenes mentén terjed. Ez az egyenes vonalú terjedés csak homogén térben valósul meg. Ha térben belül a terjedési sebesség változik (hőmérséklet különbségek) akkor az inhomogén térben a hangsugarak elhajlanak. Ennek felismerése Huygens-Fresnel nevéhez fűződik (XVII. sz.).

A belső terek másik legfontosabb hangjelensége a visszaverődés. Ha egy hanghullám falba ütközik, az energiája három részre oszlik. Első része visszaverődik. A visszaverődés olyan irányú mintha a fal mögött egy virtuális su-

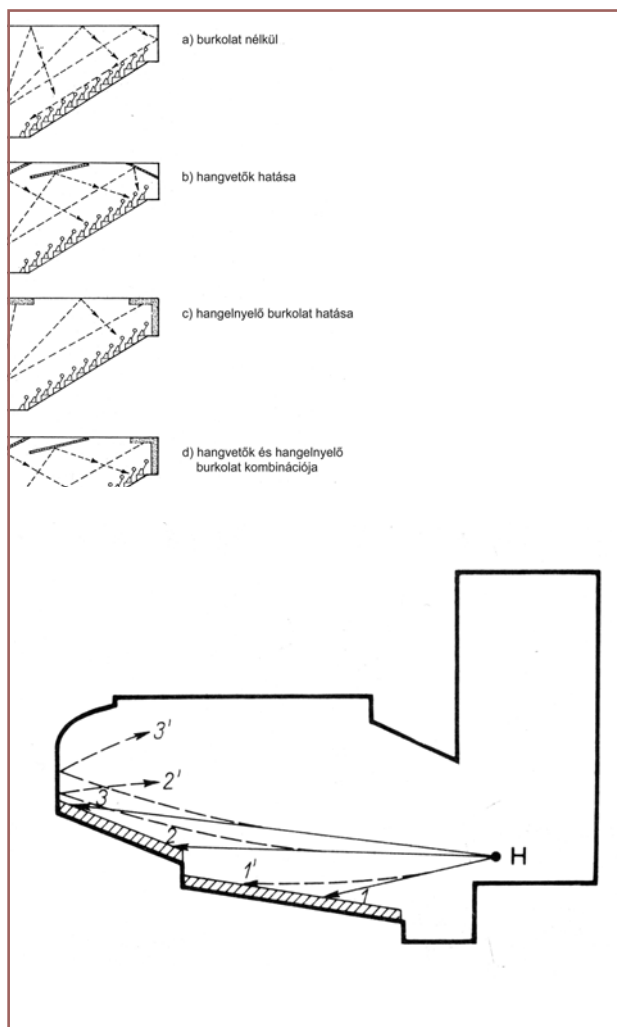
gázzó, a tényleges forrás tükörképe sugározná. A második része belép a falba. Ott egy része elnyelődik, hővé alakul. Harmadik része kilép a falból és tovább halad. A kilépés előtt igen kis része még egyszer visszaverődik és elnyelődik. A visszavert, hővé alakult és átmenő energia összessége a belépő hanghullám intenzitásával egyenlő. A különböző anyagokat az általuk vissza nem vert, elnyelt energia alapján az elnyelési fokkal jellemezzük. Az elnyelési fokot %-ban szokták megadni, és értéke függ a fal anyagától, hanghullám beesési szögétől és a frekvenciától. A 0 elnyelési fokú anyag minden energiát visszaver, ilyen például a csiszolt márvány. Az 1-es elnyelési tényező a teljesen porózus anyagokra jellemző, ahonnan semmilyen energia nem verődik vissza. A sima betonfal átlagos elnyelési tényezője a hallási frekvencia tartományban: 0,01-0,03%, Az ablaküveg: 0,25-0,05%, szőnyegpadló: 0,05-0,4%, vas tag függöny: 0,09-1%, nyitott ablak: 1-10%. Egy teremben kialakuló hangnyomásszintre döntő befolyással vannak a termet határoló felületek elnyelési fokai. A különböző borítású falak elnyelési fokainak az összegzéséből és a falfelületek nagyságából megkaphatjuk a teremállandót ($R_T = A(\alpha/1-\alpha)$ (m²), ami jellemző a terem méretére és a felületeinek az elnyelési fokára.

Az előzőekben láthattuk, hogy a hanghullámok egy terem falairól visszaverődnek és ezáltal a terem minden pontján különböző irányú és intenzitású hanghullámok haladnak keresztül. Eszerint megkülönböztethetünk kétféle hangteret, a diffúz és a közvetlen hangteret. A közvetlen hangteremben a hangnyomásszint a hangforrás teljesítményétől, míg a visszavert térben a teremállandótól is függ. Amikor egy teremben egy hangforrást bekapcsolunk az először a közvetlen hangteret hozza létre. Ezután a falakról visszaverődve létrejön a visszavert hangtér is.

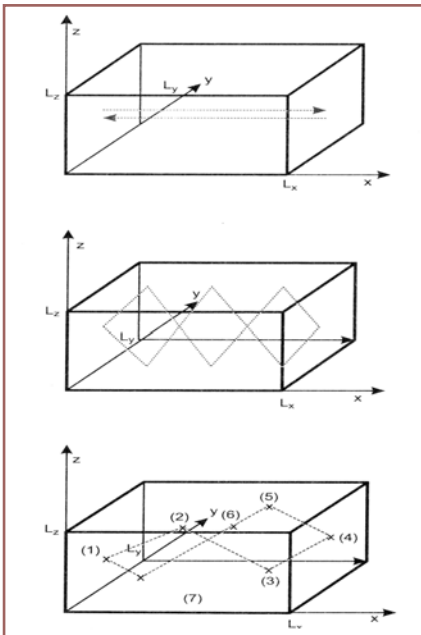
A két tér egymásra hatásának köszönhetjük a bennünk kialakuló térérzetet, irányérzetet, távolságérzetet. A teremben a hangnyomásszint mindaddig növekszik, amíg a hangforrásból kilépő teljesítmény nagyobb, mint az elnyelődés során fellépő veszteség. Egy idő után a szint állandó marad mindaddig, amíg a hangforrást ki nem kapcsoljuk. A hangforrás kikapcsolása után a hangnyomásszint csökkenése a falak hangelnyelő tulajdonságaitól függ, ha ez nagy, a csökkenés gyors lesz. Ha a terem állandósult hangnyomásszintjénél kikapcsoljuk a hangforrást és megmérjük azt az időt, amíg a terem hangnyomás szintje 60 dB (1000 részére) csökken, akkor megkapjuk a terem utószengésének idejét. Ezt megkaphatjuk, 20 °C-ot feltételezve a $T = 0,161(V/A)$ (s) képlet segítségével is. Olyan termekben, ahol az utószengési idő nagy, a még zengő hang elfedi, vagy zavarhatja a később kisugárzottat. Ez rontja a beszéd érthetőségét, a zenei reprodukciót. Előadótermekben, színházakban a legkedvezőbb utószengési idő 400-4000 Hz között $T = 0,4 \lg V$ képletből számolható. Az utószengés idejét a felületek hangelnyelésével csökkenthetjük, például stúdiókban. Még egy fontos teremjellemzőnk van, ami jelentősen befolyásolhatja a teremben kialakuló hangnyomásszintet. Egy párhuzamos falakkal rendelkező teremben a falak között a méretekkel egész számú viszonyban álló fél hullámhossznak megfelelő frekvenciákon kialakuló állóhullámok miatt a hangenergia eloszlása nem egyenletes. A megfelelő frekvenciával gerjesztve, és téglatest alakú termet feltételezve, három állóhullám rendszer tud kialakulni (8. ábra). Általában a hangforrások nem egy adott frekvencián sugároznak, hanem széles spektrumot átfogva, így számos frekvencián alakulhatnak ki in-



6. ábra: hullámterjedés az atmoszférában, különféle hőmérséklet esetén: a) a hőmérséklet felfelé növekszik, b) a hőmérséklet felfelé csökken



7. ábra: belsejtéri elhajlás



8. ábra: a hanghullámok kialakulása a frekvencia változása alapján

terferenciás pontok. Magas frekvenciáknál ez kevésbé zavaró, mert az interferenciás pontok elég közel esnek egymáshoz, de mély frekvenciákon igen zavaró lehet a jelenség. A probléma kiküszöbölésére a tervezés folyamán úgy kell megválasztani a terem méreteit, hogy méretarányok kistermeknél: 1:1,25:1,6, nagytermeknél: 1:1,35:2,45 és 1:1,55:3,27 között változzanak. Ezzel el is jutottunk következő részünk tartalmához, a termék és a bennük lévő felületek alakjához, alakjukból adódó akusztikai tulajdonságaikhoz.

Egy épület belső tereinek kialakítása során számos építészeti és akusztikai irányelvnek kell teljesülnie ahhoz, hogy mind a funkcionalitás, mind a belső hangzás szempontjából megfelelő létesítmény jöjjön létre.

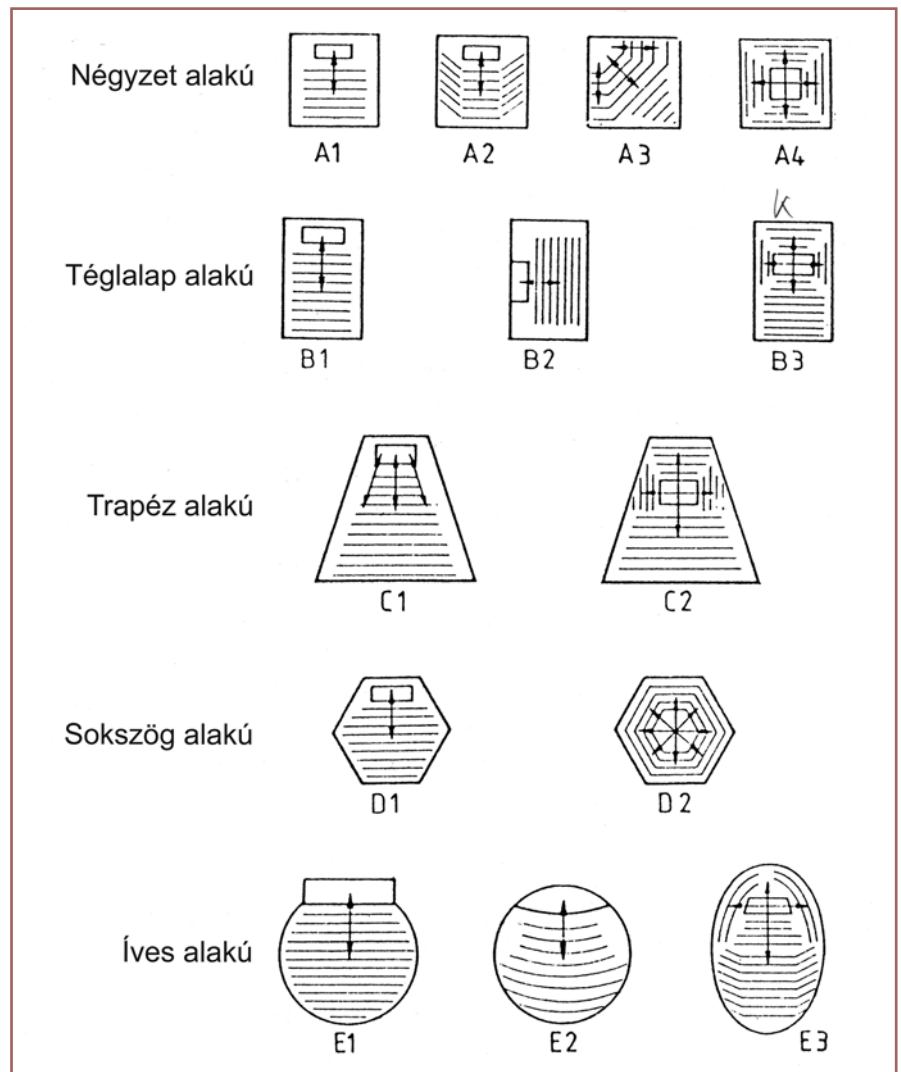
Az építész a tervezés során figyelembe kell vegye, hogy az épület korszerű, funkciójának megfelelő, esztétikailag illeszkedő legyen. Az akusztikus feladata, hogy az elkészült terem mind kifelé, mind befelé zaj ellen védett, a belső hangzása az adott zenei vagy prózai tekintetben a legoptimálisabb legyen, és olyan esztétikai igényt nyújtson, ami megfelel a kialakult hallgatási szokásoknak. Hogy e két fő tervezési szempont találkozhasson és ezáltal rendeltetésének maximálisan megfelelő épület jöhessen létre, építész és akusztikus közös munkája szükséges.

Aszerint, hogy milyen felhasználású termet vizsgálunk, különbö-

ző alakokkal, méretekkel, és belső burkolatokkal találkozunk. Itt érdemes megemlíteni, hogy általános célú olyan „mindenre alkalmas” terem nem létezik, ill. ha mégis akkor mindenre alkalmatlan. Például épületek között kialakult belső udvarok, amiket később befedtek és ezáltal belső térré alakítottak és valamilyen beszéd vagy zenei célú felhasználásra szántak, a gyakorlatban is bizonyítottan, előre nem tervezett méreteik, alakjuk és belső kialakításuk miatt alkalmatlanok zenei célú felhasználásra. És egy alapjaiban rossz akusztikával rendelkező térben sajnos lehetetlen az elektronikus hangosítással pótolni azt, amit a terem nem „tud”.

Akusztikai környezetünket szubjektív és objektív paraméterekkel jellemezhetjük. A szubjektív paraméterek, a beszédérthetőség, a szótagérthetőség, a zengőség, a térszerűség, a teremnagyság érzete. Az objektív

jellemzők a méretek és méretarányok, a térfogat, a forma és az utözengési idő. Az épületek belső tereinek felosztása során alakulnak ki a termek alaprajzai. Számítalan alaprajz lehetséges, de sajnos tökéletes teremalak nem létezik, viszont vannak igen kedvezőtlenek, mint például a négyzet, ahol kis termeknél a falak aránya okozza a gondot (nagy számú, erős állóhullámok). Ezeket csak maximum 500 fős előadásokra tervezik. Az A1, A2, A3 esetben a direkt hangeloszlás még igen jó, de az A4 esetében a beszélő előtti és mögötti hangeloszlás több mint 12 dB különbséget is mutathat. A téglalap alaprajz esetében a B1 ideális, csak a terem végében csökken az érthetőség számottevően. A B2-nél igen nagy a hangeloszlás különbség a terem egészében. A B3 az A4 esetét vetíti újra fel. A klasszikus téglalap alakú alaprajz általában beválik. A hangforrások enyhén irányított termeszetéből adódóan, a láthatóság

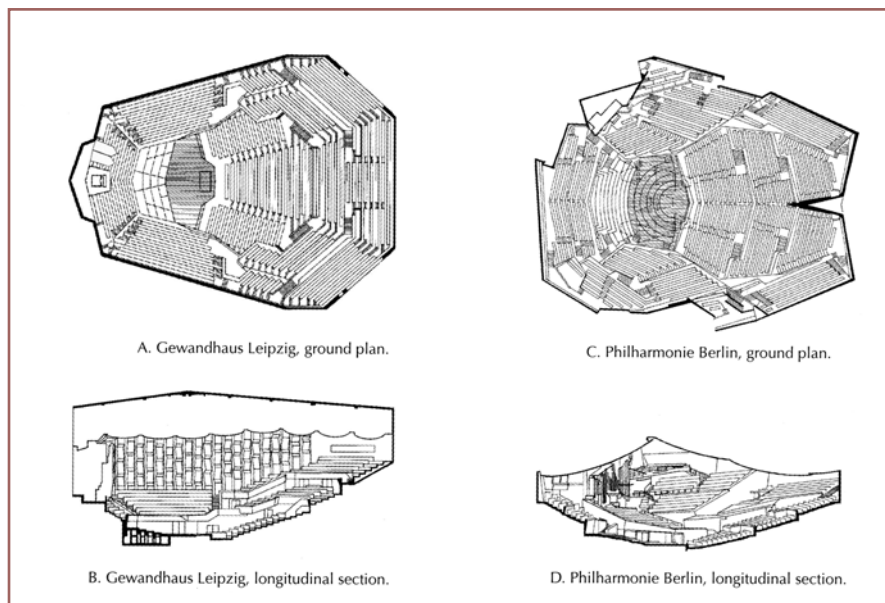


9. ábra: teremalakok. A képen látható kedvezőtlen teremalakok: A2, A4, B2, D1, D2, E3

növelése, és a hosszanti méretek csökkentésének szükségessége miatt (hangnyelés) jött létre a trapéz és patkó alakú alaprajz. Ezek sok előnyös tulajdonságuk mellett, ha túl szélesre nyílnak az oldalsó falak elvesztik a fontos hangenergia fókuszáló szerepüket. A szabályos sokszög alakú termek a hátrányos alakok közé sorolandók, mert az előző alakokkal ellentétben itt csak a nézőtér hátsó felére érkezik a falakról visszavert hang, így az egyes részekben különböző térérzet alakul ki. Átalakításukkal B1 vagy C1-hez hasonló termek építhetők belőlük. A D2 az A4-hez hasonló problémákkal küzd. A kör, ellipszis, vagy ívelt hátsófalú termek esetében ha az oldalfalak fókuszáló hatását nem ellensúlyozzák más megoldásokkal (páholyok, diffúz felület) igen előnytelene lehetnek (9. ábra).

A legújabb tervezések rámutattak a szabálytalan sokszögű alaprajz hatásos jellegére. Ezekben a termekben nincsenek párhuzamos felületek, sok a ki- vagy behajló falfelület, a közönséget blokkokban több szinten helyezik el. Ezzel az igen újszerű, érdekes alakokkal és beültetéssel a koncerttermekben igen jó akusztikai eredményeket érnek el (10. ábra).

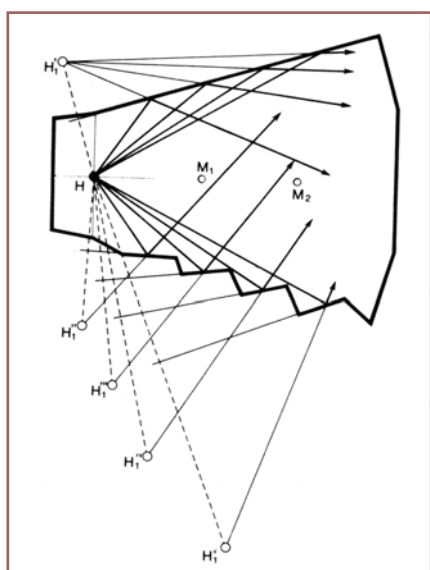
A tervezés folyamán a végső méreteket a rendeltetés, az alak, a beültetett nézőközönség száma határozza meg. Beszédcélra 3-6 m³, színház-előadásokhoz 5-8 m³, koncertre és hangversenyre 7-12 m³/fő térfogat szükséges. A terem méreteinek és formájának tervezésével igen pontosan beállítható a kialakuló közvetlen hang és a visszaverődések időkéésésének ideje. Ez az érték nem lehet több 17 méternél, biztosítható az egyenletes hangeloszlás, és elkerülhető a zavaró visszhang kialakulása. Az oldalfalokról érkező visszaverődések kitüntetett szerepet játszanak a helyes iránymeghatározásban. Ezek a visszaverődések segítik a szélső hallhatóság energiapótlását, növelik a teremben a térérzetet. Fontos, hogy a visszavert hang energiájának jóval kisebbnek kell lennie, mint a közvetlen hangnak, és hogy az iránymeghatározást ne zavarják, elnyelő felületeket alkalmaznak.



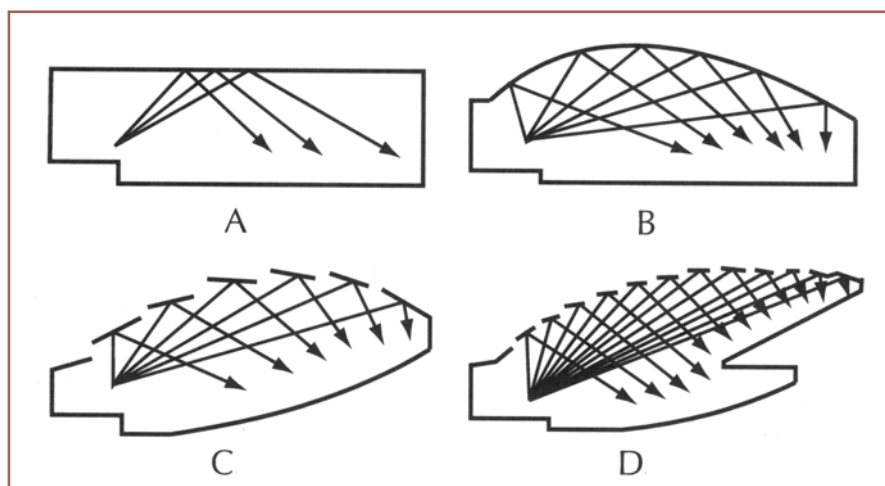
10. ábra: szabálytalan teremalakok

A hátsó falakról visszaverődött nagy utat megtevő vagy az íves felületekről koncentrált hang is veszélyt jelent. Ennek kiküszöbölésére diffúz és elnyelő felületkiképzést alkalmaznak (3. ábra).

A terem magasságának értéke az alapterületből és a szükséges térfogatból adódik. A mennyezet magasságának meghatározásánál nagyon lényeges, hogy az onnan érkező visszaverődéseknek később kell érkezniük, mint az oldalfalról érkezőknek. A közvetlen és a mennyezetről visszaverődött hang időkülönbsége nem haladhatja meg a 25 ms-ot. A mennyezet irányító képességét kihasználva növelhető a hátsó hallgatóság energia ellátása. Az ideális magasság zenei előadótermekben 4-5 m, a maximum 12 m. Az előadótermekben a közönség szezorainak emelkedésével növelhető a színpadra való rálátás, és a közvetlen hang egyenletesebb eloszlása. Ezzel egyidőben csökkenthető a terem hosszanti mérete. Ha egy olyan, már meglévő teremben szeretnénk javítani az akusztikai viszonyokat,



11. ábra: oldalsó visszaverődések



12. ábra: mennyezeti visszaverődések

ahol zavaró, nagy időkésésű visszaverődéseket tapasztalunk vagy egyenetlen hangeloszlást, hangelnyelő vagy hangvető felületek alkalmazásával látványos eredmények érhetők el. A hangelnyelő felületekkel csökkenthetjük az utözengést is. A 12. ábrán látható hosszú idejű visszaverődéseket csökkenthetjük csak hangelnyelők, csak hangvetők, vagy mindkettő együttes alkalmazásával.

Egy adott teremre jellemző és ajánlott utözengési idő a funkciótól és a nézőközönség számától függ. A terem utözengési idejének kialakítására a különböző alkalmazott felületek elnyelési fokát és felületük nagyságát alkalmazzák. Beszéd célú termekben 0,5-1 sec, színház, zenei célú teremben 0,9-1,8 sec, szimfonikus zene esetén 1-3 sec között változik a kívánt utözengés ideje. A túl hosszú utözengés igen zavaró is lehet. Nagy az elfedő hatása, és igen kicsi a beszédérthetőség az ilyen típusú termekben. A kis utözengésű helyeken a hangszerek hangja túl szárazzá válik.

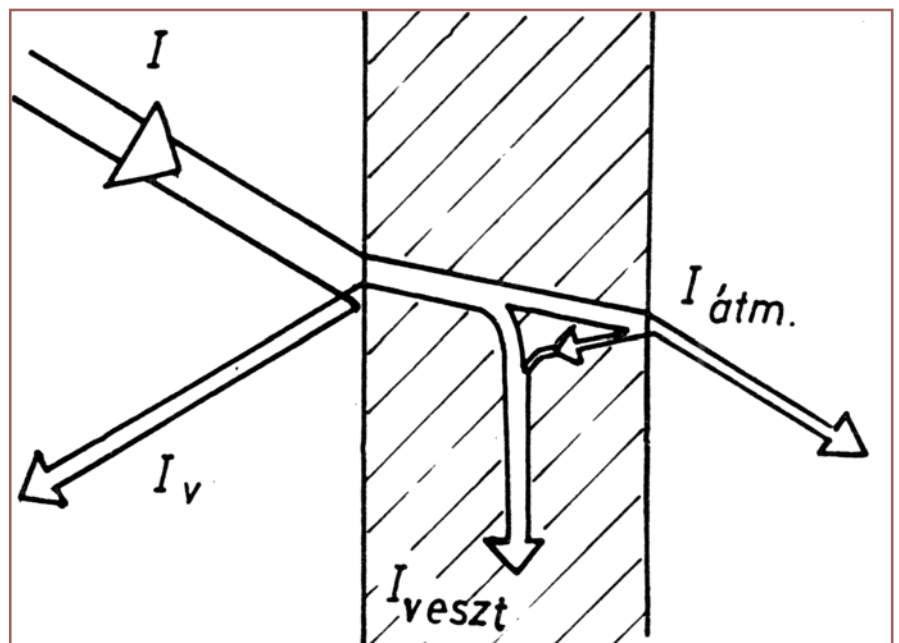
Az előzőekben láthattuk, hogy milyen hatással van a terem alakja, mérete, belső elrendezése a bennük kialakuló hangtulajdonságokra, milyen alapvető fizikai méretekkel kell rendelkezniük felhasználásuk szerint. Azt, hogy mi történik hangtani szempontból egy teremben, nem csak az alakja határozza meg. Nagymértékben kihatással van a termet határoló felületek alakja, anyagminősége, és ezek elhelyezkedése a bennük létrejövő akusztikai viszonyokra.

Általában, amikor egy teremre gondolunk, egy sima, kemény felületekkel határolt tér jut az eszünkbe. Nézzük meg, mi történik, amikor egy I intenzitású hanghullám egy hangforrásból kiindulva egy ilyen felülethez ér. A forrásunk hangja elérve a falat, valamilyen szögben nekiütközik a határoló felületnek. Ekkor az energiája három részre oszlik (13. ábra). Egyik fele visszaverődik a falról (I_v) ennek iránya az optikából ismert módon szerkeszthető, második része elnyelődik benne (I_{veszt}). A harmadik része, átjutva a falon, a túloldalon kisugárzódik ($I_{átm}$).

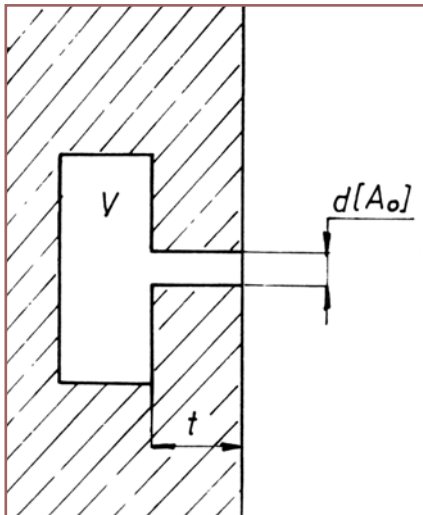
Ezek alapján meghatározhatunk az elnyelt és a túloldalon kisugár-

zott energiák összességéből egy, a felületre jellemző elnyelési tényezőt ($\alpha = a_A$), ami minden felületre nézve egyedi és egyik legfontosabb paraméterünk. Értéke 0 és 1 között változhat, és nagyban függ az anyagminőségtől, a beesés szögétől, és a frekvenciától. A beszédcélú termekben, mint osztály vagy előadóterem, igen lényeges az utözengés értéke. A két szélsőség, mint a legkisebb és a legnagyobb idő meghatározásánál a fül saját tehetetlenségét és a Haas-hatást kell figyelembe vennünk. Tehát a legrövidebb utözengés ideje, a fülünk tehetetlensége által meghatározott 50 ms-ból számolva $T=0,35$ s, aminél rövidebb időnek a tervezése értelmetlen. Hiszen fülünk ennél gyorsabb impulzusokat nem tud különálló jelként értelmezni, így az impulzusok összemosódnak. Ha azt felső határt vizsgáljuk, ami még a legjobb szótagérthetőséget lehetővé teszi, akkor az $T=1,2$ s kapjuk eredményül. Ez azt jelenti, hogy a visszaverődött hangimpulzusok a hallgatóság a 30%-át zavarják, azaz a lecsengő jel intenzitáscsökkenése közben érkező következő jel zavarólag hat az előző érthetőségére. A zenei felhasználású termek esetében nem tudjuk ilyen számszerűen meghatározni az értéket, lévén, hogy csak a szubjektív hang tetszetőség dönt egy-egy terem megítélésében. Az általános szokás a terem köbtartalmából való meghatározás. Így 3000-30 000 m³ térfogatú előadótermekben 1,6-2,5 s az elfogadott érték.

Ne feledjük, hogy az utözengés frekvenciafüggése miatt ezek az értékek közepes utözengési idők, azaz 500-1000 Hz frekvenciákra vonatkoznak. Visszatérve a fentebb említett porózus szerkezetű anyagokhoz: a belső súrlódási veszteségük révén csökkentik a hang energiáját. Ahhoz, hogy a hang bejuthasson egy ilyen anyagba, a felületének lukacsosnak és puhának kell lennie, hogy a lehető legkevesebb visszaverődést idézze elő. A belső szerkezet egymással kapcsolatban álló, levegővel telt üregekből kell hogy álljon. Ahhoz, hogy egy ilyen anyag igen magas frekvenciákon is elnyelő felületként működjön, porózitása a teljes felülethez viszonyítva 75% körül kell legyen. Itt érdemes megemlíteni, hogy sok olyan anyag, mint például néhány habzivacs és a hungarocell hangelnyelőként igen rossz tulajdonsággal rendelkezik. Belső szerkezetükben a pórusok nem átjárhatók, és így nem tud kialakulni a megfelelő áramlás, ami biztosítaná az energiavesztést. Azt, hogy egy porózus anyag milyen mély frekvenciáig alkalmazható, a vastagsága határozza meg. Ahhoz, hogy 250 Hz-en is megfelelő eredményt érjünk el, 300 mm vastag anyagot kellene alkalmaznunk. Ennél vékonyabbnál a határfrekvenciánk feljebb csúszik. Ez rámutat, hogy ezen anyagok alkalmazása korlátok közzé szorul. Áthidaló megoldásnak igen jó példa az álmennyezet, ahol a kemény reflektáló felület alá nagy légréssel egy puha porózus



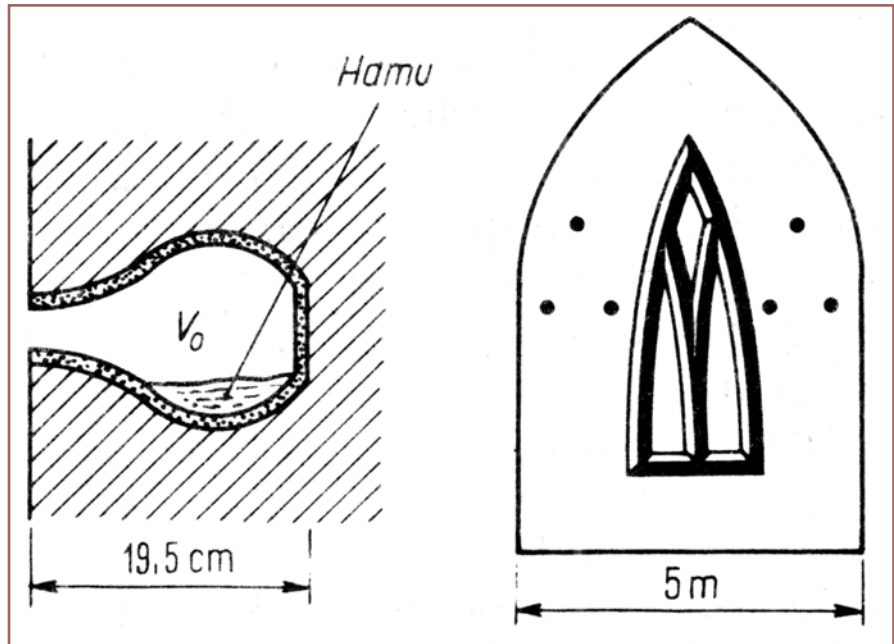
13. ábra: visszaverődés



14 ábra: Helmholtz-rezonátor

anyagot fügesztenek, $\frac{1}{4} \lambda$ -ra a felülettől, ami mély és magas frekvenciákon is megfelelő elnyelést biztosít. Mély frekvenciákra más megoldás vezet jó eredményre: az úgynevezett Helmholtz-rezonátor. (14. ábra).

Ennek működése, egy V térfogatú kamra, ami egy A_0 keresztmetszetű, t hosszúságú nyakkal áll kapcsolatba a külső térrel. A kamrában lévő levegő rugóként, a nyakban lévő levegő mint tömeg viselkedik, lengő rendszert alkotva. A külső térből érkező hang a nyakban lévő levegőt megmozgatja, és ezt a mozgást a kamrában lévő V térfogatú levegő csillapítja. Ennek a rendszernek meghatározott rezonancia frekvenciája van, tehát mint keskenysávú hangolt rendszer működik igen magas elnyelési tényezővel. A működési frekvenciasáv szélesítésére az üregben elhelyezett porózus anyagok szolgálhatnak. Ezek alkalmazásával azonban az elnyelési érték csökken.



15 ábra: az ókori színházak kerámiavázái és a templomablak kialakítása a rezonancia csökkentésére

Az ilyen típusú rezonátorok háromféle akusztikai szerepet tölthetnek be. Hangcsillapítást, hangerősítést, hang késleltetést. (15. ábra).

Ilyen rendszereket falakba építenek be, amelyekre számos példa említhető templomoknál (Pécs, Jakováli Hasszán dzsámi, svendborgi Miaszszonyunk) és az ókori színházak folyosóin és ülésorai alatt elhelyezett kerámia- és bronzvázák esetében. A stúdiókban, lehallgató helységekben, színházakban alkalmazott falakra szerelt perforált falemezek és a mögöttük elhelyezett porózus anyagok, mint rendszerbe állított Helmholtz-rezonátorok működnek.

Meg kell még említenünk a lemezrezonátorokat. Ezek nem túl vastag, néhány milliméter vastagságú lemezek, melyek hang hatására hajlító

rezgésbe jönnek, és a belső súrlódás folytán energiát emésztnek fel. Rezonancia-frekvenciájuk a mély-közép hangok tartományába esik, 100-500 Hz közé. Lényeges, hogy a lemeznek igen hajlékonynak és nagy belső súrlódásúnak kell lennie (pl: farostlemez). A csillapítás növelhető és a működési tartomány is szélesíthető, ha a lemez mögött levegő vagy egyéb hangelnyelő anyag található. Ezeket a különböző típusú hangelnyelő anyagokat és falborításokat, a teremben elszórtan, egymással keverve érdemes alkalmazni, a megfelelő utánzengési idő beállításához, a káros teremrezonanciák csökkentéséhez és a diffúz hangtér kialakításához.

Szirtes István
Mobil Audio and Light

FELHASZNÁLT IRODALOM:

- Glen M. Ballou: Handbook for Sound Engineers
 H. Zoltán, J. K. Andrea, R. Frigyes: Építészeti akusztika
 Kurtutz Imre-Szentmártony Tibor: A műszaki akusztika alapjai
 Reis Frigyes: Az épületakusztika alapjai
 SH atlasz: Fizika
 Tarnóczy Tamás: Akusztika
 Tarnóczy Tamás: Teremakusztika I., II.