

# Színháztervezést segítő új akusztikai eszközök

## 1. Bevezetés

A Színpad újság éppen 10 éve indult pályájára, akkor, amikor a Művészetek Palotáját átadták a nagyközönségnek. A folyóirat első száma a MÜPA épületét mutatta be. A MÜPA tervezése már a nyitás előtt 5 évvel elkezdődött, és a magyar akusztikai tervezésben azóta szinte forradalmian nevezhető változás zajlott le. Több beruházásban is sikeresen vettek részt az akusztikus tervezők, bizonyítva, hogy milyen egységesen tudják kezelni az akusztikai tervezést ilyen nagy horderejű feladatoknál.

## 2. Az akusztikai tervezés legfontosabb részterületei

Nagy kulturális létesítmények akusztikai tervezésnek négy nagyon fontos részterülete van:

### Épületakusztika

Az épületakusztikus tervező arról gondoskodik, hogy a környezeti zaj ne zavarja az intézményben folyó tevékenységet, és az intézményben zajló események se zavarják a környezetet. További feladata még, hogy az épületen belül lévő, akusztikailag igényes helyiségekben folyó rendezvények, próbák, esetleg hangfelvétel ne zavarják egymást, a hanggátlás megfelelő legyen az épületen belül is.

### Teremakusztika

A színház-, koncert- és rendezvénytermekben elsődleges kérdés szokott lenni, hogy hogyan szól a terem. A különböző célú termekben meg kell tervezni azt a teremakusztikai környezetet, ami megfelelő az adott feladatra.

### Zaj- és rezgésvédelem

A különböző zaj- és rezgésforrásokat – elsősorban a gépészeti zajforrásokat – úgy kell telepí-

teni, hogy azok a külvilág felé ne jelentsenek zavaró jelenlétet. Ugyanakkor arra is ügyelni kell, hogy a külső zaj- és rezgésforrások zaja és rezgése ne juthasson be az épületbe, valamint az épületen belül is megfelelően legyenek leválasztva. Ez a szakterület átfedésben van az épületakusztikai tervezéssel.

### Elektroakusztika

Az elektroakusztikus tervező feladata különböző célú termekben a megfelelő hangosítás megtervezése. Meg kell tervezni a hangfelvételi technika elemeit, a mikrofonelrendezést, a megfelelő csatornaszámot, a hangrögzítő eszközöket és még sok más elemet. Ez a szakterület szoros összefüggésben van a teremakusztikai tervezéssel.

## 3. Teremakusztikai tervezés

Úgy az előadóművészek, mint a nagyközönség legjobban az előadóterem teremakusztikai kialakítására figyelnek. Amit közvetlenül érzékelnek: a tér hangzása. Adódik a kérdés: mitől szól jól egy terem?

A teremakusztikai tervezési folyamatban egy előadóteremmel kapcsolatban az alábbi célkitűzéseket kell figyelembe venni:

- biztosítani kell az előadók, előadóművészek számára az optimális körülményeket előadások, próbák és hangfelvételek számára;
- biztosítani kell a művészek számára az egymás jó hallását, az együtt játszás lehető legjobb pontosságát;
- kiváló akusztikai körülményeket kell biztosítani a hallgatóság számára;
- megfelelő körülményeket kell teremteni a hangfelvételek készítése számára – elsősorban a zenei célú termekben.

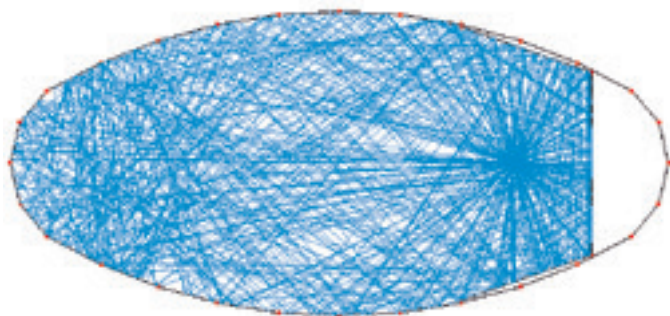
### A terem formájának meghatározó szerepe

Egy előadóterem hangzásában – legyen az zenei, színházi vagy multifunkcionális terem – a formának meghatározó szerepe van. Jó hangzás különféle alakú termekben megvalósítható ugyan, de vannak akusztikailag eredendően rossz teremformák is, ahol olyan akusztikai jelenségek lépnek fel, amelyek káros hatásának kiküszöbölése utólag majdnem lehetetlen, vagy csak nagy áldozatok árán lehetséges. Ilyen teremalak például az ellipszis. Ez a forma kedvezőtlen hangeloszlást produkál, és utólag nagyon nehéz a javítása. A homorú ív – a fényhez hasonlóan – a hangot is „összegyűjti”, tehát valahol nagyobb, valahol kisebb hangnyomásszint alakul ki, miközben a téglalap alakú teremnél a hangenergiát sokkal egyenletesebben lehet elosztani. Az 1. és 2. ábrán egy ellipszis és egy klasszikus téglalap formájú előadóteremben kialakuló hangeloszlás látható.

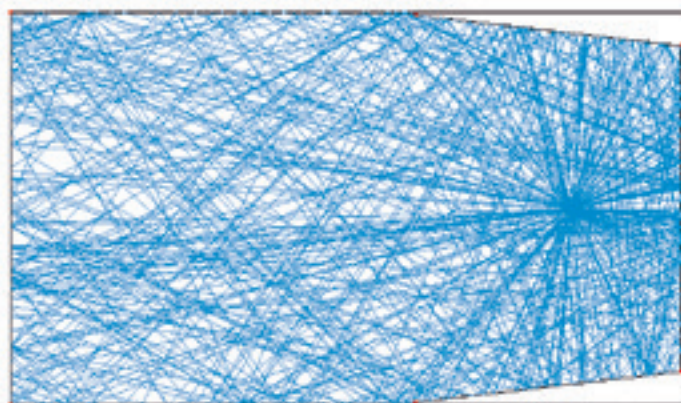
Ha megnézzük a világ legjobb hangversenytermeit, azt látjuk, hogy az egyszerű cipődobozra emlékeztető forma a leggyakoribb, de akadnak nagyon különleges formájú jó terek is. Ilyen például a legyező alak. Ennek egy kitűnő példája a cardiffi koncertterem, mely 1982-ben épült, és az angol Sandy Brown Association tervezte Alex Burd vezetésével.

Másik érdekes példa a hexagonális alaprajz, ilyen a belfasti Waterfront Hall, szintén az angol Sandy Brown Association tervezte Alex Burd vezetésével.

Összeállítottunk egy összehasonlító táblázatot azokról az európai hangversenytermekről, melyek az utóbbi évtizedekben épültek, és melyekről vélemény is rendelkezésünkre áll.



► 1. ábra: Ellipszis alakú terem – fókuszáló hatás



► 2. ábra: Téglalap alaprajzú terem – kedvező hangenergia-eloszlás

### 1. táblázat: Európa utóbbi évtizedekben épült legnagyobb hangversenytermei

| Terem helye, neve                       | Átadási idő              | Minősítés   | V m <sup>3</sup> | N            | V/N  | Forma                    | Konzulens  |
|---|--------------------------|-------------|------------------|--------------|------|--------------------------|--|
| Cardriff, Wales, St. David's Hall       | 1982                     | kiváló      | 22 000           | 1 952        | 11,2 | legyező                  | Sandy Brown Assoc.                               |
| London, Hugh Creighton for the Barbican | 1982<br>átépítve<br>1994 | elfogadható | 17 750           | 2 026        | 8,76 | legyező                  | H. Creiton,<br>Kirkegard and Assoc.              |
| München, Philharmonie am Gesting        | 1985                     | közepes     | 29 737           | 2 387        | 12,4 | legyező                  | Müller-BBM                                       |
| Glasgow, Royal C.Hall                   | 1990                     | jó          | 28 700           | 2 195 (+263) | 11,7 | téglatest                | Sandy Brown Assoc.                               |
| Belfast, Waterfront Hall                | 1997                     | jó          | 30 000           | 2 250        | 13,6 | hexagonális              | Sandy Brown Assoc.                               |
| Manchester, Bridgewater Hall            | 1998                     | jó          | 29 000           | 2 200        | 13,3 | téglatest                | Arup Acoustics                                   |
| Birmingham, Symphony Hall               | 1991                     | jó, közepes | 25 000           | 2 211        | 11,3 | téglatest<br>(kombinált) | ARTEC  |
| Luzern, Cultural and Congress Centre    | 1998                     | jó          | 20–22 000        | 1 840        | 11,5 | téglatest                | ARTEC  |
| Budapest, MŰPA                          | 2005                     | jó, kiváló  | 28 000           | 1 699 (+190) | 14,1 | téglatest                | ARTEC  |
| Pécs, Kodály Központ                    | 2011                     | jó, kiváló  | 11 144           | 999          | 11,5 | téglatest                | Arató Akusztikai Kft.,<br>Kotschy és Társai Kft. |

→ Klasszikus téglatest formájú terem a budapesti Művészetek Palotájának Bartók Béla hangversenyterme és a Pécsi Kodály Központ hangversenyterme is.

A Pécsi Kodály Központ alaprajza az 3. ábrán látható, ami jó példa arra, hogy a klasszikus cipődoboz formát kissé módosítva még előnyösebb teremakusztikai hangzást lehet elérni.

A terem méreteinek ideális aránya:  
magasság/szélesség: > 0,7  
hosszúság/szélesség: < 2

Ezenkívül nagy szerepük van a termen belüli kontúroknak is. Kerülni kell a homorú ívelt felületeket, de ha az oldalfalakat, hátfalat megtörjük a megfelelő szögben – ahogy ez történt

### Teremakusztikai paraméterek

Az akusztikus tervezőnek a jól megválasztott formához kell megtalálnia a teremakusztikai paraméterek jó kombinációját. Olyan objektív paramétereket kell találni, melyek megfelelnek az érzeti oldalnak. Az akusztikai tudományban a mai napig is ez az egyik legfontosabb kutatási terület.

A mérhető és vizsgálható teremakusztikai paraméterek közül a legfontosabbak az alábbiak:

**Utözengési idő:** T60 [s]. A mérhető objektív paraméterek közül kétségtelenül ez a legfontosabb olyan, amit az alábbiak szerint definiálunk: az a zárt helyiségre vonatkozó frekvenciafüggő jellemző, ami a hangforrás elhallgatása után számítva a zengő energia 60 dB-es csillapodásáig eltelt időt határozza meg.

Közepes utözengési idő Tm [s] a különböző frekvenciákon felvett/mért utözengési időkből átlagolt érték.

Az utözengési idő mellett a legfontosabb paraméterek:

STI – beszédérthetőségi index – színházak és prózai előadóterem esetén

t<sub>1</sub> – időkéscésretesz: az első 20–30 ms-ban érkező reflexió

EDT – kezdeti lecsengési idő

C – hangtisztasági fok: korai-késői hangenergia hányada

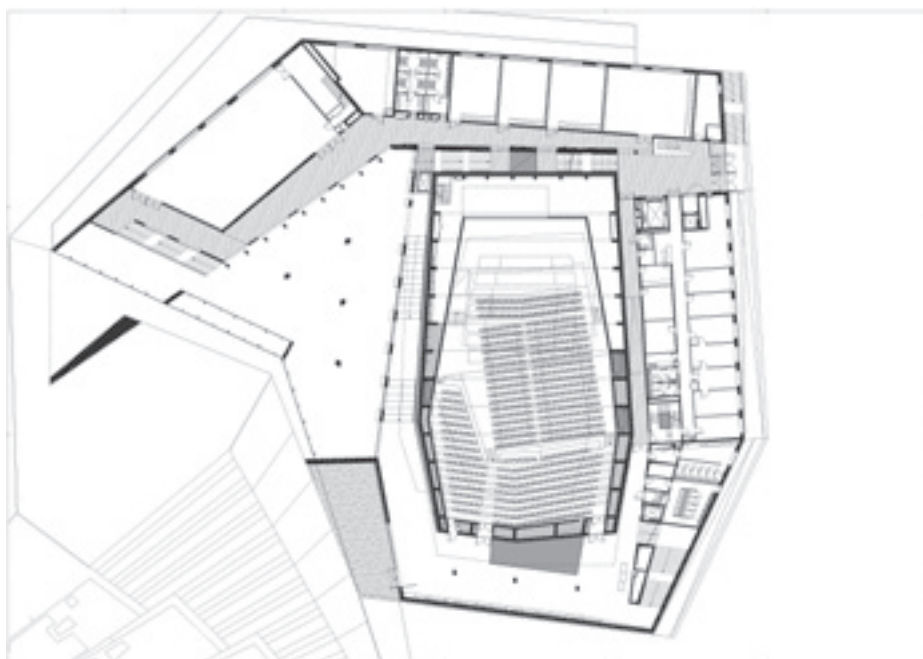
L – hangnyomásszint-eloszlás

LEF – az első 20–80 ms oldalirányú reflexiók aránya

BR – mélyhang-arány

HR – magashang-arány

Az akusztikai tervezés feladata: az adott előadóteremre meghatározni ezeknek a paramétereknek a megfelelő hangzást biztosító értékeit.



▶ 3. ábra: A Pécsi Kodály Központ alaprajza

### Fizikai méretek, kialakítás

A terem formáján kívül van néhány olyan, a terem alakjával és méretével kapcsolatos követelmény, amelyet be kell tartani.

Ilyen a terem térfogata és a férőhelyek száma közötti megfelelő arány. Általános összefüggés, hogy az egy főre jutó légköbméter legyen 10–14 m<sup>3</sup>. Fontos a terem méreteinek, hosszúságának, szélességének és magasságának aránya is.

a Pécsi Kodály Központ esetén –, akkor ezzel segítjük a teremben a jó hangenergia-ellátást és a jó tereméret kialakulását.

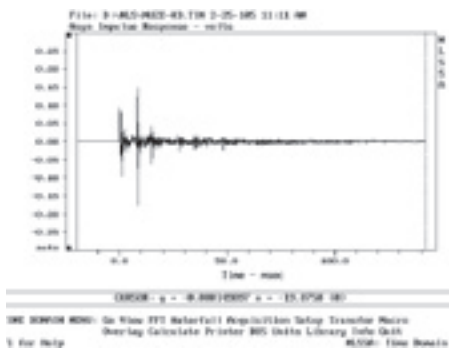
A teremben minden síknak nagy jelentősége van. A Kodály Központ esetén a megjelenő kisebb aszimmetriák térben kifejezetten előnyösek, segítenek elkerülni az esetleges nemkívánatos hangvisszaverődés-sorozatokat.

A jó hangellátást segíti a balkonok homlokzatának enyhe döntése és törése is.

## 4. Segítő eszközök az akusztikus tervező kezében

### Méréstechnika

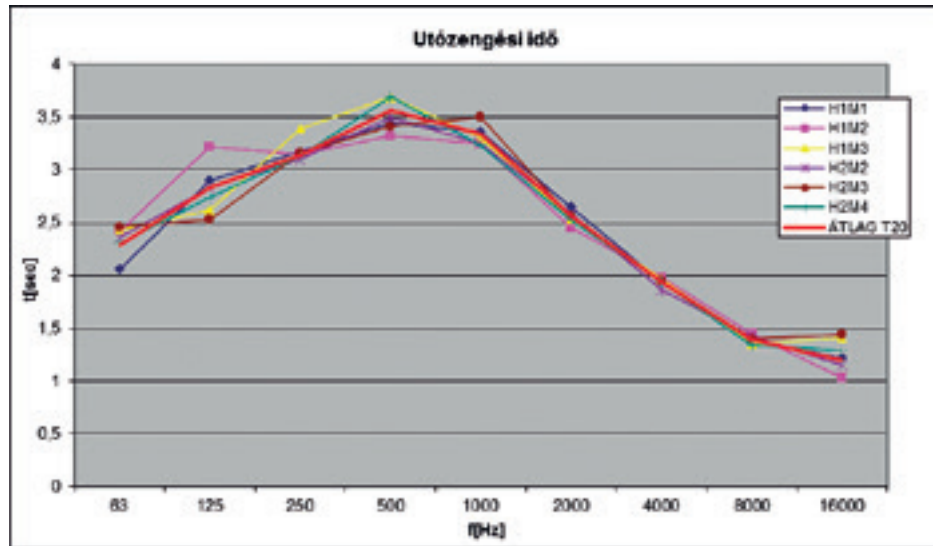
Az utóbbi évtizedekben nagyot fejlődött a mérés-technika. A kilencvenes években jelent meg például az MLS technika. Ma már többféle modern mérési módszert használnak az akusztikus szakemberek. Alapvetően mindegyikkel impulzusválaszt mérünk, ebből meghatározzuk a többi teremakusztikai paramétert. Az impulzusválasz: definíció szerint egy végtelen nagy impulzusgerjesztésre adott válasz. Már az impulzusválaszokból sok következtetést lehet levonni a terem viselkedéséről. Példaként a 4. ábrán bemutatunk egy olyan mért impulzusválaszt, ahol jól lehet látni csörgővisszhang jelenlétét a teremben.



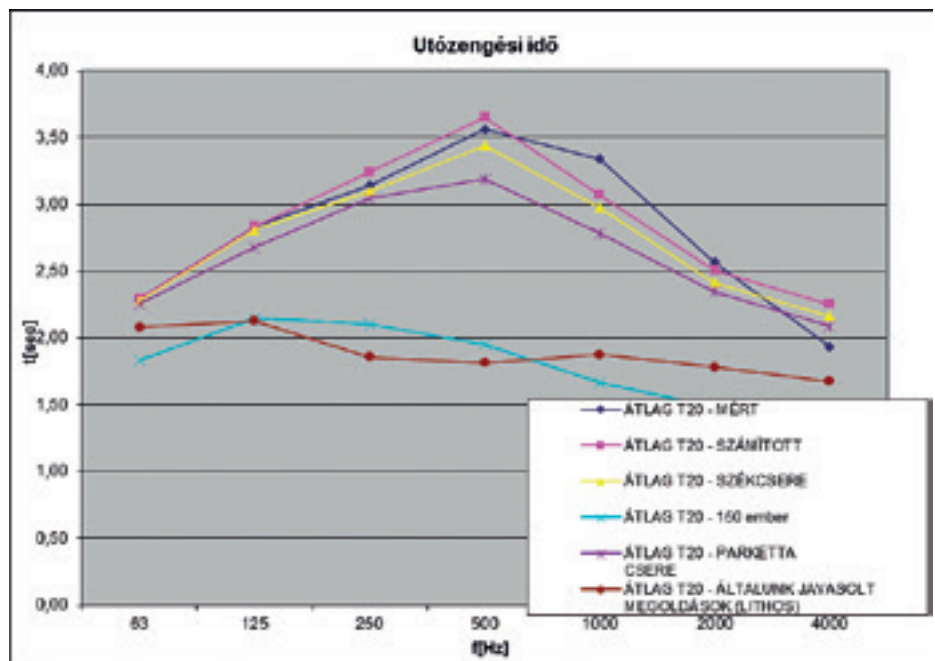
► 4. ábra: Csörgővisszhang jelenlétét mutató impulzusválasz

Meglévő termekben az akusztikai hibák észlelését a modern mérés-technikával jól fel lehet mérni, és a mérési eredmények feldolgozása után az akusztikus tervező nagyon sok információhoz jut, amelyek alapján a megfelelő akusztikai korrekció módját ki tudja dolgozni.

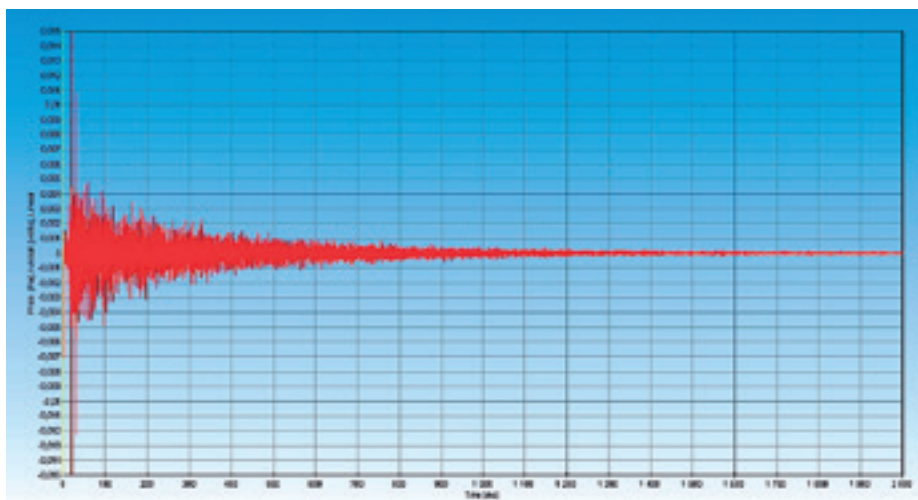
Egy meglévő előadótermet (alapterülete: 376 m<sup>2</sup>, térfogata: 2600 m<sup>3</sup>) akusztikus konzultáció nélkül újítottak fel. A teremben a beszéd-



► 6. ábra: A teremben mért utózungési idő – menete kedvezőtlen, a beszédteremtő tartományban kiemelkedően magas, ezzel a beszédérthetőség nagyon rossz



► 7. ábra: A teremben javasolt akusztikai korrekciók után várható utózungési idő, ami kiegyenlített hangzást és jó beszédérthetőséget jelent



► 5. ábra: A rossz hangzású, 2600 m<sup>3</sup> térfogatú teremben mért jellemző impulzusválasz

érthetőség a felújítás után nagyon rossz volt, a hang „zavaros” volt, a teremnek kifejezetten „vásárcsarnok”-hangzása volt.

Az akusztikai mérésekkel a mért impulzusválaszokból azt állapítottuk meg, hogy a direkt hang után nagyon sok, nagy intenzitású reflexió érkezik a hallgatóhoz. Egy mért, jellemző impulzusválasz látható a 5. ábrán.

Az impulzusválaszokból meghatározott hangtisztasági fok átlaga az ajánlott  $0 \pm 2$  dB érténél jóval alacsonyabb, ami a kellemetlen „zavaros” hangzást eredményez.

A mért átlagos beszédérthetőségi index a teremben  $STI = 0,4$ , ami rossz beszédérthetőséget jelent. Az ajánlott érték  $STI > 0,7$ .

A fenti mérési eredmények jó példáját mutatják annak, hogy ezek segítségével a rossz hang-

→ zás okát fel lehet táni, a mért objektív paraméterértékek alapján lehet méretezni a szükséges akusztikai korrekciót, és meg lehet határozni azokat az akusztikai lépéseket, melyekkel a terem hangzása javítható. Arra is jó példa, hogy ha a felújítás előtt még az építészeti tervezési fázisban bevontak volna akusztikus tervezőt, sokkal kisebb költséggel lehetett volna elérni a jó akusztikai eredményt.

A 7. ábrán azt mutatjuk be, hogy a teremakusztikai tervezés eredményeként hogyan alakul a teremben például az utözengési idő:

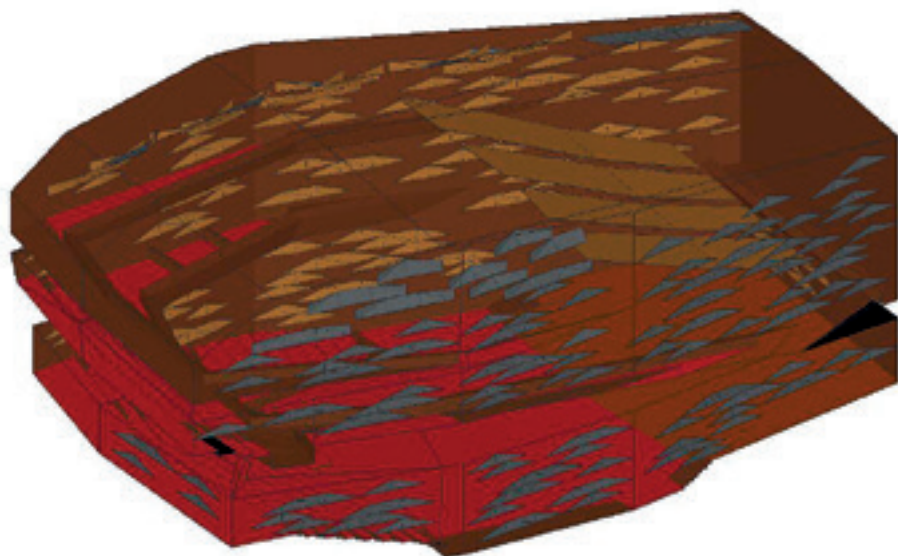
A hangtisztasági fok számított átlaga  $0 \pm 2$  dB, és a  $STI > 0,7$ . Ezek jelentős teremakusztikai javulást eredményeznek.

### Számítógépes modellezőprogramok

Ugyancsak az utóbbi évtizedek vívmánya a számítógépes teremakusztikai modellezőprogramok megjelenése az akusztikai tervezői munkában.

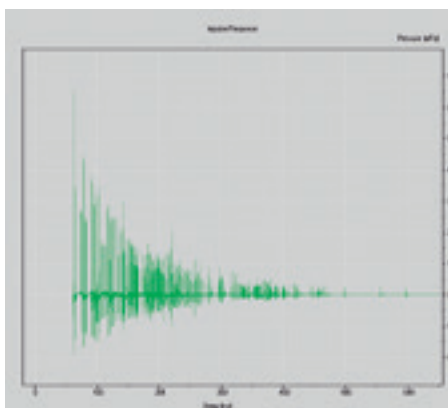
Ezek a programok nagy segítséget nyújtanak a tervezőnek, ha megfelelő szakértelemmel használják. Ezek segítségével meg lehet határozni az adott térre mindazokat az objektív teremakusztikai paramétereket, melyeket fent leírtunk. Előre leképezhető az akusztikai tér, és segítségével elkerülhetők a nagyobb akusztikai hibák, mint például csörgővisszhang, ívek fókuszáló hatása stb. Előre látható a teremben várható hangtisztaság, beszédérthetőség és még sok más fontos paraméter.

Új terem számítógépes modelljét mutatjuk be a 8. ábrán:



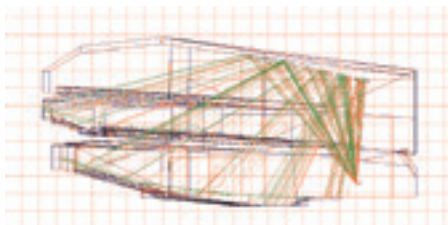
► 8. ábra: A Pécsi Kodály Központ számítógépes teremakusztikai modellje

A modell segítségével kiszámoltuk a terem egyik jellemző impulzusválaszát, amiből szép egyenletes lecsengés, egyenletesen érkező, exponenciálisan csökkenő reflexióssorozat látható a direkt hang után.



► 9. ábra: Számított impulzusválasz a Pécsi Kodály Központ teremakusztikai modelljében

A modell segítségével pontosan be lehet állítani például a hangvetők helyzetét, szögét is. (10. ábra)



► 10. ábra: Hangvetők szögének meghatározása teremakusztikai modell segítségével

### Meglévő terem akusztikai javítása

Meglévő terem esetén is nagy segítséget jelent a számítógépes modellezés lehetősége. Példa-

mértékét. A megépített faltördelésekkel a nézőtérben ugrásszerűen megjavult a beszédérthetőség.

## 5. Összefoglalás

A mai akusztikus tervező kezében sok segítő eszköz van. A tervezés már modern modellezőprogramok segítségével történik az akusztikai tervezés összes területén. Fontos azonban kiemelni, hogy minden modellezőprogramnak megvannak a korlátai, amiket ismerni kell, azokat megfelelő szakértelemmel kell alkalmazni.

Segítő eszköz a modern mérés technika, amely segítségével az eredményeket össze lehet vetni, ki lehet értékelni, és az eltérésekből lehet következtetni, ha a modellezéskor valamit nem pontosan vettünk figyelembe.

Fontos előrelépést jelent, ha a már elkészült termekben szubjektív tesztek készítenek, amelyek nagy segítséget nyújtanak a következő munkához. Válaszokat lehet kapni: milyen teremben melyek azok az objektív paraméterek, amelyek befolyásolják a szubjektív érzetet, valamint arra is választ lehet kapni, hogy egy-egy teremben az adott paramétereknek milyen értékhatárok jelentenek optimumot.



**BORSINÉ ARATÓ ÉVA**  
ARATÓ Akusztikai Kft.  
arato.eva@aratokft.hu