

# 3. gyakorlat

Mikrofon kalibrálása, hangszóró frekvencia-átviteli jelleggörbéjének mérése,  
fejhallgató frekvencia-átviteli jelleggörbéjének mérése

Felhasznált irodalom: Brüel & Kjaer segédanyagok, információs CD

IEC 61094-2, edition 2. (February 20, 2009) "Measurement  
Microphones, part 2". IEC Standard for Pressure Reciprocity  
Calibration of Measurement Microphones

IEC 61094-5, edition 1. (October 16, 2001) "Measurement

Microphones, part 5". IEC Standard for Comparison Calibration of  
Measurement Microphone

Wersényi György: Műszaki akusztika jegyzet

Mérési helyszín: BME TMIT Beszédkusztikai Laboratórium

Magyar Tudósok körútja 2. I épület B szárny 157-es szoba

## Tartalom

1.	Mikrofonok.....	2
2.	Mérő mikrofon-kalibráció .....	10
	<b>Három különböző kalibrációs módszer ismert: a. Reciprok kalibráció, b. Összehasonlítási kalibráció, c. Dugattyúmembránokat és hangkalibrálókat használó kalibráció.....</b>	<b>10</b>
	<b>a. Reciprok kalibráció.....</b>	<b>10</b>
	<b>b. Összehasonlítási kalibráció.....</b>	<b>11</b>
3.	Hangszórók.....	14
	<b>Lengőnyelves hangszóró .....</b>	<b>15</b>
	A dinamikus hangszórótól abban tér el, hogy a tekercs áll, és egy kónuszhoz rögzített lágyvas „nyelvet” mozgat. (A 20. század közepe óta csak történelmi jelentősége van)..	15
	<b>Piezoelektromos hangszóró .....</b>	<b>16</b>
	<b>Plazmahangszóró.....</b>	<b>16</b>
	Hangszórók hitelesítése összehasonlításos és helyettesítéses módszer .....	18
4.	Fejhallgatók.....	19
	Típusok .....	20
	Mérendő jellemzők .....	21
	Hangszórók Jellemzők mérésének környezete és az eljárás .....	21
	Feladatok – Mikrofon és hangfal mérések .....	24
	1. csoport.....	24

Mikrofon kalibrálás pisztonfonnal .....	24
Mikrofon hitelesítés helyettesítéses eljárással.....	24
2. csoport.....	24
Hangszórók átviteli jelleggörbéjének mérése.....	24
Műfüles mérés .....	25

## **I. Mikrofonok**

### **I.1. Mikrofonokról általában**

A mikrofonok olyan hangtechnikai eszközök, amelyek a természetes hangrezgés felfogására használhatóak. A hangot, mint mechanikai rezgést elektromos jellé akítják át.

A mikrofonok többféle felosztási elv szerint csoportosíthatóak:

- akusztikai szempontból
- működési elv szerint
- felépítés szerint
- irányérzékenység szerint
- kimeneti impedancia szerint
- 

### **I.2. Mikrofonok csoportosítása felosztási elv szerint**

#### **Akusztikai szempontból:**

Két csoportra oszthatók a különféle mikrofon fajták. Az egyik fajtája a nyomásérzékeny. Ezeket **nyomásmikrofonnak** nevezik. Membránjuk zárt akusztikai üreg előtt rezeg és csak az egyik oldalról ( előlről ) éri hangnyomás. Másik fajtája a sebesség érzékeny . Ezeket **sebesség mikrofonoknak** nevezik. Membránjukra mindkét oldalról hat hangnyomás. A membrán tehát a 2 oldalán keletkező hangnyomáskülönbség hatására mozog.

**Működési elv szerint** öt mikrofonfajta ismeretes:

- változó ellenállású
- elektrodinamikus
- elektromágneses
- elektrosztatikus
- piezoelektromos

#### **Felépítés szerint:**

1. Változó ellenállású:  
⇒ szénmikrofonok
2. Elektrodinamikus:  
⇒ mozgótekerceses mikrofonok

- ⇒ szalag mikrofonok
- 3. Elektromágneses:
  - ⇒ állótekerceses mikrofon
- 4. Elektrosztatikus:
  - ⇒ kondenzátor mikrofon
  - ⇒ elektretmikrofon
- 5. Piezoelektromos :
  - ⇒ kristály mikrofon

### **Irányérzékenység szerint:**

Ezen belül található **egyszerű jelleg görbéjű** és **kombinált jelleg görbéjű típusokat**. Az irányérzékenység a mikrofon működési elvétől, konstrukciójától és méreteinek a megválasztásától függ. A nyomás mikrofonoknál, ahol a membrán mögött zárt akusztikai üreg van, az érzékenység minden irányban egyforma, tehát az érzékenységi jelleggörbe síkban kör alakú.

A sebesség mikrofon membránja mindkét oldaláról érzékel hangnyomást, érzékenységi jelleggörbéje tehát nyolcas alakú.

A jelenleg használatos, és általánosan elterjedt mikrofonok többsége kombinált jelleggörbével rendelkezik, ún. kardioid érzékenységű típus. Ez a nyomásérzékeny és a sebességérzékeny mikrofonok kombinációjának is tekinthető.

Általánosságban tehát három féle irányérzékenységű mikrofonfajtát ismerünk:

- kör, ill. gömbkarakterisztikájú
- nyolcas, ill. kettős gömbkarakterisztikájú
- kardioid, ill. vesekarakterisztikájú

### **Kimeneti impedancia szerint:**

Két mikrofon fajta ismeretes: **-kisimpedancia** ( 50Ω, 150Ω, 200..250Ω )

**-nagyimpedancia** (20...50KΩ )

### **Akusztikai és elektromos jellemzők**

#### **Irányhatás:**

A különféle mikrofonfajták a tér különböző irányából érkező hangrezgéseket az iránytól függően különböző mértékben alakítják át elektromos jelé. A különböző irányból érkező hangrezgések nemcsak eltérő intenzitásúak, de különböző frekvenciájúak is. Szükség van egy olyan jellemző bevezetésére, ami kifejezi a mikrofon adott iránytól és frekvenciától függő érzékenységét és az iránytól függő frekvencia menetét. Ezt az irányérzékenységet a **mikrofon irányhatásának** nevezik.

#### **Frekvencia átvitel:**

Mikrofonok hangátviteli minőségét alapvetően meghatározza a frekvencia átvitel. Az emberi hallástartomány 20...20.000 Hz-ig terjed így a mikrofontól kívánatos, hogy az ebbe eső hangfrekvenciás rezgéseket egyenletesen és arányosan vigye át.

### **Torzítás:**

A hangátviteli hűség alapvető feltétele, hogy a közvetített hangkép csakis ugyanazokat a frekvenciákat tartalmazza mint az eredeti. A mikrofonnal szembe is elsőrendű követelmény, hogy a hangátalakítás során minél kisebb mértékben hozzon létre olyan új frekvenciákat, amelyek az eredeti hangképben nem voltak jelen, és az eredeti nem lineáris torzítás formájában megváltoztatják. Ez a jelenség csupán csak minimálisra csökkenthető.

A torzításokra érzékeny emberi fül már 2%-os nem lineáris torzítási is észlel, 10%-on felüli torzításnál pedig már kevésbé élvezhető a közvetített hangkép

### **Jel-zaj viszony:**

A mikrofonok által szolgáltatott hangátviteli minőség jósága függ a mikrofon saját zajától.

A saját zaj forrása, vagy a mikrofon konstrukciójában, vagy a hozzá kapcsolódó erősítőben van. A saját zajt számszerűen a mikrofonra jellemző jel zaj viszony értékével jellemezhetjük.

### **Belső ellenállás:**

A mikrofon felépítési módja és működési elve meghatározza annak belső ellenállását is. Ez a mikrofonok többségénél azonosnak tekinthető a kimeneti impedanciával.,

Belső ellenállás azt is meghatározza, hogy milyen hosszúságú vezeték lehet a mikrofon és az erősítő rendszer közé kapcsolni, a veszteségek növekedése nélkül.

A kis belső ellenállású mikrofonokhoz hosszabb vezeték csatlakoztatható az erősítőhöz való hozzákapcsolásukhoz, a nagy belső ellenállású mikrofonok pedig csak rövid vezetékkel kapcsolható az erősítőhöz.

### **Vezeték kapacitás:**

A nem kívánt zajfeszültség növekedését úgy lehet megelőzni, ha a vezeték párt fémhuzalból szőtt „árnyékolóharisnyával” vesszük körül, amit az erősítő „földpont” -jához kapcsolunk.

Egy vezetékpar két ere között adott mértékű kapacitás van ami a vezeték hosszával nő. Ez a vezeték kapacitás úgy működik, mint a mikrofonnal párhuzamosan kapcsolt kondenzátor. A „kondenzátorhatás” abba nyilvánul meg, hogy a közvetített hangképben erősen vágja a magas hangokat

### **Korszerű mikrofon fajták**

Négy mikrofonfajtát alkalmaznak szélesebb körben:

- ⇒ dinamikus (mozgótekerceses) mikrofon
- ⇒ szalag mikrofon
- ⇒ kondenzátor mikrofon
- ⇒ elektretmikrofon

### Dinamikus (mozgótekerceses) mikrofon

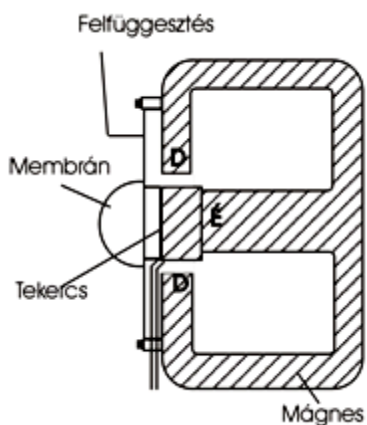
Rugalmas felfüggesztésű műanyag membránja állandó mágnes sarúk előtt helyezkedik el. A membrán egyik oldala közvetlenül érintkezik a légtérrel. Hátoldalára gyűrű alakú tekerecs van rögzítve. A tekerecs a mágnes sarúk közé süllyed be, s ebbe az állandó mágneses térben mozog, ha a membrán felületére jutó hanghullámok megrezgetetik. A tekerecs végpontjairól az így indukált hangfrekvenciás váltakozó feszültség elvezethető.

Az egyszerű mozgótekerceses mikrofon nyomásérzékeny. A különböző mozgótekerceses mikrofonokban körkörös alakú, fél gömbölyű vagy kúpszerű, esetleg gömbsüveg alakú membránokat alkalmaznak. A kombinált felépítésű mozgótekerceses mikrofonok lehetnek sebesség érzékenyek is, vagy kardioid jellegű görbéjük.

Mozgótekerceses mikrofonok érzékenysége típusonként változó:  $0,1...0,2\text{mV}/\mu\text{bar}$ . Kimeneti jelfeszültségük igen kicsi,  $0,1...0,5\text{mV}$ . Kimeneti impedanciájuk  $20...200\Omega$  közötti érték. A kis jelfeszültség és impedancia nem teszi lehetővé, hogy a mikrofont túl hosszú kábellel csatlakoztassuk az erősítőhöz. Ezért azt a megoldást alkalmazzák, hogy a max. 2m hosszúságú közvetlen mikrofonvezeték után vagy előerősítőt, vagy mikrofontranszformátort iktatnak be, és ennek felerősített jelfeszültségét vezetik tovább – ha ez szükséges – nagyobb távolságra.

A jelenleg gyártott, korszerű dinamikus mikrofonokat sok esetben beépített, kis méretű illesztőtranszformátorral látják el és már a mikrofonházból kivezetett jeláram igen hosszú kábelen is elvezethető az erősítőhöz.

Az átlagos minőségű, ún. beszédmikrofonok frekvenciaátvitelére  $80...12000\text{Hz}$ ,  $\pm 4...6\text{dB}$  tűréshatáron belül.



1.1. ábra Dinamikus mikrofon

### A szalagmikrofon

Rugalmas felfüggesztésű, lehetővékony alumínium membránja egy vagy két tekerccsel ellátott állandó mágnesű pófák előtt mozog a felületére jutó hanghullámok rezgéseinek az ütemében. Ennek hatására folyamatosan változik a membrán és a mágneses pólusok közötti légrés

szélessége is. Ez a légrésváltozás folyamatosan változtatja a mágneskör mágneses ellenállását, s így a mágneskör fluxusa is ingadozik a hangrezgés ütemében. Ily módon a hangrezgéssel arányos váltakozófeszültség indukálódik a tekercsekben, ami arról elvezethető.

A szalagmembrán belső ellenállása önmagában rendkívül csekély, általában  $0,1\Omega$ . Emellett a hanghullámok hatására keletkező rezgése közben igen kis jelfeszültség keletkezik, ami csak úgy vezethető el hosszabb távolságra ( akár  $1...2\text{m}$ -re is ), hogy a mikrofonházba kis méretű transzformátort építenek be. Ez egyrészt feltranszformálja az igen kis feszültséget, másrészt a szalag kis ellenállását illeszti a kimeneti vonalhoz.

A felhasznált transzformátorok általában  $1:45$  áttételűek, ami  $200\Omega$ -os kimeneti impedanciát eredményez.

A szalag mikrofon működési módjánál fogva sebesség érzékeny és nyomásérzékeny mikrofonként is kialakítható. Ha mikrofonház olyan kivitelű, hogy a hanghullámok mindkét oldalról akadálytalanul a szalagmembrán felületére juthatnak, akkor sebességi mikrofon állítható elő, nyolcas alakú irányjelleg görbével. Ha azonban a szalagmembrán egy akusztikailag zárt üreg előtt vezet ( tehát csak előlről juthatnak a felületére hanghullámok), akkor nyomásmikrofon állítható elő, amelynek kör alakú irányjelleg görbéje van.

*A korszerű szalagmikrofonokat kardioid jelleggörbével is készítik. Ilyenkor a szalagmembránt két részre osztják a mikrofonházon belül. Az egyik szalagrész zárt akusztikai labirinthoz csatlakozik és nyomásmikrofonként működik, másik szalagfilm mindkét oldalán nyitott és sebességmikrofonként működik.*

Különleges tulajdonságai közé tartozik, hogy a közeltéri közvetítés esetén nagy mértékben kiemeli a mély hangokat.

Érzékenységük  $0,1 \text{ mV} / \mu\text{bar}$ . Frekvenciaátvittele  $30...14000\text{Hz} \pm 6\text{dB}$ .

## **Kondenzátormikrofon**

A különféle mikrofonfajták közül az elektrosztatikus elven működő kondenzátormikrofon a legjobb minőségű hangátalakító. Felépítése alapján egy olyan levegő dielektrikumú kondenzátorhoz hasonlítható, amelynek egyik fegyverzete rögzített, tömör, a másik pedig könnyű, mozgatható. E kondenzátor két fegyverzete közötti távolságot a könnyű, mozgatható fegyverzetre jutó hanghullámok rezgései folyamatosan változtatják. E rezgések hatására változik a két fegyverzet közötti kapacitás is. A mikrofonban kialakított kondenzátor mozgó fegyverzete a membrán. A gyakorlatban ezt erősen kifeszített alumínium vagy aranyfóliából, vagy a felületén fémbevonattal vezetővé tett műanyag hárttyából készítik. A membrán vastagsága  $0,3...0,5\mu\text{m}$ , felülete  $3...5\text{cm}^2$ .

A mozgó és rögzített fegyverzet kb.  $10\mu\text{m}$  távolságra van egymástól. Az említett membránfelület mellett  $70...100\text{pF}$  kapacitás adódik. A fegyverzetek között légpárna van, ami azt biztosítja, hogy a mozgó elektróda (membrán ) mindig alaphelyzetbe térjen vissza a hangrezgés megszűnte után. E légpárna rugalmasságát, s ezzel együtt a membrán-visszatérítő erőt úgy növelik, hogy az álló fegyverzet tömör anyagába apró lyukakat fúrnak.

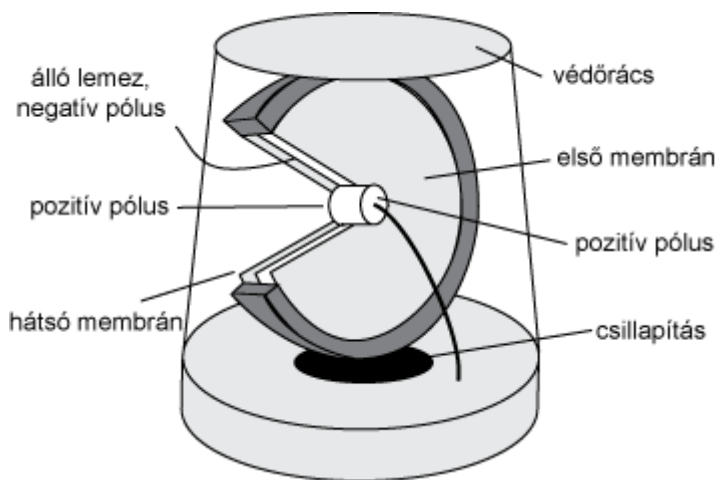
Az így kialakított kondenzátort egy  $M\Omega$  nagyságrendű ellenálláson keresztül, adott üzemi feszültségre töltik fel egyenáramú feszültségforrásról. Ha a membránfelületre hangrezgés jut, megváltozik a két fegyverzet távolsága, s ezzel együtt változik a kapacitásuk is. A

töltés kiegyenlítés hatására áram folyik át az ellenálláson, ami a kimeneti kapcsokról hangfrekvenciás váltakozófeszültségként elvezethető.

A membrán önrezgése általában a közvetítendő hangfrekvenciás sáv felett vannak, s nincsenek hatással a hallástartományba eső hangképre.

A kifeszített membrán kitérése igen csekély, ezért tehetetlensége elenyésző. Ez okozza, hogy a kondenzátor mikrofonok harmonikus torzítása nagyon kicsi. A gyakorlatban 0.3...1% közötti torzítási tényezővel számolhatunk.

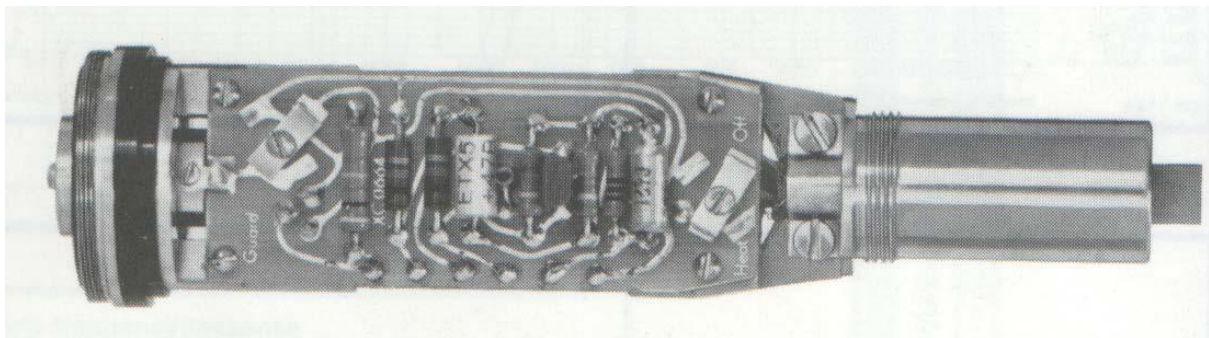
A kondenzátormikrofon belső ellenállása igen nagy, kimeneti jelfeszültsége pedig igen kicsi. Erősítő nélkül csupán 0.05...1mV jelfeszültséget szolgáltat a membránra ható hangnyomástól függően, 10...100M $\Omega$  kimeneti impedancián. Ilyen viszonyok mellett a hangfrekvenciás jelfeszültség még rövidebb (0.5-1m-es) kábelben sem vezethető, a jel-zaj viszony jelentős romlása nélkül. Emiatt a mikrofonházba építik be a 100-200 M $\Omega$  bemeneti impedanciájú előerősítőt, amihez 3...4 cm hosszú vezetékkel csatlakoztatják a mikrofont.



1.2.ábra. Kondenzátormikrofon

### Mérő kondenzátor mikrofon

A kondenzátor mikrofonok nem csak általános hangfelvételi célra, de mérésekre is alkalmasak. A jobb minőségű mérőmikrofonok általában fél collosak, áruk az előerősítővel a fél millió forintot is elérheti. A membrán méretétől erősen függ az érzékenység és a sáv szélesség. Minél nagyobb a membrán, annál jobb az érzékenység, annál kisebb tartományban működik az eszköz. Mérésekhez a negyed collos és az egy collos is előfordul. Kondenzátor mikrofonhoz elengedhetetlen az előerősítő, ami a „nyélben” szokott lenni, erre csavarjuk rá a kapszulát (5.ábra).



### 1.3. ábra: Brüel and Kjaer kondenzátor mikrofon előerősítője a nyélbe építve.

A kondenzátor mikrofonok ismertetőjele, hogy – eltekintve egy-két modernebb ún. prepolarizált fajtától – tápfeszültséget igényelnek. A mérőerősítők (mikrofonerősítők) feladata, hogy a beledugott mikrofonokat tápfeszültséggel lássa el, valamint a kilépő feszültséget erősítse, ezek ugyanis elég alacsony értékek. A tápfeszültséget gyakran „előfeszítésnek” is hívjuk, pár volttól, 48 V-ig (DC) terjed a manapság használatos eszközök igénye, de régebben a 200 V DC is létezett. Ez kellően nagy feszültség ahhoz, hogy veszélyes legyen az emberre és a mikrofonra egyaránt. Éppen ezért, előfeszített, feszültség alatt lévő kondenzátor mikrofont nem szabad ki/be húzogatni, mert a hirtelen fellépő feszültségváltozás tönkretelheti az előerősítőt. Ezért ha kábelezni kell, és ki kell húzni vagy be kell dugni valahova, mindig le kell kapcsolni róla a feszültséget!!! A mérőmikrofonok egy része kisebb feszültséggel is elbír, így telepről is működtethető. Különösen a zajszintmérőkhöz alkalmazott mikrofonoknál fordul ez elő. Mindig ügyeljünk arra, hogy üzemi működéskor be legyen kapcsolva ez a polarizációs feszültség, különben a mért értékek hamisak lesznek (lényegesen kisebbek és valótlanok).

#### **Az elektretmikrofon**

Működési és felépítési elve hasonló a kondenzátormikrofonéhoz, azonban nem igényel nagy bemeneti impedanciájú előerősítőt és polarizáló tápfeszültséget.

A mikrofon membránja ún. "elektretretegéből" készül. Ez nem más, mint vékony szigetelőfólia, aminek kétoldali felületén egymással ellentétes polaritású töltés van felhalmozva. Ezt az elektretfóliát úgy készítik, hogy a szigetelőanyagot felmelegítve elektromos előtérbe helyezik, ahol molekulái polarizálódnak. A szigetelőfóliát ebben az elektromos térben hagyják kihűlni. Ezzel a megoldással a két felületen polarizált töltés rögzítődik, és hasonlóan az állandómágneses térerőhöz, állandó elektromos töltésű tér keletkezik.

Az elektretfólia külső felületére vékony fémréteget gőzöltetnek, s ez képezi a kondenzátor egyik fegyverzetét. A másik fegyverzet rögzített, merev fémtest, amelyhez az elektretfólia szigetelőoldalával hozzásimul.

Az elektretfólia és a fémtest között  $\mu\text{m}$  nagyságrendű légrés van. A merev fegyverzet apró furatokkal perforálják.

A membránfólia rendkívüli vékonysága viszonylag nagy kapacitást eredményez, ami kb. háromszorosa a hagyományos felépítésű kondenzátormikrofonénak. Ezzel arányosan a belső ellenállása kisebb, mint a kondenzátormikrofoné. Ez könnyebbé teszi a hozzá szükséges előerősítő építését is, ugyanakkor polarizáló feszültségre egyáltalán nincs szüksége.

Frekvencia átvitele 20...20000Hz között  $\pm 3\text{dB}$  belül lineáris. Kimeneti impedanciái: 50 $\Omega$ , 250 $\Omega$ , 600 $\Omega$  és 1K $\Omega$ .

Az elektrettek idővel arányosan veszítenek töltésükből, tehát csökken a kapacitásuk. A mikrofonmembrán céljára gyártott elektret felezési ideje (az az idő, amíg az eredeti töltés a felére csökken), 100-110 év. Az ezzel együtt járó érzékenység csökkenés még ennél is lassabb az elektret mikrofonnál. Amint csökken az elektret töltése, csökken a fegyverzetek közötti vonzóerő is, ami a membrán nagyobb amplitúdójú kitérését teszi lehetővé. Ez által az elektret mikrofon érzékenysége a töltés csökkenés ellenére, megközelítőleg állandó marad 80-100 év időtartamban.

#### **Mikrofonok érzékenysége**



A mikrofonok feladata, hogy a levegő rezgéseit a membránjukkal felfogják és azzal arányos kimenő feszültséget hozzanak létre kapcsaikon. A bemenő mennyiség tehát a membránon fellépő hangnyomás (időfüggvénye), a kimenő pedig az üres járási (terheletlen) feszültség.

Az átviteli függvény az érzékenység frekvenciamenten. Az iránykarakterisztika az átviteli függvény térbeli leírása, eloszlása.

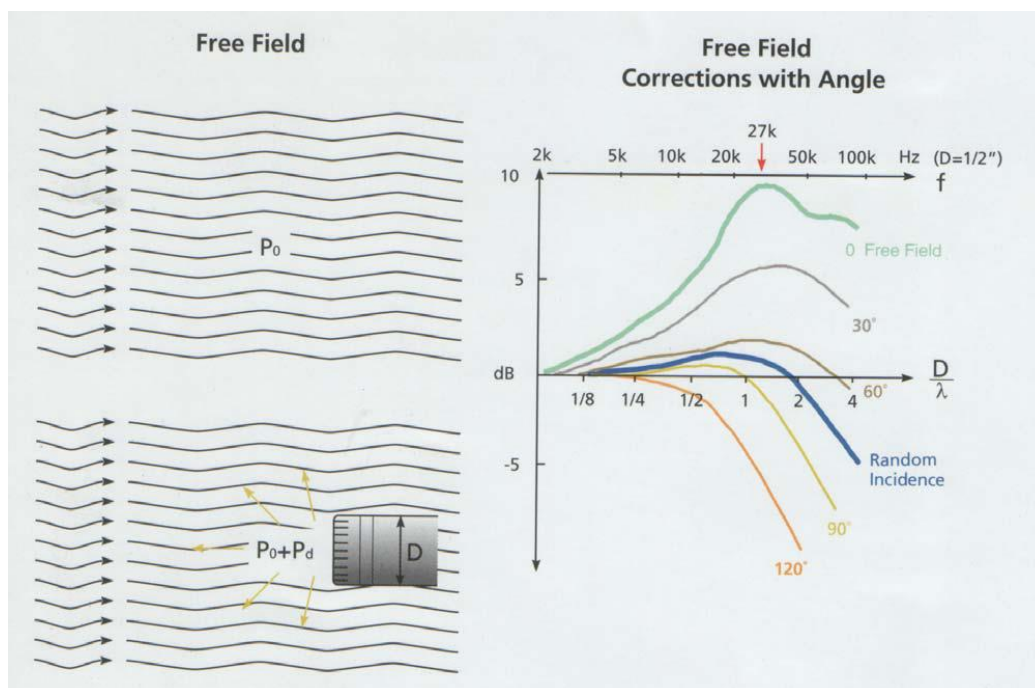
$$e_{\text{mikrofon}}(f) = \frac{u_{ki}}{p}$$

Az érzékenységet a fő tengelyben mérjük, szokásos mértékegységei a [mV/μbar] vagy a modernebb a [mV/Pa].

Az érzékenységnek két fajtáját szoktuk megadni:

1. nyomás: a membránon mért nyomás
2. szabadtéri: hangnyomás értéke a membrán helyén, de a mikrofon nélkül.

Utóbbinak az az értelme, hogyha nő a frekvencia, csökken a hullámhossz, a membrán átmérője összemérhetővé válik a hullámhosszal. Így maga a membrán zavarja a teret, nagyobb lesz rajta a nyomás, ha ott van. Márpedig ez meghamisítja az eredményeket, mert nagyobb értéket fog mutatni a valóságnál (kompenzálásra van szükség).



1.4. ábra: A keresett hangnyomás  $p_0$ , de a mikrofon  $p_0+p_d$  nyomást mér a jelenléte miatt (helyi reflexiók miatt). Ennek értéke irány- és frekvenciafüggő. Szabadtéri mikrofont a forrásra kell irányítani, hogy  $p_0$ -t pontosan mérje. A jobb oldalon láthatók a korrekciós diagramok, melyek az átviteli függvényt úgy módosítják, hogy az „pont jó legyen”.

Az akusztikus eszközöket védelemmel is ellátjuk. A mikrofonok membránja különösen érzékeny, ezért szabadon sosincs, arra csavaros fémháló-fedelet szerelünk. Ennek elsődleges szerepe a mechanikai védelem, másodlagos pedig az akusztikai. A fedélen lévő lyukak és „akadályok” a méretektől függően tömegként, akusztikus ellenállásként viselkednek, a

legfontosabb azonban a membrán és a fedél között keletkezett üreg. Levezetés nélkül jegyezzük meg, hogy az akusztikus kompenzálásnak ez fontos része, mert eredőben a felső határfrekvenciát feljebb tolja, javítja az átvitelt. Kis frekvenciákon kiemelés a mágneskör megfűrésével érhetünk el, amely mélyfrekvenciás (akusztikus) rezgőkört fog létrehozni a tömeggel, amit képvisel.

## 2. Mérő mikrofon-kalibráció

Annak érdekében, hogy pontos méréseket végezhessünk egy mikrofonnal, ismernünk kell annak precíz érzékenységet (volt/Pascalban). Mivel ez az érzékenység a mikrofon élettartamával, légköri körülményekkel változhat, rendszeres kalibrációs méréseket szükséges elvégezni a mikrofonon. E szolgáltatást néhány mikrofongyártó és független tesztlaboratórium szokta nyújtani.

Az elsődleges szabványok szerint készül mikrofon-kalibráció kijelölt nemzeti mérési intézetekben készül, mint pl. a National Physical Laboratory az Egyesült Királyságban, a PTB Németországban, és a NIST az Amerikai Egyesült Államokban, és ezek a mérések nemzetközi szinten elfogadottak. Az elsődleges szabványok szerinti módszer felhasználásával laboratóriumi szabvány körülmények között kalibrált mikrofonokat használnak fel más mikrofonok kalibrálására, az összehasonlítási kalibrációs technikát használva („másodlagos kalibráció”), a „teszt” mikrofon kimenetét a referencia laboratóriumi szabvány mikrofonra vonatkoztatva.

Egy mikrofon érzékenysége a frekvenciával változik (és persze más tényezőkkel, mint pl. környezeti feltételek), ezért normál módon specifikus frekvenciasávonként kerülnek az érték rögzítésre (lásd: frekvenciaspektrum). Egy mikrofon érzékenysége a hangtér természetétől is függ. Ebből kifolyólag a mikrofonokat gyakran több különböző hangtérben kalibrálják, például diffúz térben vagy szabad térben. Alkalmazásuktól függően meghatározott időnként kell tesztelni a mérő mikrofonokat (tipikusan havonta, vagy évente), és minden esetleges megrongálódás után, például, ha leejtették, vagy ha a használt hangszintek az eszköz működési intervallumánál nagyobbak bizonyultak.

**Három különböző kalibrációs módszer ismert: a. Reciprok kalibráció, b. Összehasonlítási kalibráció, c. Dugattyúmembránokat és hangkalibrálókat használó kalibráció**

### a. Reciprok kalibráció

A reciprok kalibráció jelenleg a mérő mikrofonok kalibrációja számára a legkedveltebb elsődleges szabványleírás. A technika kiaknázza bizonyos jelátvitel mechanizmusok reciprok természetét; a mérő mikrofonok általában ilyenkor kondenzátor mikrofonok. A reciprok kalibrációt egy akusztikus csatolóval hajtják végre. Ilyenkor megadják a mikrofon hangnyomásra adott válaszát, ami lehet zárt térben, vagy szabad hangtérben is. A reciprok kalibráció véghezviteléhez három nem kalibrált mikrofont használnak: A-t, B-t és C-t. Az A és B mikrofonokat egymással szemben helyezik el egy akusztikus csatolóban, amelyet arra

terveztek, hogy egy henger alakú üreget hozzon létre a membránok között, lehetővé téve e mérési hely könnyű modellezését. A mikrofonok egyikét hang forrásként működtetik, a másik pedig válaszol a csatolóban létrehozott nyomásra, kimeneti feszültséget produkálva. Feltéve, hogy a mikrofonok viselkedése reciprok (a nyílt áramkör érzékenysége V/Pa-ban megadva, vevőként ugyanaz, mint a szabad érzékenység  $\text{m}^3/\text{s}/\text{A}$ -ban, adóként), megmutatható, hogy a párosított mikrofonok kombinált érzékenységi produktumát az elektromos átadási impedancia és az akusztikus átadási impedanciának aránya adja. Az elsőt a kalibrációs eljárás során mérik, a másodikat az átadási vonalelemzésből vezetik le. Miután az érzékenységi mérést egy mikrofonpárra meghatározták, az eljárást megismétlik a másik lehetséges két páronkénti kombinációval (AC és BC). A három érzékenységi mérés lehetővé teszi az egyéni mikrofonérzékenységek levezetését három egyidejű egyenlet megoldásával. A technika biztosítja a mikrofon érzékenységének mérését anélkül, hogy szükség lenne egyéb, előzőleg kalibrált mikrofonokkal való összehasonlításra.. Számos nemzeti mérési intézet fektetett jelentős erőfeszítéseket a módszer finomításába és a kalibrációs készségek fejlesztésébe. Brüel & Kjør rendszere kereskedelmileg is elérhető.

A levegőben terjedő hanghullámok akusztikai vizsgálataiban, a reciprok technika jelenleg a legprecízebb módszer a mikrofon-kalibráció számára (azaz ennek a legkisebb a mérési bizonytalansága). A szabad hangtéri reciprok kalibráció (a szabad téri válasz megadása, szemben a mikrofon nyomásreakciójával) ugyanezeket az alapelveket követi, és nagyjából ugyanazon módszerrel, mint a zárterti nyomásreciprok kalibráció, de a gyakorlatban a kivitelezés ennél sokkal bonyolultabb. Ezért a gyakorlatban a reciprok kalibrációt akusztikus csatolóval végzik, és azután ha szabadtéri körülmények között kívánják a mikrofont használni, akkor inkább korrekciókat alkalmaznak; az ilyen korrekciókat laboratóriumi szabvány mikrofonokkal szabványosítják (IEC/TS 61094-7), és általánosan elérhetőek a legtöbb hagyományos mikrofontípus számára.

### **b. Összehasonlítási kalibráció**

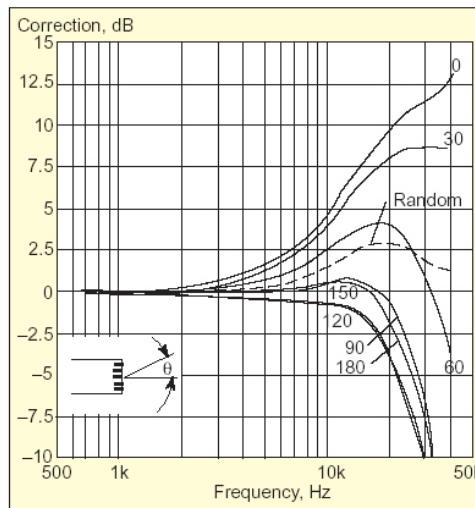
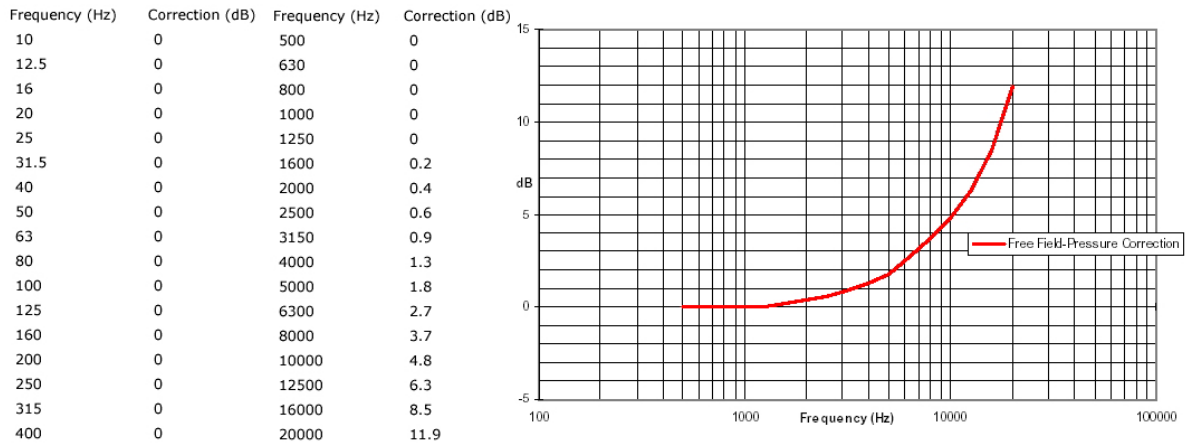
Az összehasonlítási kalibrációt használunk a mikrofon érzékenységének meghatározására, amikor a mikrofon adott hangra adott elektromos válaszát (azaz érzékenységét) összehasonlítjuk az előzőleg kalibrált mikrofon elektromos válaszával (referencia mikrofon). Mivel a referenciamikrofon érzékenysége már ismert, ha a 2 mikrofon ugyanazon ingernek van kitéve (hangterület), a reakciók egyenesen hasonlíthatóak össze. Az összehasonlítási kalibrációt elvégezhetjük egy olyan mikrofonnal amelyet ugyancsak összehasonlítási módszerrel kalibráltak; azonban lényegesen pontosabb a kalibrálás, ha a reciprok méréssel kalibrált mikrofon használjuk mint referenciát.

Az összehasonlítási kalibráció szabad hangtérben (tipikusan egy süketszobában), egy diffúz hangtérben (egy zengőszobában) vagy egy zárt tértfogatban is végrehajtható, attól függően, hogy a mikrofon milyen hangtérben kerül alkalmazásra.

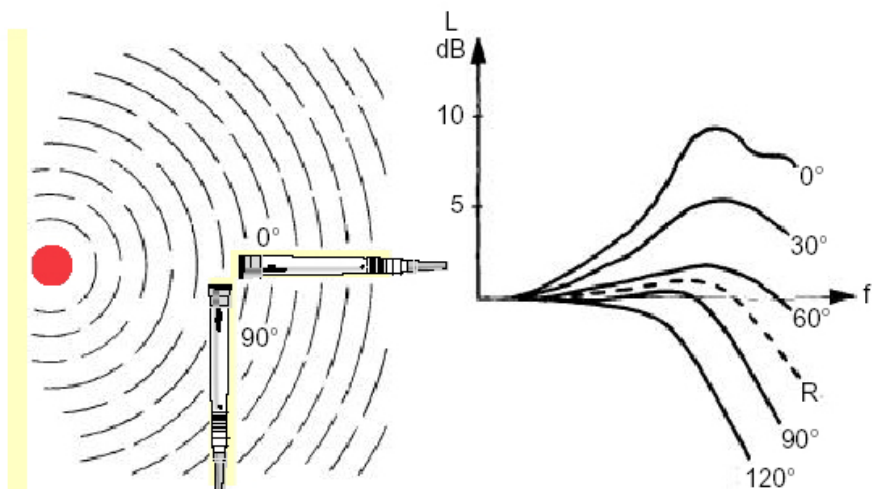
$$\dot{e}_{\text{ismeretlen}} = \dot{e}_0 \frac{U_{\text{ismeretlen}}}{U_{\text{ismert}}}$$

Az ismert (standard) mikrofon és az ismeretlen ugyanakkora hangnyomásnak van kitéve, a keresett érzékenység a két kimeneti feszültségből egyszerűen adódik.

Ha az ismert mikrofon egyenes frekvenciamenetű, akkor süketszobában felvehető vele az ismeretlen szabadtéri frekvenciamenete is. A legtöbb kalibráció a nyomásérzékenységet adja meg. Szabadtéri méréseknél a membrán zavarja a teret magasabb frekvenciákon, amitől megnő a nyomás a membránon (nagyobbat mérünk a ténylegesnél). Ennek eltüntetésére a free-field korrekciós görbék gyárilag adóttak minden típushoz.



### Free Field Correction



## 2.1. ábra: Free-field kalibrációs adatlap és diagramok.

### c. Dugattyúmembránokat és hangkalibrálót használó kalibráció

A dugattyúmembrán egy akusztikus kalibráló (hangforrás), amely zárt térfogatot használ a mérő mikrofonok kalibrációjához való precíz hangnyomás létrehozására. Az elv egy specifikusan ciklikus sebességgel mechanikusan mozgatott dugattyún alapszik, amely összenyomja a levegő rögzített térfogatát, amelyben a két tesztelt mikrofont összekapcsolták. Feltételezzük, hogy a levegő adiabatikusan sűrített, és a hangnyomásszintet a fülkében ki lehet számítani az eszköz belső fizikai dimenzióiból és az adiabatikus gáztörvényből, amely előírja, hogy  $PV^\gamma$  egy állandó, ahol  $P$  a nyomás a fülkében,  $V$  a fülke térfogata, és  $\gamma$  a specifikus hőfokú levegő aránya állandó nyomás alatt specifikus hő esetén, állandó térfogatnál. A dugattyúmembránok nagymértékben függenek a környező nyomástól (mindig korrekciót kívánnak a környező nyomási körülmények) és általánosságban csak arra valók, hogy reprodukálják az alacsony frekvenciákat (gyakorlati okokból), tipikusan 250 Hz-en. A dugattyúmembránok egyébként nagyon precízek lehetnek, jó stabilitással.

Azonban a kereskedelmileg elérhető dugattyúmembránok nem kiszámítható eszközök, és maguk is kalibrálandóak egy kalibrált mikrofon segítségével, ha az eredmények követhetőek; bár általánosságban nagyon stabilak, előfordulhatnak kisebb eltérések az eltérő dugattyúmembránok között létrehozott hangnyomásszintek közt. Mivel kimenetük ugyancsak függ a fülke térfogatától (összekapcsolt térfogat), a különbségek az alak és a töltési térfogat terén a különböző mikrofonmodellek között befolyásolhatják az eredményül kapott SPL-t, amihez éppen ezért kalibrált dugattyúmembrán szükséges.

A hangkalibrálókat a dugattyúmembránokkal azonos módon használják, egy ismert hangnyomást biztosítva az üregben, amelyhez a tesztmikrofon csatlakozik. A hangkalibrálók abban különböznek a dugattyúmembránoktól, hogy elektronikusan működnek és alacsony impedanciájú (elektrodinamikus) forrást használnak egy magas szintű térfogat-független operáció kinyeréséhez. Ezenfelül a modern eszközök gyakran használnak visszacsatolási mechanizmusokat a hangnyomásszint monitorozására és beállítására az üregben, tehát az állandó, függetlenül az üreg/mikrofon méretétől. A hangkalibrálók általában 1 kHz-es szinuszhangokat hoznak létre; az 1 kHz-et választják, mivel az A-súlyozott SPL egyenlő a lineáris szinttel 1 kHz-en. A Bruel and Kjaer cég hangkalibrátora (pisztofon) 1kHz-en 94 dB szintet ad.

A hangkalibrálókat ugyancsak rendszeresen kalibrálni kell nemzetileg akkreditált kalibrációs laboratóriumokban, hogy biztosítsák a követhetőséget. A hangkalibrálók hajlamosak kevésbé precíznek lenni, mint a dugattyúmembránok, ám (névleg) függetlenek a belső üreg térfogatától és a környező nyomástól

### Hivatkozások

- IEC 61094-2, edition 2. (February 20, 2009) "Measurement Microphones, part 2". IEC Standard for Pressure Reciprocity Calibration of Measurement Microphones
- IEC 61094-5, edition 1. (October 16, 2001) "Measurement Microphones, part 5". IEC Standard for Comparison Calibration of Measurement Micropho

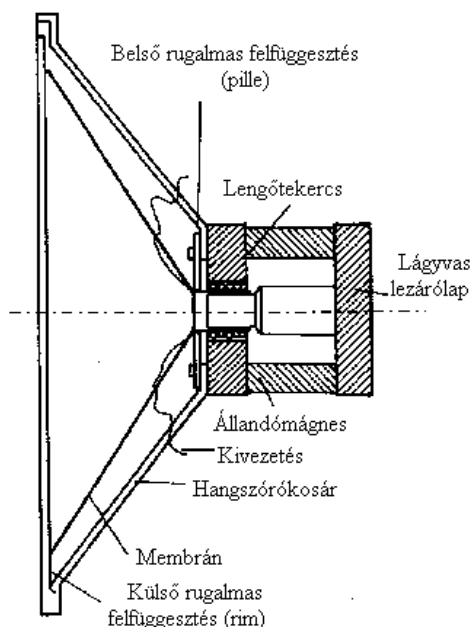
### 3. Hangszórók

#### Hangszórók

**Hangszórónak** nevezzük az elektronikai eszközöket, amelyek elektromos jelet hallható hanggá alakítanak. Az aktív hangszórók jelerősítő elektronikával vannak egybeépítve.

A **dinamikus hangszóró** a leggyakrabban használt hangsugárzó. Önmagában keskenysávú, ezért dobozba építjük. Állandó légrésű mágneskör található benne, melyben sugárirányú (kifelé mutató) erőtér alakul ki. A lengőcséve, a tekercs ebben tengelyirányú mozgást végez, így a hozzá kapcsolt membrán is. A membrán általában papír, műanyag anyagú. Az állandó mágneset alul és felül lágyvas lemezek tartják, melyek mágnesesen vezetők. Ehhez van rögzítve a vas kosár, amelyhez a membránt rugalmasan rögzítjük: felül a rim, alul a pille biztosítja a rugalmas elmozdulást. Ez általában hajlított papír vagy gumi. A lengőcséve kivezetéseire kerül az elektromos gerjesztés, a kivezetések általában a membránra vannak ragasztva.

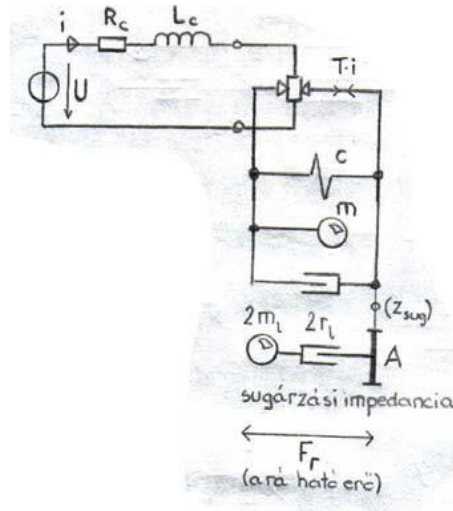
Az elektromechanikai helyettesítő képben megjelenik az  $U$  gerjesztés, az  $R_c$  cséveellenállás (elektromos veszteségek), az  $L_c$  cséveinduktivitás (hiszen a lengőcséve tekercsként is funkcionál), ezért utóbbit a dinamikus hangszóróból sosem szabad kihagyni! A kivezetéseken a tekercsbe áramot bocsátunk. Az áram és a mágnes tér kölcsönhatásaként tengelyirányú erő keletkezik. Az erő mozgásba hozza a nagy felületű membránt, és ezáltal hanghullámokat kelt.



3.1. ábra: A hangszóró általános felépítése

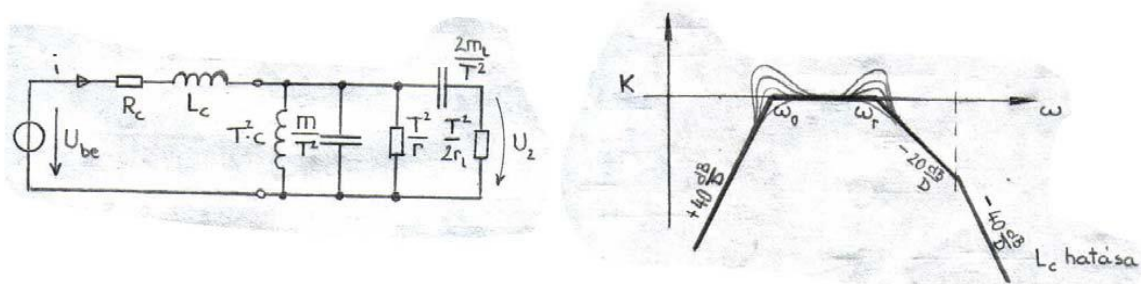
A mechanikai oldalon a  $C$  rugó a rim és a pille rugózását szimbolizálja, a tömeg az összes mozgó tömeget (membrán, lengőcséve), az ellenállás pedig a veszteségeket (súrlódás). A

membránt a sugárzási impedancia terheli, amelynek értéke egyszeres szorzót kap, ha a hangszórót dobozba építjük, kétszeres szorzót (lásd ábra), ha falba, vagy ha szabadon hagyjuk. A kimeneti mennyiség a sugárzási impedanciára ható (azon „eső”) erő, a bementi a feszültség, az átviteli függvény a kettő hányadosa.



3.2. ábra

Az elektromos oldalra való transzformáció után a kép:



3.3. ábra

Az átviteli függvény  $u_2/u_{be}$ . A meredekség a bal oldalon másodfokú, a jobb oldalon először első fokú, majd aztán válik másodfokúvá, miután a nagy frekvencia miatt az  $L_c$  induktív hatása érvényesülni kezd. A rezonancia frekvenciák értéke:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{c(m + 2m_l)}}$$

$$\omega_r = \frac{r_l}{m_l}$$

### Lengőnyelves hangszóró

A dinamikus hangszórótól abban tér el, hogy a tekercs áll, és egy kónuszhoz rögzített lággyvas „nyelvet” mozgat. (A 20. század közepe óta csak történelmi jelentősége van)

## Piezoelektromos hangszóró

A piezo hangszóró a piezoelektromosság jelenségét használja fel: bizonyos kristályok alakja megváltozik, ha megfelelő részein elektromos feszültség alá helyezzük. Mivel a kristályok merevek, ezért csak nagy frekvenciás hangokat tudnak kellő hatékonysággal előállítani.

## Plazmahangszóró

A plazmahangszóró nem más, mint egy folyamatos plazmaforrás. Ahhoz, hogy hangszóróként tudjuk használni, változtatnunk kell a plazma térfogatát. Ez a változás a levegőben nyomáshullámot kelt, amelyet fülünk hangként érzékel. A plazma hangszóró lelke általában egy pár száz kHz, vagy néhány MHz frekvencián működő nagyfeszültségű generátor. A bemenő hangfrekvenciás jel modulálja a nagyfrekvenciás feszültség amplitudóját (AM), vagy kitöltési tényezőjét (PWM), így hatással van a plazma térfogatára.

## A hangszóró legnagyobb problémája a hatásfoka.

$$\eta = P_{\text{akusztikai}}/P_{\text{elektromos}} \cong 1...2\%$$

Ez az érték nagyon alacsony, a befektetett villamos teljesítmény alig 1-2%-a alakul akusztikus teljesítménnyé! Óvatosan bánjunk a kifejezésekkel, amikor arról beszélünk „hány wattos” egy hangszóró. A hangszóróknak megadott üzemi paramétere a „maximális megengedett villamos teljesítmény”, amit feltüntetnek rajta. Ez azt mondja meg, hogy mekkora villamos teljesítmény kapcsolható a kapcsaira anélkül, hogy az tönkremenne. Ennek azonban maximum 1-2%-a alakul át hangteljesítménnyé. Egy 100 Wattos hangszóróból akkor jön ki 1 W hangteljesítmény, ha valóban ráadunk 100 Wattot a kapcsaira!

A hangszóró paramétereit közül már megismertük a terhelhetőséget. Ez adja meg wattban a kapcsokra adható maximális villamos teljesítményt.

Az átviteli tartomány a fenti megismert átviteli függvény -3 dB-es pontjai között értelmezett. A dinamikus hangszóró alapjában felüláteresztő jellegű, és a Bode-diagram közelítésben csak az alsó  $\omega_0$  törésponti frekvenciát adjuk meg. Azonban az átvitel a felső töréspont után esik, így gyakorlatilag sáváteresztővé válik: az átviteli függvény sávközépatvitelétől számított -3 dB-es pontok között értelmezzük az átvitelt.

A harmadik fontos paraméter a névleges impedancia. Definíció szerint ez az 1 kHz-en mutatott impedancia abszolút értékének 4, 6, 8, 16  $\Omega$ -ra kerekített értéke. Ha tehát egy hangszóró „négy ohmos”, akkor az a fenti impedancia görbe alapján 1 kHz-nél 3-5  $\Omega$  körüli értéket mutat. Jegyezzük meg, hogy az impedancia az erősítővel összhangban kell legyen. A mai modern erősítőkre elég széles tartományban 4-16  $\Omega$  közötti hangsugárzókat lehet kapcsolni, és garantált mindkét eszköz biztonsága. A mai hangszórók általában 4 vagy 6 ohmosak. Abból nem származik probléma, ha a hangszóró impedanciája nagyobb az erősítő által igényelthez képest, pusztán a hangerőszabályzót kell feljebb tekerni ugyanakkor a hangerősséghez (ugyanaz az a 4 ohmos erősítő, ugyanakkora kivezérlés mellett fele akkora hangerősséget hoz létre egy 8 ohmos



hangszórón a 4 ohmoshoz képest). Fordított esetben azonban veszélyeztetjük az eszközöket, hiszen a hangszóróra könnyen túlfeszültség juthat, ha ellenállása kisebb az előírtnál. Ha az erősítő 8 ohmon ad le 100 Watt-ot akkor, ha oda négy ohmos hangsugárzót kapcsolunk, annak kapcsaira ennél lényegesen nagyobb teljesítmény is juthat.

A hangszórók, mivel korlátozott tartományban sugároznak, nem alkalmasak a teljes 20 Hz-20 kHz-es tartomány lesugárzására. A többutas hangsugárzók ezért rendszerint két vagy három hangszórót tartalmaznak, esetleg reflexnyílással. A hangsávot általában egyszerű, passzív elemekből álló analóg váltósűrővel választják szét, és vezetik rá az egyes „utakra”.

### **Hangszórók általános minőségi jellemzői**

A különféle rendeltetésű és felépítésű hangerősítők minőségének a megítéléséhez a működési jellemzők ismerete szükséges. A legfontosabbak: frekvencia-átviteli sáv szélesség, jel-zaj viszony, teljes harmonikus torzítás, zajszint, kimeneti teljesítmény, teljesítmény-sáv szélesség, fázismenet, futási idő, hangszóró-kimeneti illesztés, bemeneti érzékenység. Természetesen nem mindegyik erősítőfajtára vonatkoztatható minden minőségi jellemző; a kimeneti teljesítmény, a teljesítmény-sáv szélesség és a hangszóró-kimeneti illesztés csak a végerősítőkre érvényes jellemző.

### **Frekvenciaátviteli sáv szélesség**

A frekvencia-átviteli sáv szélesség mindig a  $\pm 3$  dB-es erősítőcsökkenési pontokhoz tartozó határfrekvenciák Hz-ben megadott értéke és az átviteli karakterisztika e sávon belüli ingadozásának a tűréshatára  $\pm$ dB-ben kifejezve.

### **Jel-zaj viszony**

A hangerősítőkre vonatkoztatva kétféle módon adható meg.

- a) A legnagyobb szinuszos teljesítményre vonatkoztatva (végerősítőknél). Ilyen esetben a jel-zaj viszony a megadott legnagyobb szinuszos kimeneti teljesítményhez tartozó kimeneti feszültség és az erősítőben keletkező zajfeszültség dB-ben kifejezett viszonya.
- b) Az erősítőben keletkező zajfeszültség és egy adott szabványban előírt szinuszos kimeneti teljesítményhez (vagy szinuszos kimeneti jelszinthez) tartozó feszültség dB-ben kifejezett viszonya.

### **Teljes harmonikus torzítás**

A hangerősítő nemlineáris átviteli tulajdonságát jellemző adat. Az angolul Total Harmonic Distortion-nak (THD) nevezett jellemző azt mutatja, hogy az erősítő bemenetére adott tiszta szinuszos hangfrekvenciás jelből - az erősítőn keresztül haladva -, annak áramköreinek a hatására milyen arányban keletkeznek olyan felharmonikusok, amik a bemeneten még nem voltak jelen. A teljes harmonikus torzítás az összes felharmonikusra vonatkozó adat, s értékét %-ban adják meg, az alapharmonikushoz viszonyítva.

### **Zajszint**

A zajszintet az erősítő legnagyobb szinuszos kimeneti teljesítménye (végerősítőknél) vagy maximális erősítése (előerősítőknél) esetén, a kimenetén –bemeneti vezérlés nélkül –megjelenő zaj dB-ben meghatározott értékével jellemzik.

### **Kimeneti teljesítmény**

A hangfrekvenciás teljesítményerősítőkre jellemző az a szinuszos teljesítmény, amit az erősítő az adott frekvencián - vagy frekvenciasávban - meghatározott torzítási tényező mellett tetszőleges ideig képes szolgáltatni a névleges szinuszos bemeneti vezérlőfeszültség erősítésekor, teljes kivezérlés esetén.

### **Teljesítmény-sávszélesség**

A hangfrekvenciás végerősítőket jellemző átviteli frekvenciasáv, amelyen belül az erősítő előírt állandó harmonikus torzítás mellett leadott kimeneti teljesítménye legfeljebb 3 dB-el kisebb a vonatkoztatási frekvenciára megadott értéknél.

### **Fázismenet, futási idő**

A Hi-Fi erősítőkre vonatkozóan szabványos előírás a lineáris fázismenet - az állandó futási idő. Mivel abszolút lineáris fázismenetű erősítő nincs, a jelenleg gyártott Hi-Fi erősítőkkel szemben az a követelmény, hogy a közvetített hangfrekvenciás sávban minden frekvencián azonos legyen a fázistolás mértéke (pl. 10...18 000 Hz között 90°).

### **Hangszórókimeneti illesztés**

Hangfrekvenciás végerősítőknél az a terhelőimpedancia, aminél az erősítő a legnagyobb szinuszos kimeneti teljesítményt szolgáltatja, a névleges torzítási tényező megnövekedése nélkül.

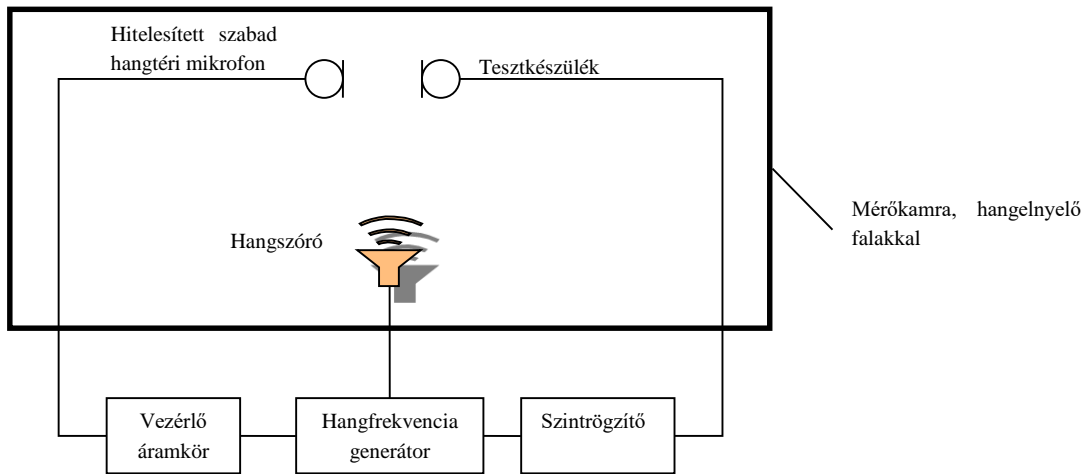
### **Bemeneti érzékenység**

A hangfrekvenciás végerősítőkre vonatkoztatva az a névleges legkisebb bemeneti feszültség, ami ahhoz szükséges, hogy az erősítő kimenetén a névleges szinuszos kimeneti teljesítmény jelenjen meg, az előírt terhelőimpedancián. A bemeneti érzékenység névleges értékét mV-ban, az illesztőimpedanciát W-ban vagy kW-ban adják meg.

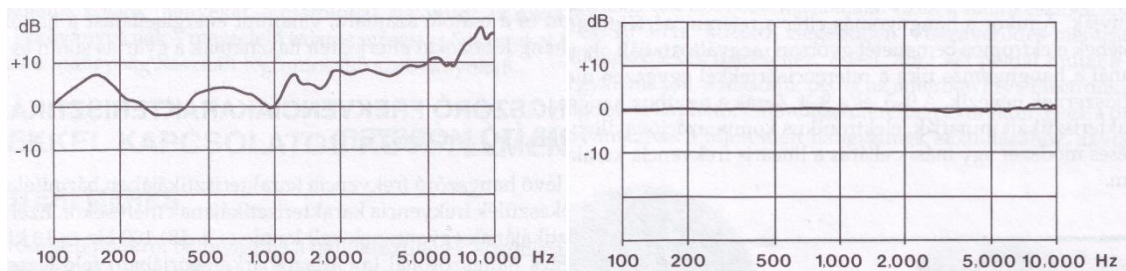
### **Hangszórók hitelesítése összehasonlításos és helyettesítési módszer**

A közönséges hangszórók frekvencia karakterisztikája nem lineáris. Ha olyan eszközre van szükségünk, amelynél ezt nem engedhetjük meg (például hallókészülékek), akkor a frekvencia karakterisztika ilyen módon való ingadozását elektromos úton kompenzálhatjuk. Ez a 3.4. ábrán látható elrendezéssel érhető el. Ez az elrendezés megvalósítható süketszobában vagy erre alkalmas hangdobozban (amely tulajdonságai megegyeznek a süketszobai körülményekkel). Egy kalibrált szabadtéri mikrofont helyezünk el szemben azzal a teszt-ponttal, ahol a hangnyomást mérni szeretnénk. Ezt a helyet általában referenciapontnak hívjuk. Amikor a hangnyomás eltér a referenciaértéktől, a hangszóró erősítőjének elektromos bemenetét megváltoztatjuk oly módon, hogy a referencia mikrofonnál a hangnyomás újra a

referenciaértékkel egyezzen meg. Ezt az eljárást nevezzük összehasonlító módszernek. Az 3.5. ábra egy tesztelt hangszóró jellemző frekvencia karakterisztikáját mutatja kompenzációval és a nélkül.



3.4. ábra: Ellenőrzött mérőfelszerelés vázlat



3.5. ábra: Frekvencia-karakterisztika (bel: eredeti; jobb: kompenzált)

A lineáris karakterisztika elérésére egy másik módszer a helyettesítéses módszer. Ez különösen alkalmas például klinikai alkalmazásra. A helyettesítéses eljárásához csak egy mikrofon szükséges. Ez az eljárás abban különbözik az összehasonlító módszertől, hogy a hangszóró erősítőjének a kívánt hangnyomás eléréséhez szükséges elektromos bemeneti szintje a hallókészülék mérése előtt kerül meghatározásra. Bármilyen hallókészülék mérését megelőzően meghatározzák tehát a hangszóró frekvencia-karakterisztikáját, a mikrofon mérésével a teszt-pontban. Ezt a görbét eltárolják, majd eltávolítják a mikrofont. A későbbi mérések során a hallókészüléket a tesztpontba helyezik, és a hangszóró erősítőjének elektromos bemeneti jelét úgy szabályozzák, hogy kiegyenesítse a tárolt görbét. Így például, ha a tárolt görbének 5 dB-es esése van 3 kHz-nél, akkor a hangszóró erősítőjének elektromos bemeneti jelét úgy növelik meg, hogy ennél a frekvenciánál 5 dB-el erősebb jelet adjon. Hasonlóképpen egy 7 dB-es kiugrás 6 kHz-nél kompenzálható a hangszóró erősítőjének elektromos bemeneti jelének olyan mértékű csökkentésével, ami 7 dB-el csökkentett intenzitású jelet eredményez ennél a frekvenciánál. Ilyen módon megvalósítható az egyenes hangtér a tesztpontban.

## 4. Fejhallgatók

Hangfelvételeket általában hangszórós lejátszáshoz készítünk. A szokványos, ismert sztereofónikus és a manapság elterjedt többcsatornás hangrendszerekhez is olyan felvételeket készítenek, melyeket hangsugárzókon játszunk le. Lejátszás során az adott helységben lévő hangsugárzók átvitele és a helység teremakusztikája határozza meg a végső hangélményt. Ennek része, hogy a csatornák között természetes áthallás legyen (ún. keresztáthallás), hiszen a bal hangsugárzóból érkező hang eljut a bal fülbe és valamivel később a jobb fülbe is, és viszont. A praktikus okok (pld. utazás közbeni zenehallgatás), a környezetünk kizárása és/vagy annak zavartalan működése néha megköveteli a fejhallgató lejátszást. Ennek során a két hangszórót “kellően közel” visszük a fülünkhöz, és a típustól függően jobb-rosszabb minőségben kíséreljük meg a lejátszást. Az elsődleges következmény, hogy azonnal megszűnik a keresztáthallás: a bal csatorna csak a bal fület, a jobb csak a jobb fület fogja gerjeszteni. Továbbá, a fejmozgatásával szerzett információ, mely normál szabadtéri hallásnál jelen van, elveszik: hiába forgatjuk a fejünket, nem jutunk új információhoz, a hangkép együtt mozog a fejmozgatással. Ez a furcsa szituáció megzavarhatja az agyat, kialakítva az egyik legnagyobb hibát, az ún. fejközép-lokalizációt. A fejhallgató lejátszó rendszereket gyakran virtuális világnak, valóságnak is nevezzük. Az igazi virtuális szimuláció, mely a tudományos mélységet célozza meg, nem csupán jó minőségű fejhallgatóval dolgozik, hanem annak kiegyenlítésével és egyéb jelfeldolgozási algoritmusokkal is, mint pld. az emberi fül átviteli függvényének reprodukciója. A mindennapi életben azonban fejhallgatót otthon, illetve jórészt utazás közben használunk. Elvárjuk a jó minőséget, a kényelmes hosszú távú viseletet, a jó ár-érték arányt, a könnyű súlyt és a környezet zavarásának kölcsönös elkerülését. Egyrészt ki akarjuk zárni a környezet zaját, másrészt a zene kiszűrődését a környezet felé. A gyártók az igényeknek megfelelően eltérő minőségű és célú eszközöket gyártanak. Az otthoni hifi, illetve a stúdiócélú fejhallgatók jobb minőségűek, drágábbak, mint egy hordozható MP3 lejátszóhoz szállított.

## Típusok

Az elnevezésekben is szokott zavar és félreértés lenni. A fejhallgató (angolul headphone) olyan eszköz, mely a fejre illeszkedik, a fület többé-kevésbé betakarja és általában nagyobb méretű. A másik elterjedt típus a fülhallgató (insert earphone, in-ear phone), mely a fejre nem illeszkedik, kis méretéből adódóan a hallójárat bemenetéhez, a fülkagylóba illesztjük. Ezek inkább a mobil alkalmazásokhoz, mozgásban, utazáshoz népszerűek. Meglepő módon, a minőségi különbségek nem egyértelműen szólnak egyik típus mellett vagy ellen. A stúdióban inkább a fejhallgatót részesítik előnyben. A fejhallgatókat két nagy csoportra osztjuk attól függően, milyen az illesztés a fülre. A circum-aurális típus teljesen körülveszi az egész fülkagylót, és a koponyára fekszik fel. Átvitelébe éppen ezért a fülkagyló szűrőhatása is belejátszik majd. A fülre felfekvő, a fülkagylót csak részben fedő típust supra-aurálisnak nevezzük. Egy másik csoportosítás szerint létezik zárt ill. nyitott típus. Ugyanakkor hangosításnál, élő koncerteknél a monitor hangszórók szerepét átvették a miniatűr, fülbe illeszthető, már-már láthatatlan fülhallgatók. A legújabb, néhány éve elterjedt típust több névvel is illetik (micro-driver, bass-boost, isolating earphones). Ezek a szokásosnál lényegesen kisebb membránnal és átalakítóval vannak felszerelve, ugyanakkor az akusztikai üregek kiképzése, és

különösen a fülhöz való illesztést biztosító gumi-szivacs betétek segítségével erőteljes mélyátvitelt, erős környezeti zajcsillapítást, könnyű súlyt és jó minőséget ígérnek.

### Mérendő jellemzők

A fej- és fülhallgatók minőségi paramétereit mérni nehéz. Ezeknek az eszközöknek létezik érzékenysége, annak frekvenciamenete (átviteli függvénye) és egyéb nem műszaki paramétere. Ezek meghatározása objektíven, reprodukálhatóan, megfelelő műszerezettség mellett sem egyszerű feladat. Objektív átviteli függvény és csillapítás méréseket süketszobában, műfejvel végzünk. Végezhetünk szubjektív tesztek is, melynek során tesztalányok próbálják ki őket zenehallgatás során, pontozva őket különböző szempontok alapján. Fontos cél lehet például, hogy megállapítsuk, valóban mérhetőek-e a gyártók által hangoztatott átviteli paraméterek és zajszigetelés, illetve, hogy megjelenik-e ez a szubjektív tesztek során. Ám adódhatnak mérés technikai nehézségek, illetve a műfejvel kapcsolatos mérés technikai problémák. Erről bővebben a következő alfejezetben lesz szó.

### Hangszorók Jellemzők mérésének környezete és az eljárás

A fejhallgató érzékenysége definíciója:

$$é_{hangszoró}(f) = \frac{p}{U} \left[ \frac{Pa}{mV} \right]$$
 ahol p valamilyen üregben mért hangnyomás, U pedig a gerjesztő feszültség.

Az érzékenységet 1 kHz-en, dB-ben (1mW-ra) szoktuk megadni. Minél nagyobb az eszköz érzékenysége, annál nagyobb hangerősséget tud produkálni azonos bementő feszültség mellett. Az érzékenység frekvenciamenete az átviteli karakterisztika.

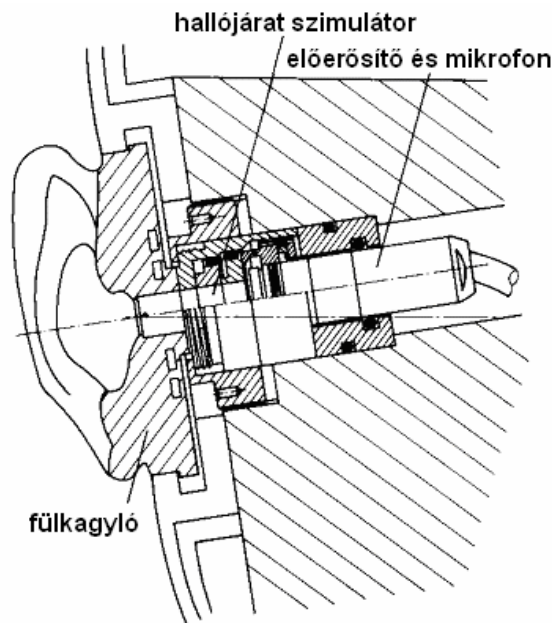
Méréskor a fejhallgatót megfelelő módon le kell zárni. A szokványos mérés technika nem megfelelő, hiszen kérdéses, hogy miként, hova helyezzük el a mérőmikrofont. Ráadásul a fejhallgató üzemi működési körülménye, hogy egy viszonylag zárt üregbe sugároz (hallójárat), melyhez történő illesztése alapjaiban befolyásolja az átvitelt. Mindenki tapasztalta már, hogy amikor a fejtől távol van a fejhallgató, csak a magas frekvenciás hangokat lehet hallani, majd amikor felhelyezzük a fejre, hirtelen „előkerülnek” a mély hangok is. Minél jobban illeszkedik a fejre az eszköz (minél jobban rányomjuk), annál jobb lesz a mélyfrekvenciás átvitel.

A méréseket valamilyen üzemi körülményeket utánozó, de ugyanakkor szabványosítható eljárás során végezzük. Speciális eszközök, műfülüregek, műfejek szimulálják az üzemi körülményeket, és szabványok határozzák meg, mekkora erővel kell rányomni az eszközt a mérőműszerre. Természetesen, a felhelyezés a fejre lényeges szempont: feltehetőleg nem lehet kétszer egyformán ugyanazt az eszközt felhelyezni, így több mérés (fel- és levétel) eredményét szoktuk átlagolni és vizsgálni. Végül, a fejhallgató típusától függően, a fülkagyló szűrőhatása az átvitelben megjelenik. Szupra- és circum-aurális típusoknál erőteljesebb ez a hatás, különösen a 3-4 kHz környékén jellemző kiemelés, amely egyértelműen a fülkagyló járatainak a hatása. A fülkagylót kevésbé lefedő, a hallójáratba illesztet típusoknál ez nem olyan szembetűnő. Tekintettel arra, hogy a mélyfrekvenciás átvitel jórészt az illesztettség függvénye,

a kis hallójáratba illeszthető típusok is meglepően jó, gyakran a nagyobb, drágább eszközöknél is jobb átvitelt produkálhatnak. A micro-driveres eszközök alapötlete is ez: a nagyon jó illesztés eredményeképpen jó mélyhangátvitel és jó külső zajszigetelés. Moller korábban említett méréseiben megállapította, hogy az átvitel messze nem lineáris, amely alacsony frekvencián elsősorban a fejhallgató érzékenységének tudható be. Magasabb frekvenciákon az eltérések oka inkább a személyek közötti individuális eltérésekből adódik, legfeltűnőbbben a kiemeléseknél és a csillapításoknál. Az ingadozás elérheti a 20 dB-t is, néha még struktúra sem ismerhető fel a diagramokon. A függvények blokkolt hallójárat bemeneti mérésnél 7 kHz környékéig felismerhető rendelkeznek jellegzetes átvitellel, és 7-12 kHz között is felismerhetők jellegzetességek.



3.6. ábra: A BK 4128-as műfej fülkagylója.



3.7. ábra: Műfej keresztmetszeti képe a fülkagylóval, a hallójárat és a dobhártya szimulálásával.



## Feladatok – Mikrofon és hangfal mérések

### 1. csoport

#### Mikrofon kalibrálás pisztonfonnal

Kalibrálja a B&K mikrofont a B&K előerősítő és pisztonfon segítségével.

- Csatlakoztassa a mikrofont az előerősítőhöz, valamint az előerősítő kimenetét a számítógép hangkártyájához.
- Ellenőrizze, hogy a csatlakoztatás sikeres volt-e, ehhez használja a Cooledit programot.
- A kalibráláshoz indítsa el az SPL.exe-t.
- Állítsa be a programban a megadható paramétereket (mikrofon érzékenység, maximális kimeneti hangerőszint).
- A Start gomb megnyomása után állítsa be az előerősítőt úgy, hogy a kalibráláshoz megadott jelszintet mérje a program.

#### Mikrofon hitelesítés helyettesítéses eljárással

Hitelesítse a Monacor mikrofonokat a lineáris B&K mikrofon segítségével.

- A hitelesítéshez indítsa el a mikrofon\_hitelesites.exe-t.
- Állítsa be a mérőjelet:
  - a beállítható mérőjel multi-színusz jel, amelynek megadható az alulfrekvencia és a felharmonikusok száma.
- A start gomb megnyomásával a program elkezdi mérni a bejövő jelet a mikrofonról.
- Tartsa a mikrofont egy adott távolságra a hangszórótól (kb. 10 cm), a hangszóró hangerejét pedig állítsa be úgy, hogy a mért jel jól kivehető legyen. Mentse el a vett spektrumot („kimerevítés alulra” gomb).
- Állítsa le a hangfelvételt, majd cserélje ki a mikrofont a Monacor mikrofonra.
- Indítsa el a felvételt, a hangszóró hangerejét változatlanul hagyva.
- A két mikrofon közötti különbség kiegyenlítéséhez nyomja meg a Mikrofon hitelesítés gombot.
- Az erősítés kompenzációhoz tartozó szöveges fájlt a Results/mikrofon\_erosites.txt fájlban találja meg.

### 2. csoport

#### Hangszórók átviteli jelleggörbéjének mérése

Mérje meg több hangszóró átviteli jelleggörbéjét.

- Indítsa el a hangszoro\_hitelesitese.exe programot.
- Generáljon multi-színusz mérőjelet az előző feladathoz hasonlóan.



- A start gombbal elindíthatja a felvételt.
- Mentse el a mért átviteli jelleggörbét.

## Műfüles mérés

---

Mérje meg több fejhallgató átviteli jelleggörbéjét.

- A feladatpontok megegyeznek az előző feladatban leírtakkal.

Tegye lineárisra a mért fülhallgató karakterisztikáját.

- Mérje meg a fülhallgató átviteli jelleggörbéjét, majd a „Hangszóró lineárisra tétele” gombbal állítsa be az erősítés kiegyenlítését.
- Az egyes frekvenciákhoz tartozó kiegyenlítést megtalálja a Results/hangszoro\_erosites.txt-ben.