Teknillinen korkeakoulu
Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka
S-89.112 Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan työt, syksy 1996

Erikoistyö

Seisovan aallon putken ja siihen kuuluvan mittausjärjestelmän kehittäminen ja toteuttaminen

Timo Peltonen, 40579S

Panu Maijala, 37847W

24.1.1997

1. Johdanto 4
1.1 Tehtävän määrittely ja rajaus 4
1.2 Erikoistyön sisältö 4
1.2.1 Alkuperäinen järjestelmä — ensimmäiset mittaukset 4
1.2.2 Suodattimien ja mikrofoniesivahvistimen suunnittelu ja toteutus 4
1.2.3 Mittausjärjestelmän puutteiden selvittäminen 4
1.2.4 Järjestelmään kohdistuneet muutostyöt 5
1.2.5 Mittaukset muutosten jälkeen 5
1.2.6 Referenssimittaukset 5
2. Teoria 6
2.1 Termien määrittely 6
2.2 SAS-putkimittauksen fysikaalinen tausta 6
2.3 SAS-menetelmän rajoitukset 7
2.4 Tulosten määrittäminen SAS-mittaustuloksista 7
2.5 Tulosten määrittäminen MLS-mittaustuloksista 8
2.5.1 Auto- ja ristispektri 8
2.5.2 Taajuusvastefunktio 8
2.5.3 Kompleksinen heijastuskerroin 8
2.5.4 Impedanssi 9
2.6 MLS-mittaukset ja virhetermit 9
2.7 Muut mahdolliset mittaustavat 9
2.8 ISO/DIS 10534 -standardiehdotuksen asettamat mittausvaatimukset 10
3. Mittausjärjestelmä ja siihen tehdyt muutokset 11
3.1 Alkuperäinen mittausjärjestelmä 11
3.2 Mittausjärjestelmään tehdyt muutokset 12
3.2.1 Putkeen kohdistuneet muutostyöt 12
3.2.2 Suodinsuunnittelu 14
3.3 Uusittu mittausjärjestelmä 20
3.3.1 Järjestelmän rakenne 20
3.4 Referenssijärjestelmät 21
4. Mittaukset ja mittaustulokset 22
4.1 Alkuperäinen järjestelmä: Materiaalit ja mittaukset 22
4.2 Alkuperäinen järjestelmä: Mittaustulokset ja niiden arviointi 22
4.2.1 Alkuperäisen järjestelmän tulosten luotettavuus 22
4.2.2 Alkuperäisen järjestelmän systemaattiset virheet 22
4.2.3 Muut virhetekijät 23
4.3 Uusittu järjestelmä: Materiaalit ja mittaukset (25.9.1996) 23
4.4 Uusittu järjestelmä: Mittaustulokset 23
4.5 Tulosten vertailu keskenään 24
4.6 Tulosten luotettavuus ja virhelähteet 25
4.6.1 Systemaattiset virheet 25
4.6.2 Muut virhetekijät 29
4.7 Taajuuspehmennyksen käyttö laskennassa 29
4.7.1 Mittausmenetelmän parannusehdotuksia 29
4.8 Lopuksi 29
5. Lähteet 30
6. Liitteet 30

Erikoistyö

Seisovan aallon putken ja siihen kuuluvan mittausjärjestelmän kehittäminen ja toteuttaminen

Timo Peltonen
Panu Maijala

TKK

timop@cc.hut.fi
pantse@iki.fi

Tiivistelmä

Tässä erikoistyöselostuksessa käsitellään TKK:n akustiikan laboratorion seisovan aallon putkella tehtyjä mittauksia, putkeen ja mittausjärjestelmään kohdistuneita parannuksia ja niiden vaikutuksia mittaustuloksiin. Selostuksessa vertaillaan alkuperäisellä ja parannetulla mittausjärjestelmällä saatuja mittaustuloksia toisiinsa ja VTT:llä suoritettuihin mittauksiin, joita käytetään referenssinä. Lisäksi selostuksessa kuvataan järjestelmään tehdyt lisäykset ja muutostyöt ja pohditaan sen rajoituksia.

1. Johdanto

1.1 Tehtävän määrittely ja rajaus

Erikoistyön tarkoituksena oli selvittää TKK:n akustiikan laboratorion seisovan aallon putken käyttökelpoisuus mittauskäyttöön ja tehdä putkeen tiettyjä parannuksia, joiden myötä putken ominaisuudet saataisiin mahdollisimman hyvin vastaamaan ISO/DIS 10534 -standardiehdotusta. Olennainen osa tätä erikoistyötä muodostui itse putken lisäksi siihen liittyvän mittausjärjestelmän osien valinnasta, suunnittelusta, asennuksesta ja mittauksesta.

Erikoistyön laajuus aiheutti ongelmia tehtävän rajaamisessa. Tämä näkyi erityisesti työn hitaana etenemisenä, sillä uusia huomioitavia seikkoja tuli jatkuvasti esiin työn aikana. Standardiehdotuksessa olevien suositusten osalta putken kaikkia ominaisuuksia ei edes päästy tutkimaan erikoistyön puitteissa.

1.2 Erikoistyön sisältö

Erikoistyön toteutuksen vaiheet on kuvattu lyhyesti seuraavassa. Erikoistyön laajuuden takia osa tehdystä työstä ei suoraan liity putkimittauksiin, vaan esimerkiksi mittausjärjestelmän suunnitteluun ja rakentamiseen. Selvitys näistä on sijoitettu selostuksen liitteisiin. On kuitenkin syytä huomata, että kyseiset liitteet ovat vaatineet merkittävän osan erikoistyöhön liittyvästä työmäärästä.

1.2.1 Alkuperäinen järjestelmä — ensimmäiset mittaukset

Työssä lähdettiin liikkeelle tekemällä sarja mittauksia alkuperäisessä tilassa olevalla putkella. Mittausten tarkoituksena oli selvittää mittaussignaalin suodattamisen vaikutuksia järjestelmän tuottamiin tuloksiin.

Mittausjärjestelmä koostui putken lisäksi mikrofonivahvistimesta ja kahdesta erillisestä suodinyksiköstä, joita käytettiin heräte- ja paluusignaalin käsittelyyn. Tarkoituksena oli korvata nämä erillislaitteet varta vasten suunnitellulla suodatin-vahvistin-yhdistelmällä, joka jää pysyvästi käyttöön putken kanssa.

1.2.2 Suodattimien ja mikrofoniesivahvistimen suunnittelu ja toteutus

Ensimmäisestä mittaussarjasta laskettujen tulosten pohjalta oli tarkoitus suunnitella erillinen suodattimet ja mikrofonivahvistimen sisältävä yksikkö putken mittausjärjestelmää varten.

Ensimmäinen mittaussarja ei kuitenkaan tuottanut niin selkeitä tuloksia, että suodattimien valinta olisi voitu määrätä yksikäsitteisesti niihin pohjautuen. Suodattimien rakenne ja arvot valittiin lopulta työn ohjaajalta saatujen, toisaalla hyväksi koettujen arvojen perusteella. Tästä syystä ensimmäiset mittaustulokset ja suodattimille valitut arvot eivät ole suoraan yhteydessä toisiinsa.

1.2.3 Mittausjärjestelmän puutteiden selvittäminen

Erikoistyön yhtenä tavoitteena oli saavuttaa putken ja mittausjärjestelmän osalta sellaiset ominaisuudet, jotka mahdollisimman suurelta osin täyttäisivät ISO/DIS 10534 -standardiehdotuksissa määritellyt ominaisuudet.

1.2.4 Järjestelmään kohdistuneet muutostyöt

Mittausjärjestelmään tehtiin muun muassa seuraavat muutostyöt:

Putkeen vaihdettiin laadukkaammat kaiutinelementit ja mikrofonikapseli, ja niiden kiinnitys suunniteltiin ja toteutettiin uudelleen. Mikrofonin sijainnin mittausjärjestelyyn suunniteltiin muutoksia. Putken rakenteelliset puutteet, kuten tiiviysongelmat, hitsaussaumojen raot ja näytepalan kiinnitysmahdollisuudet tutkittiin, ja niille pyrittiin löytämään ja toteuttamaan paremmat ratkaisut.

Uusien kaiutinelementtien THD-arvot mitattiin IEC-standardin 268-5 mukaan.

Lisäksi mittausjärjestelmään suunniteltiin ja toteutettiin laajahko erillinen suodatin- ja mikrofonivahvistinosa. Selvitimme myös muita mittausjärjestelmään liittyviä laitteistohankintoja, kuten tarkkojen ilmanpaine- ja lämpömittarien hankintaa.

Tämän lisäksi kirjoitettiin mittaustulosten käsittelyä ja esittämistä varten tarvittava Matlab-koodi. Tämä sisälsi myös MLLSA-järjestelmässä tallennettujen TIM-näytetiedostojen Matlab-ympäristöön tuomiseen ja viemiseen tarvittavan koodin. Erikoistyön tulosten laskentaan käytetyt Matlab-ohjelmat ovat työselostuksen liitteissä.

1.2.5 Mittaukset muutosten jälkeen

Toinen mittaussarja tehtiin sen jälkeen, kun putken muutostyöt ja suodatin-vahvistin-yksikkö saatiin valmiiksi. Koepaloina käytettiin seuraavia akustiikkalevyjä: Duratex, Partec EL100 ja Plain. Koepalat tiivistettiin putken päähän silikonimassalla ja ne mitattiin sekä sini- että MLS-herätteillä. Mittausjärjestelmän yksityiskohtainen kokoonpano on eritelty luvussa 3.

Toinen mittaussarja jouduttiin kertaalleen uusimaan säröytyneen signaalin takia. Ongelma havaittiin vasta tulosten käsittelyssä, ja virhelähteeksi paikannettiin kaiutinelementit, jotka olivat tuottaneet säröä herätesignaaliin. Virheen aiheutti se, ettei kaiuttimeen syötettävää tehoa ollut tarkistettu ennen mittausten aloittamista. Mittaussarja uusittiin, ja tulokset paranivat huomattavasti säröytyneisiin verrattuna. Samalla kuitenkin todettiin, että uusittu järjestelmä on edelleen sangen altis ylimääräisten virhetermien syntymiselle.

1.2.6 Referenssimittaukset

Tulosten hyvyyden selvittämiseksi samat koepalat (Duratex, EL100 ja Plain) mitattiin kahdella VTT:n järjestelmällä. Otaniemessä (VTT Rakennustekniikka/Akustiikka) mittaukset tehtiin B&K 4002 -laitteistolla käyttäen sini- ja MLS-herätteitä. Tampereella (VTT Valmistustekniikka/Turvallisuustekniikka) mittaukset tehtiin automatisoidulla B&K 4206 -laitteistolla, joka tuotti valmiit tulokset. Tuloksia vertaillaan selostuksen kohdassa 4.5.

2. Teoria

2.1 Termien määrittely

Kompleksinen heijastuskerroin $\boldsymbol{R}$ määritellään kahden väliaineen rajapintaan tulevan ja siitä heijastuvan (kompleksisen) paineen summaksi. *Heijastussuhteella r* tarkoitetaan kompleksisen heijastuskertoimen itseisarvon neliötä.

Absorptiosuhde α määritellään pintaan saapuneen ja pinnan absorboiman äänitehon suhteena. Absorptiosuhde voidaan ratkaista heijastuskertoimesta seuraavasti: $\alpha = 1 - |\boldsymbol{R}^2|$.

Pinnan kohtisuora ominaisimpedanssi määritellään paineen ja hiukkasnopeuden kohtisuoran komponentin suhteena: $\boldsymbol{Z_n(f)} = p/\boldsymbol{u_n}$. *Normalisoitu impedanssi* saadaan normalisoimalla tämä ilman karakteristiseen impedanssiin: $\boldsymbol{z(f)} = \boldsymbol{Z(f)}/\rho c$. Tässä erikoistyöselostuksessa käytetään lyhyesti termejä *impedanssi* ja *normalisoitu impedanssi*.

Seisova aalto on yksiulotteiseen tasoaaltokenttään syntyvä stabiili aaltomuoto, jonka solmut ja huiput säilyvät paikallaan ajan funktiona. *SAS* eli *seisovan aallon suhde* voidaan määrittää seisovan aallon painemaksimin ja -minimin itseisarvojen suhteena. *Seisovan aallon putki* on puolestaan rakenne, johon yksiulotteinen seisova aalto synnytetään putken päätteenä olevan materiaalin tutkimista varten.

MLS on menetelmä, jolla voidaan mitata suoraan järjestelmän impulssivaste käyttäen näennäissatunnaista herätesignaalia.

2.2 SAS-putkimittauksen fysikaalinen tausta

Seisovan aallon putki perustuu äänikentän yksiulotteiseen malliin. Putkeen syötetään herätesignaali, joka muodostaa seisovista aalloista koostuvan tasoaaltokentän heijastuessaan putken päästä. Mitattavat kappaleet sijoitetaan putken päätteeksi, jolloin ne vaikuttavat muodostuvaan äänikenttään. Äänikenttä mitataan kahdesta tai useammasta putken pituusakselilla olevasta pisteestä. Näiden sijainti ja painesignaaleista saatu informaatio riittävät putken sisällä olevan äänikentän määrittämiseen yksikäsitteisesti.

Yksiulotteisen seisovan aallon äänikenttä koostuu tulevasta ja palaavasta aallosta:

$$\boldsymbol{p_i}(x,f) = \boldsymbol{p_i}(f)e^{-jkx} + \boldsymbol{p_r}(f)e^{jkx}, \tag{1}$$

jossa x on sijainti putken pituusakselilla. Putken päästä heijastunut palaava aalto vaimentuu heijastuskertoimen $\boldsymbol{R}$ verran tulevaan aaltoon nähden:

$$\boldsymbol{p_i}(x) = \boldsymbol{p_0}(f)\,e^{jkx}; \quad \boldsymbol{p_r}(x) = \boldsymbol{R}\,\boldsymbol{p_0}(f)\,e^{-jkx} \tag{2}$$

Äänikenttää mitataan kahdella painemikrofonilla, jotka sijoitetaan putkeen etäisyydelle d toisistaan. Koska yksiulotteisessa tasoaaltokentässä taajuusvastefunktiot tunnetaan analyyttisesti

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H_i}(f) &= e^{-jkd} \\ \boldsymbol{H_r}(f) &= e^{jkd} \end{aligned}, \tag{3}$$

voidaan mikrofonien painesignaalien välisestä taajuusvastefunktiosta $\boldsymbol{H_{12}(f)}$ määrittää heijastus- ja absorptiosuhde sekä impedanssi.

Kompleksinen heijastuskerroin mikrofonin 1 kohdalla on

$$\boldsymbol{R}(f) = \frac{\boldsymbol{H}_{12}(f) - e^{-jkd}}{e^{jkd} - \boldsymbol{H}_{12}(f)} \quad . \tag{4}$$

Heijastuskerrointa voidaan laskennallisesti siirtää putkessa vapaavalintaiseen kohtaan *x*, esimerkiksi tutkittavan materiaalin pintaan.

$$\boldsymbol{R}(f, x) = \boldsymbol{R}_0(f) e^{2jkx} \tag{5}$$

Absorptiosuhde saadaan seuraavasti:

$$\alpha = 1 - \left|\boldsymbol{R}^2\right| . \tag{6}$$

Heijastuskertoimesta voidaan laskea myös impedanssi, jonka arvoksi saadaan

$$\boldsymbol{Z}(f) = \frac{j \sin kd}{\cos kd - \boldsymbol{H}_{12}(f)} \quad . \tag{7}$$

Impedanssi voidaan normalisoida kertoimella $1/\rho c$.

2.3 SAS-menetelmän rajoitukset

Putken pituus L määrää alimman mahdollisen moodin eli menetelmän alarajataajuuden

$$f_L = \frac{c}{2L} . \tag{8}$$

Yksiulotteisen äänikentän ylärajataajuus f_U määräytyy vastaavasti putken halkaisijan, tai suorakulmaisen putken tapauksessa poikkipinnan pidemmän reunan W mukaan:

$$f_U = \frac{c}{2W} . \tag{9}$$

Tätä suuremmilla taajuuksilla putkessa syntyy pitkittäisten moodien lisäksi myös poikittaisia moodeja, jolloin äänikenttää ei voida enää käsitellä yksiulotteisen mallin avulla.

2.4 Tulosten määrittäminen SAS-mittaustuloksista

SAS-mittaustuloksista laskettiin heijastussuhteet noudattaen ISO/DIS 10534 -standardi-ehdotuksessa annettuja ohjeita.

Mittauksissa määritettiin ensimmäisen paineminimin ja -maksimin amplitudit ja paikat putkessa. Nämä tiedot riittävät seisovan aallon suhteen määrittämiseen, josta voidaan puolestaan laskea heijastus- ja absorptiosuhde.

Seisovan aallon suhde taajuudella *f* saadaan kaavasta

$$s = \left|p_{\max}\right| / \left|p_{\min}\right| . \tag{10}$$

Tästä saadaan suoraan kompleksisen heijastuskertoimen itseisarvo

$$\left|\boldsymbol{R}\right| = \frac{s-1}{s+1} . \tag{11}$$

Kun tunnetaan lisäksi ensimmäisen minimin etäisyys putken päästä (tutkittavasta kappaleesta), vaihe voidaan laskea.

$$\Phi = \pi\left(\frac{4x_{\min,1}}{\lambda_0} - 1\right) \tag{12}$$

Tulokseksi saadaan kompleksisen heijastuskertoimen reaali- ja imaginaariosat:

$$\begin{aligned} \mathrm{Re}(\boldsymbol{R}) &= |\boldsymbol{R}|\cos\boldsymbol{\Phi} \\ \mathrm{Im}(\boldsymbol{R}) &= |\boldsymbol{R}|\sin\boldsymbol{\Phi} \end{aligned} \tag{13}$$

Absorptiosuhde saadaan heijastuskertoimesta samoin kuin edellä.

2.5 Tulosten määrittäminen MLS-mittaustuloksista

Seuraavana esitetty laskenta suoritetaan Matlab-rutiinien *ekaputki.m* ja *sasputki.m* avulla. Mitattujen impulssivasteiden aikatasossa olevat näytejonot luetaan MLSSA-ohjelmassa tallennetuista TIM-tiedostoista Matlabiin *timread.m*-makron avulla.

Matlab-makrojen listaukset ovat työselostuksen liitteissä.

2.5.1 Auto- ja ristispektri

Matlabissa näytejonoista lasketaan energia-autospektrit $G_{11}(f)$ ja energiaristispektrit $\boldsymbol{G_{12}(f)}$ käyttämällä **PSD** (Power Spectral Density)- ja **CSD** (Cross Spectral Density)-funktioita, jotka löytyvät Matlabin Signal Processing Toolkitistä. Funktioille annetaan argumenteiksi aikatason näytejono tai näytejonot, näytejonon pituus (16 383), näytteenottotaajuus (4000) sekä taajuuspehmennykseen käytettävä ikkunointifunktio (256 pisteen Hanning-ikkuna).

2.5.2 Taajuusvastefunktio

Lasketuista auto- ja ristispektreistä muodostetaan taajuusvastefunktiot $\boldsymbol{H_{12}(f)}$. Tarkasteltaessa heijastuskertoimien käyriä havaittiin, että osassa mittauksia vaste saatiin käyttämällä taajuusvastefunktiota $\boldsymbol{H'_{12}(f)}$. On huomattava, että kaavat poikkeavat toisistaan vain mallin tarkastelusuunnan tai -järjestyksen osalta. [Lahti: Akustinen mittaustekniikka, s. 97]

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_{12}(f) &= \frac{\boldsymbol{G}_{12}(f)}{G_{11}(f)} \\ \boldsymbol{H}'_{12}(f) &= \frac{G_{11}(f)}{\boldsymbol{G}_{12}(f)} \end{aligned} \tag{14}$$

Seuraavaksi Matlab-makrossa rajataan saaduista taajuusvastevektoreista haluttua ylärajataajuutta korkeammat taajuudet pois. Tämä nopeuttaa tulosten jatkokäsittelyä ja rajaa tulostettavien käyrien taajuusalueen halutuksi.

Tämän jälkeen muodostetaan aaltolukuvektori, joka saadaan seuraavasti pistetaajuusvektorista $\boldsymbol{f}$:

$$\boldsymbol{k}(f) = \frac{2\pi}{c}\boldsymbol{f}(f) \tag{15}$$

2.5.3 Kompleksinen heijastuskerroin

Kompleksiset heijastuskertoimet ensimmäisissä mittauspisteissä saadaan kaavasta

$$\boldsymbol{R}(f) = \frac{\boldsymbol{H}_{12f}(f) - e^{-jkd}}{e^{jkd} - \boldsymbol{H}_{12}(f)}, \tag{16}$$

jossa d on mittauspisteiden välinen etäisyys (0,15 m kaikissa mittauspareissa).

Koska TKK:n putkella mittaukset tehtiin varmuuden vuoksi kolmesta pisteestä, heijastuskertoimet lasketaan sekä ensimmäisen ja toisen että toisen ja kolmannen mittauspisteen väliltä.

Heijastuskertoimet siirretään materiaalin pintaan käyttäen kaavaa

$$\boldsymbol{R}(f,x) = \boldsymbol{R_0}(f)e^{2jkx}, \tag{17}$$

jossa x on lähemmän mittauspisteen ja materiaalin pinnan välinen etäisyys.

Heijastuskertoimista oktaavikaistoittain lasketut absorptiosuhteet on taulukoitu kohdassa 4.5. Mittaustuloksista lasketut heijastuskertoimet löytyvät myös käyrinä selostuksen liitteistä.

2.5.4 Impedanssi

Impedanssin lausekkeeksi saadaan [Lahti: Akustinen mittaustekniikka, s.122]

$$\boldsymbol{Z}(f) = \frac{j\sin kd}{\cos kd - \boldsymbol{H}_{12}(f)}\ , \tag{18}$$

jossa d on mittauspisteiden välinen etäisyys (0,15 m kaikissa mittauspareissa).

Oktaavikaistoittain lasketut impedanssit on taulukoitu kohdassa 4.5. Mittaustuloksista lasketut impedanssikäyrät ovat selostuksen liitteissä.

2.6 MLS-mittaukset ja virhetermit

Jotta impulssivasteen luotettavuus voidaan varmistaa, mittauksissa tulee huomioida eri mittauspisteistä saatujen näytejonojen keskinäiset koherenssit. MLS-herätteellä tehty mittaus tuottaa jo sinällään keskiarvoistetun impulssivasteen, joten yksi mittaussarja riittää tuottamaan tarvittavan tarkkuuden. MLS-menetelmän käyttö puolustaa paikkaansa, sillä N-pituisen MLS-jonon autospektri on (N+1)-kertainen verrattuna yksikköimpulssijonoon, jolla on sama amplitudi [Lahti: Akustinen mittaustekniikka, s. 137]. Tästä seuraa voimakas parannus signaali-kohinasuhteeseen, joten myös mittausten koherenssin pitäisi olla verraten hyvä.

Koska putken vaimennuskerrointa ei tunnettu eikä sitä ryhdytty erikseen määrittämään, laskuissa käytetään aaltoluvulle k arvoa ω_0 / c_0 . Väliaineen vaimennuksen huomioiminen vaikeuttaisi laskuja myös siksi, että tällöin kaava 1 ei enää olisi vain etäisyyden x funktio, vaan äänen etenemisnopeudessa pitäisi huomioida myös väliaineen kompleksinen tiheys ja puristuvuus [Toivanen: Teknillinen akustiikka, s. 46]. Laskuissa oletetaan siis häviötön väliaine.

2.7 Muut mahdolliset mittaustavat

Tärkeimmät heijastuskertoimen, akustisen impedanssin ja intensiteetin mittaustavat putkimenetelmän ohella ovat korvausmenetelmä, ikkunointimenetelmä ja erilaiset yksi- ja kaksikanavaiset intensiteettimenetelmät.

Korvausmenetelmässä mittaus suoritetaan ensin ilman mitattavaa pintaa joko vapaassa kentässä tai äärettömäksi katsottavalla pinnalla. Tutkittava pinta tuodaan äänikenttään ja mittaus uusitaan kappaleen pinnalla. Menetelmä tuottaa yleensä vain pinnan reaalisen tehoheijastussuhteen.

Ikkunointimenetelmässä tuleva ja heijastunut ääniaalto mitataan yhtäaikaa, ja rajataan aikatasossa toisistaan erilleen. Menetelmä vaatii suurehkon tilan, jotta suorasta ja heijastuneesta signaalista saadaan kyllin pitkät näytteet ennen niiden sekoittumista muihin

heijastuksiin. Ikkunointimenetelmällä lasketaan pinnan tuottama taajuusvastefunktio, josta voidaan määrittää heijastuskerroin. Yleensä taajuusresoluutio jää kuitenkin heikoksi mittaustilojen rajallisen koon vuoksi.

Intensiteettimenetelmät perustuvat äänikentän paineen mittaamiseen samanaikaisesti kahdessa pisteessä, jolloin painesignaaleista voidaan muodostaa hiukkasnopeuden approksimaatio. Näistä voidaan muodostaa suoraan äänen kompleksinen intensiteetti ja kaikki muut halutut suureet. Intensiteettimenetelmä tuottaa muihin menetelmiin verrattuna tarkimmat tulokset, mutta vaatii suuren tarkkuuden lisäksi kaksikanavaisen mittausjärjestelmän tai erikoismenetelmiä yksikanavaisissa mittauksissa.

2.8 ISO/DIS 10534 -standardiehdotuksen asettamat mittausvaatimukset

Alla on eritelty joitakin standardiehdotuksessa mainittuja keskeisiä vaatimuksia, jotka pyrittiin huomioimaan putkeen tehdyissä muutostöissä.

ISO/DIS 10534, kohta 5: Putken halkaisijan tulee olla vakio ±0,2 % tarkkuudella. Seinämissä ei saa olla reikiä eikä rakoja mittausalueella, ja niiden tulee olla jäykät.

ISO/DIS 10534, kohta 5.1: Poikkileikkaukseltaan suorakulmaisissa putkissa kulmaliitosten tulee olla riittävän jäykät, jotta sivuseinämien muoto ei pääse vääristymään. Sivuseinämien suositeltava paksuus on noin 10 % putken halkaisijasta.

ISO/DIS 10534, kohta 5.5: Siirreltävän mikrofonin sijainti on voitava mitata vähintään 0,5 mm tarkkuudella.

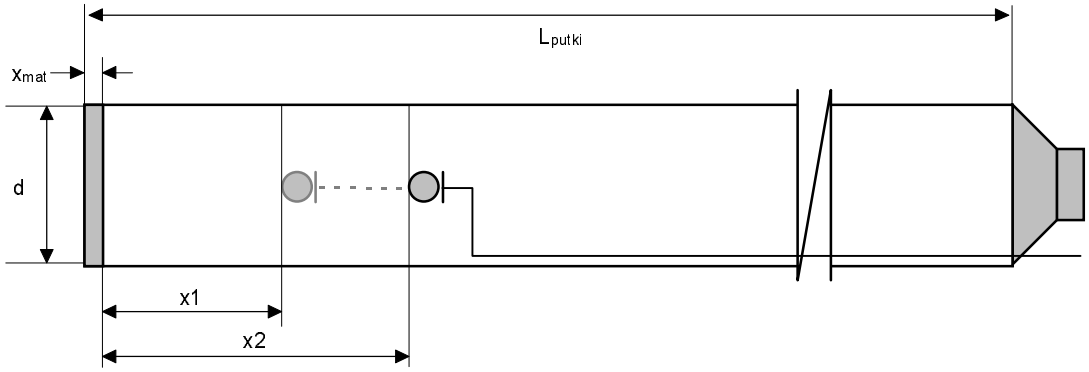
ISO/DIS 10534, kohta A.2.1.1: Jos näytekappaleen pinnan ja lähimmän mikrofonin välinen etäisyys on suurempi kuin kolme kertaa putken sisähalkaisija, se täytyy huomioida tulosten laskennassa.

ISO/DIS 10534, kohta 5.9: Kaiutinelementin kalvon tulee peittää pinta-alaltaan vähintään 2/3 putken poikkileikkauksesta.

3. Mittausjärjestelmä ja siihen tehdyt muutokset

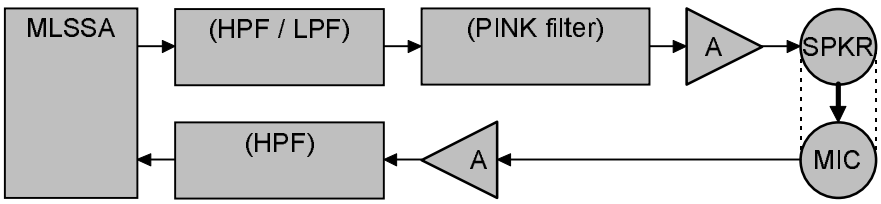
Erikoistyön mittaukset tehtiin TKK:n akustiikan laboratorion suurella seisovan aallon putkella, jonka sisähalkaisija on noin 250 x 250 mm ja pituus 8820 mm. Putken alarajataajuus on siis $f_L = 20$ Hz ja ylärajataajuus $f_U = 690$ Hz. Mittaustulosten käsittelyssä rajoitutaan tälle taajuusalueelle.

3.1 Alkuperäinen mittausjärjestelmä



Kuva 1. TKK:n seisovan aallon putki.

Kuvassa 1 esitettyyn seisovan aallon putkeen syötetään kaiuttimesta herätesignaali, joka heijastuu vastakkaiseen päätyyn asetetun näytekappaleen pinnasta. Mittaus suoritetaan pisteessä *x1* ja toistetaan siirtämällä putken sisällä olevaa mikrofonikapselia pisteeseen *x2* putken pituusakselilla. Putken ylärajataajuutta f_U vastaava aallonpituus muodostaa mittauspisteiden etäisyydelle ylärajan 50 cm, jotta mittaukset saadaan aallon samasta jaksosta. Koska mittauksissa käytettiin herätteenä MLS-signaalia, ei yksittäisen siniaallon solmukohtia tarvinnut varoa mittauspisteiden valinnassa.



Kuva 2. Alkuperäisen järjestelmän mittauksen signaalikaavio.

Mittaukset tehtiin käyttäen pc-tietokoneeseen kytkettyä MLSSA-mittauskorttia ja -ohjelmistoa. Mittauslaitteisto on esitetty kuvassa 2 ja laitteet on eritelty taulukossa 1.

HP / LP -suodatin	KEMO Dual Variable Filter, type VBF/4
PINK-suodatin	B&K Weighting Network, type WB0078
Päätevahvistin	B&K Power Amplifier, type 2706
Mikrofonivahvistin	B&K Microphone Amplifier, type 2636

Taulukko 1. Alkuperäisen järjestelmän mittaukseen käytetyn laitteiston erittely.

Mittaukset suoritettiin järjestelmällisesti niin, että suodattimien käytön tai käyttämättä jättämisen vaikutuksia voidaan vertailla keskenään mahdollisimman monipuolisesti. Mittauksilla pyrittiin selvittämään eri suodatinvaihtoehtojen vaikutusta mittaustuloksiin.

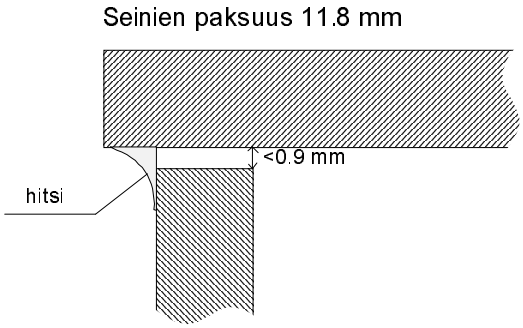
3.2 Mittausjärjestelmään tehdyt muutokset

3.2.1 *Putkeen kohdistuneet muutostyöt*

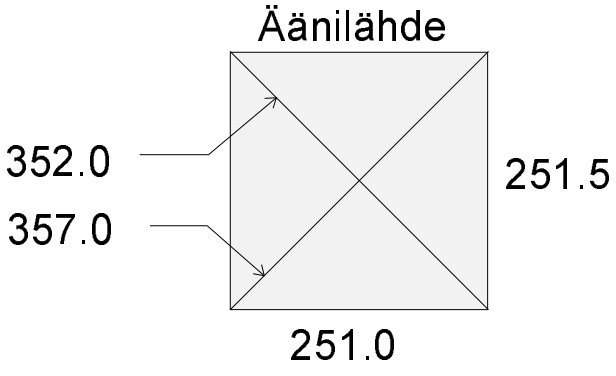
Seuraavassa on esitetty järjestelmään kohdistuneet muutostyöt suhteessa ISO-standardi-ehdotuksessa asetettuihin vaatimuksiin.

Putki

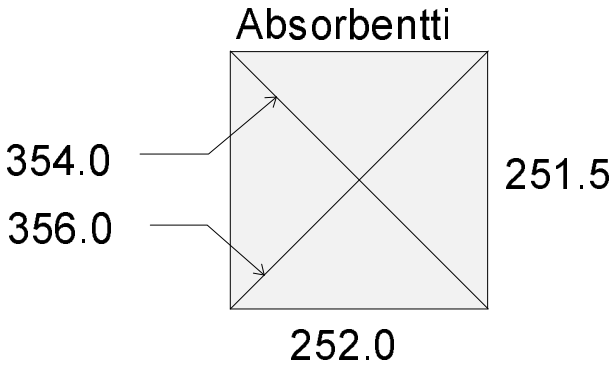
- TKK:n putken sisämitat täyttävät 0,2 % tarkkuusvaatimuksen. Ehto aiheutti tiivisteen uusimisen näytekappaleen vaihdossa käytettävään "luukkuun" sekä putken kappaleiden välitiivisteen uusimisen. Putken näytepäässä havaittiin 10 mm:n reikä, joka tukittiin.
- Putken tiiviys testattiin paineilmalla. Tätä varten valmistettiin erillinen painetta pitävä päätylevy, jossa oli manometri kiinni. Putki piti yhden ilmakehän painetta kohtuullisen ajan. (Osoitin ei liikahtanut minuutin aikana.)
- Näytteen asennusaukkoon tulee kiinnittää erillinen tiivistyspanta, sillä putken suunnittelussa kyseisen aukon tiiviyttä ei ole otettu lainkaan huomioon.
- Putken seinämät eivät täytä standardin suorakulmaputkelle asettamaa 10 prosentin paksuusehtoa. Seinämien jäykkyys on siis standardiin verrattuna kyseenalainen. Olsiko vaihtoehtona siis koko putken upottaminen hiekkalaatikkoon??



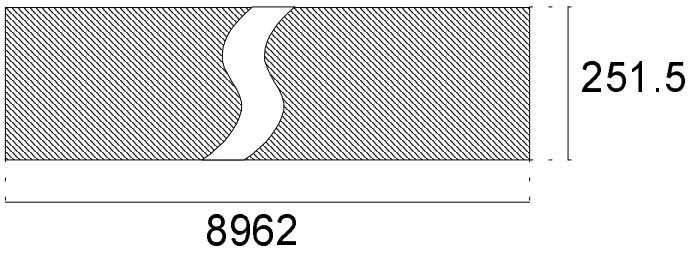
Kuva 3. Levyjen hitsausliitos



Kuva 4. Kaiutinpäädyn aukon sisämitat



Kuva 5. Näytteen asennusaukon sisämitat



Kuva 6. Putken sisämitat sivusta katsoen. Pohja käy ilmi edellisistä kuvista.

Mikrofoni

- Mikrofonin etäisyyden määritys 0,5 mm:n tarkkuudella on kyseenalaista. Arviolta ± 3,5 mm:n tarkkuus on toistettavissa nykyisellä varustuksella. Mikrofonin ripustuksessa on hystereesiä varsin paljon, sen saa pysymään eri paikoissa 7 mm:n matkalla siirtotankoon nähden.
- Mikrofonin ripustuksen tukevuutta ei määritetty. On mahdollista, että siirtotankoa pitkin tulee värähtelyä mikrofoniin saakka.
- Etäisyys näytteeseen mikrofonin etäisimmässä mittauspisteessä pitää olla alle kolme putken halkaisijaa tai kolme kertaa suorakulmaputken suurin poikittainen ulottuvuus. Muussa tapauksessa täytyy määrittää putken vaimennuskerroin ISO/DIS 10534-2 liitteen A.2.1.2 mukaan.
- Mikrofonin siirtelysauva vaihdettu pidempään, sillä vanha ei ylettynyt päätyyn saakka!

Kaiutin

- Putken kaiutinelementeiksi vaihdettiin kaksi kappaletta 8 ohmin bassoelementtejä vastakkaisiin vaiheisiin rinnankytkettynä.

$$\frac{\pi * \left(\frac{185}{2}\right)^2}{251 * 251.5} \approx 0.426 < \frac{2}{3} \tag{19}$$

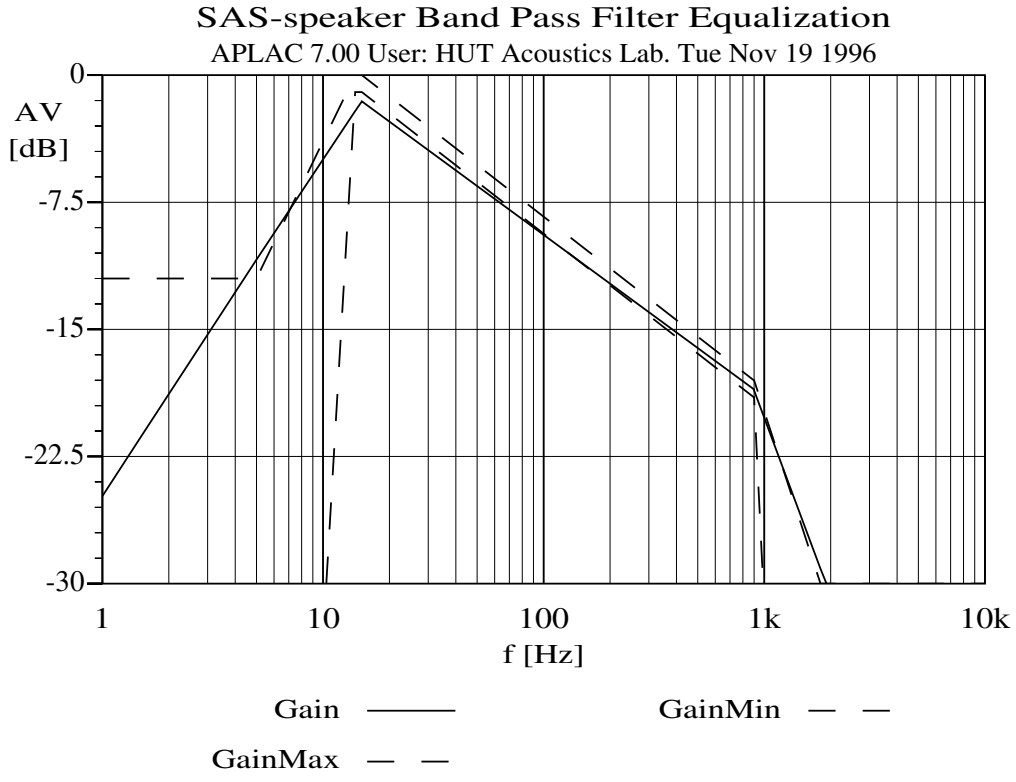
Kuten kaavasta voidaan havaita, kaiuttimen kalvon pinta-ala ei ole 2/3 putken poikkileikkauksen pinta-alasta, vaan huomattavasti vähemmän. Toisaalta rinnankytketty elementtipari antaa enemmän tehoa kuin yksittäinen elementti.

3.2.2 Suodinsuunnittelu

Järjestelmään suunniteltiin kaistanpäästösuotimet sekä herätteelle, että mikrofonilta palaavalle mittaussignaalille. Kummankin suotimen -3 dB rajataajuudet ovat 15 ja 800 Hz. Suunnittelussa käytettiin hyväksi *Aplac-piirisimulointiohjelman* optimointiominaisuuksia.

3.2.2.1 Kaiuttimelle menevän signaalin suodatin

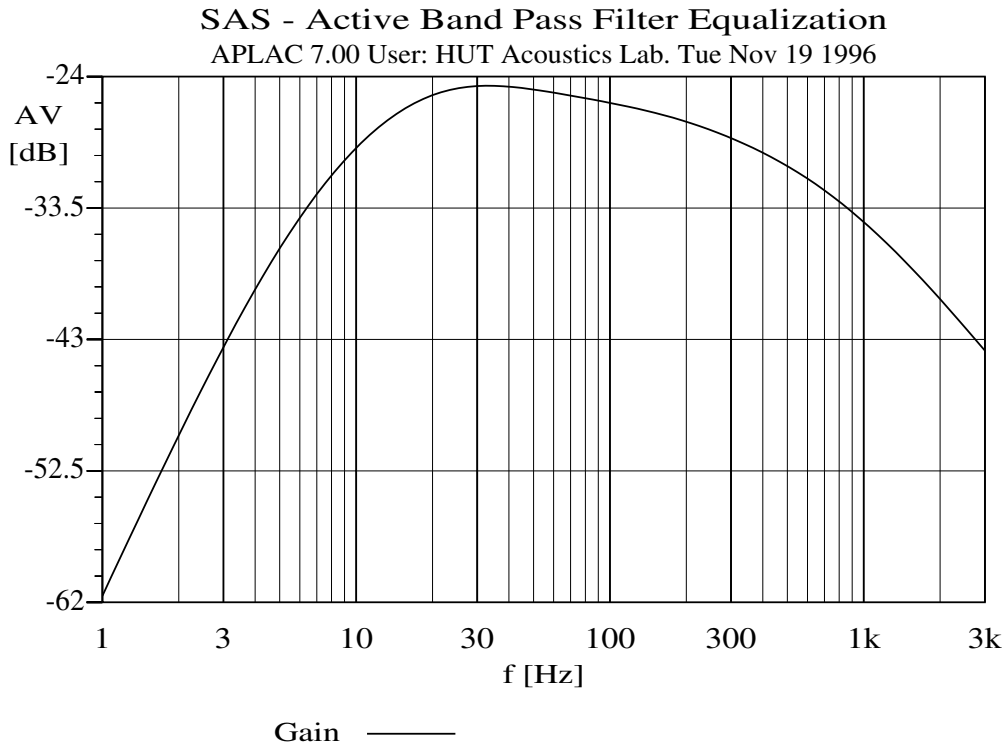
Herätteelle haluttiin kaistanpäästösuodatuksen lisäksi -3 dB/okt laskeva suodatus. Tällä oli tarkoitus varmistaa, että signaali-kohinasuhde pysyy järkevänä sillä taajuusalueella, missä sitä tarvitaan. Optimointitavoite oli että 15 Hz:n ja 800 Hz:n kohdalla tulisi siirtofunktion olla -3 dB:ssä ja välillä 20-600 Hz tulisi pysyä ±0.5 dB:n sisällä.



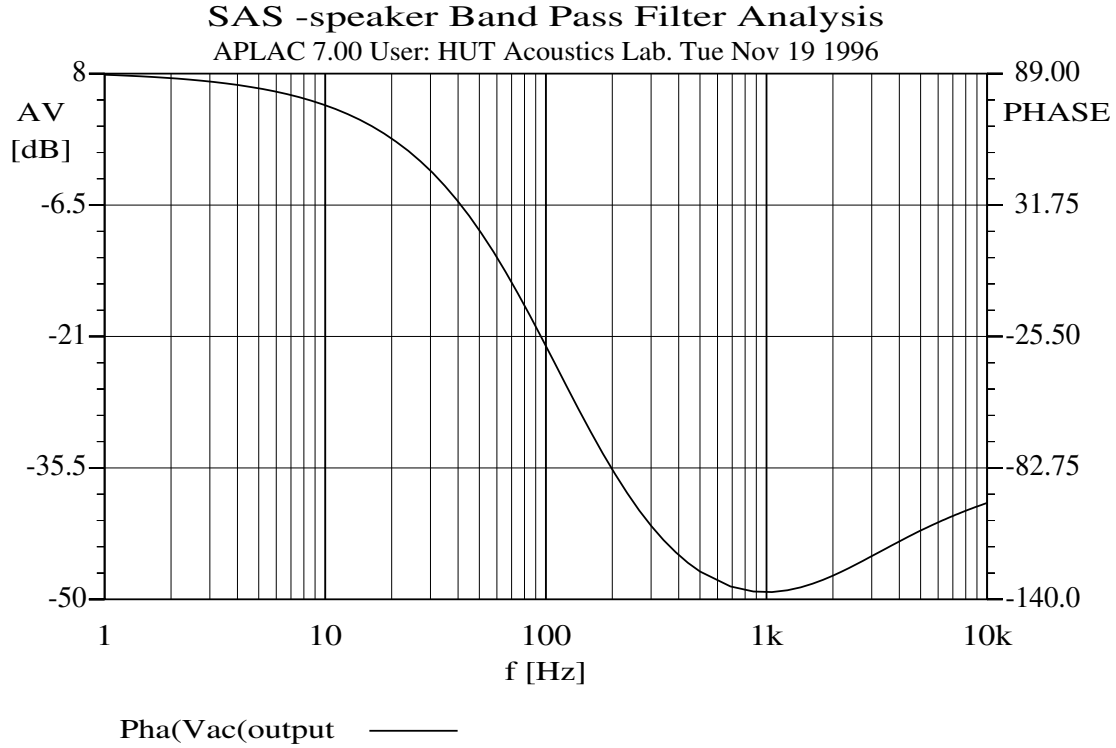
Kuva 7 Herätesignaalin tavoitevaste

Seuraava Aplac-koodi määrittelee halutun optimointitavoitteen. Edellä olevasta kuvasta nähdään sama graafisessa muodossa.

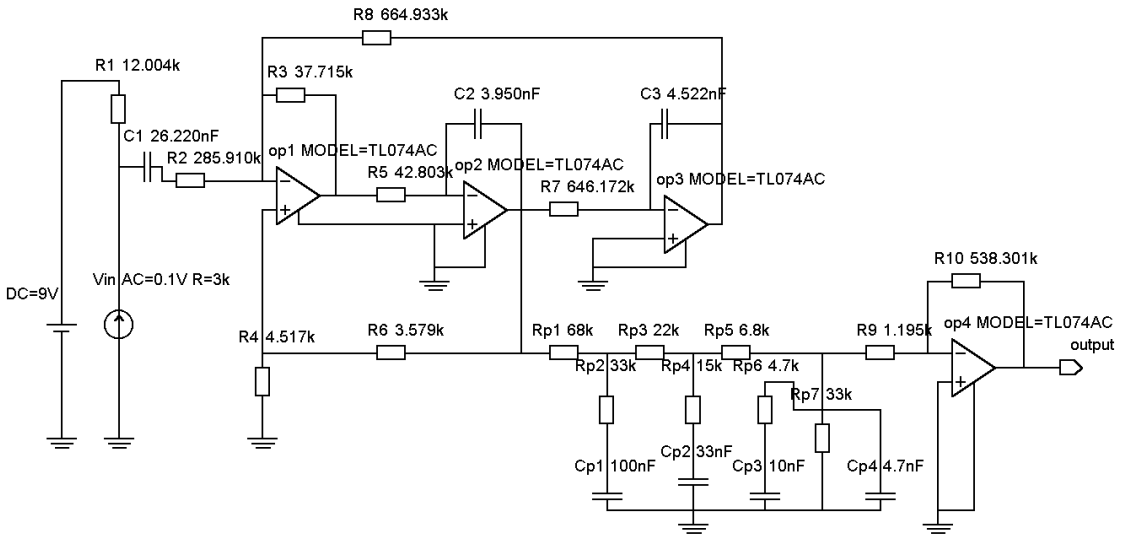
```
GoalData Gain
+TYPE      FIRST      LAST  PTS   MIN   MAX
+LOG       1    15    8     -100  -3
+LOG       20   600   15    -0.5  0.5
+LOG       800  3.2k  10    -100  -3
```



Kuva 8 Kaiuttimelle menevän signaalin suotimen simuloitu vaste todellisilla komponenteilla.

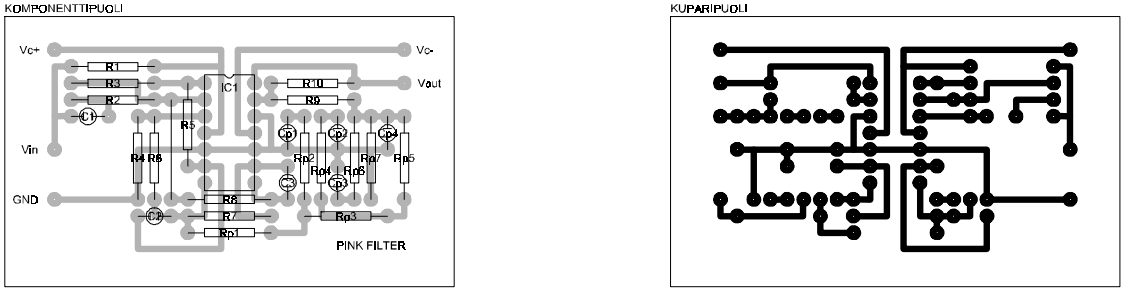


Kuva 9 Kaiuttimelle menevän signaalin simuloitu vaihevaste todellisilla komponenttiarvoilla.



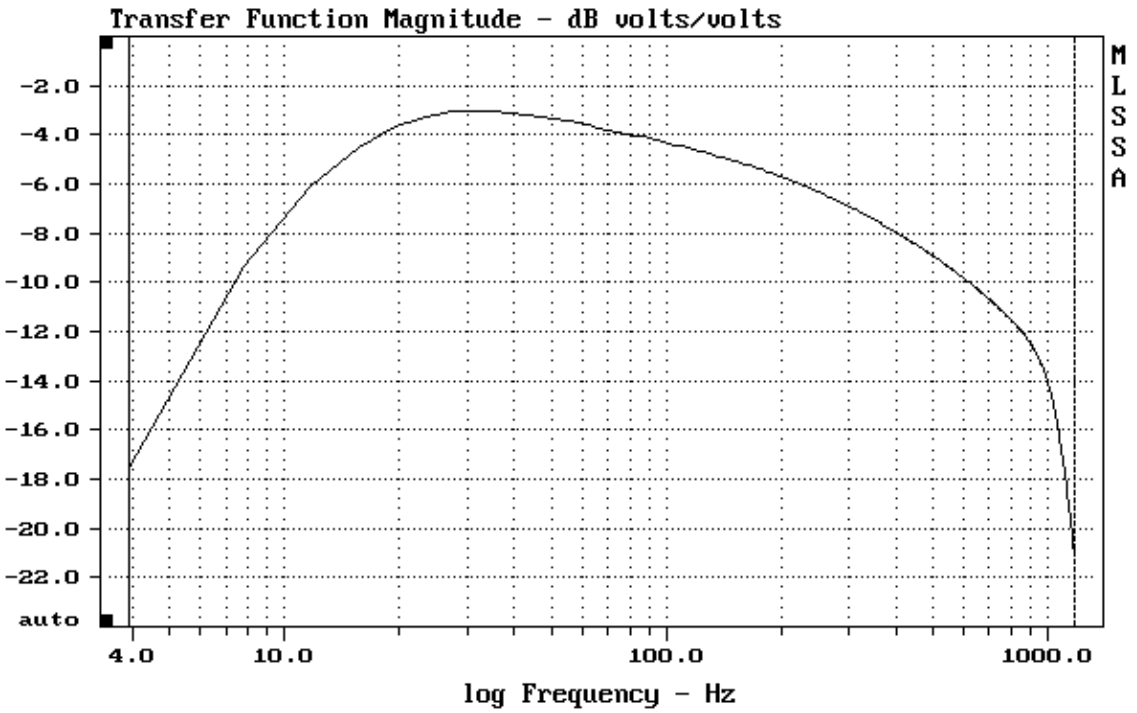
Kuva 10 Kaiuttimelle menevän signaalin suotimen piirikaavio optimoinnin tuloksena saaduilla komponenttiarvoilla.

Piirikaaviot suunniteltiin Aplaciin kuuluvan *Nasse*-ohjelman avulla. Nasse tallentaa piirin suoraan Aplacin parametrejä käyttäen. Käyttämämme *demo*versio oli tosin vielä kehitysasteella.



Kuva 11 Kaiuttimelle menevän signaalin suotimen toteuttanut painopiirilevy ja komponenttien sijoittelu.

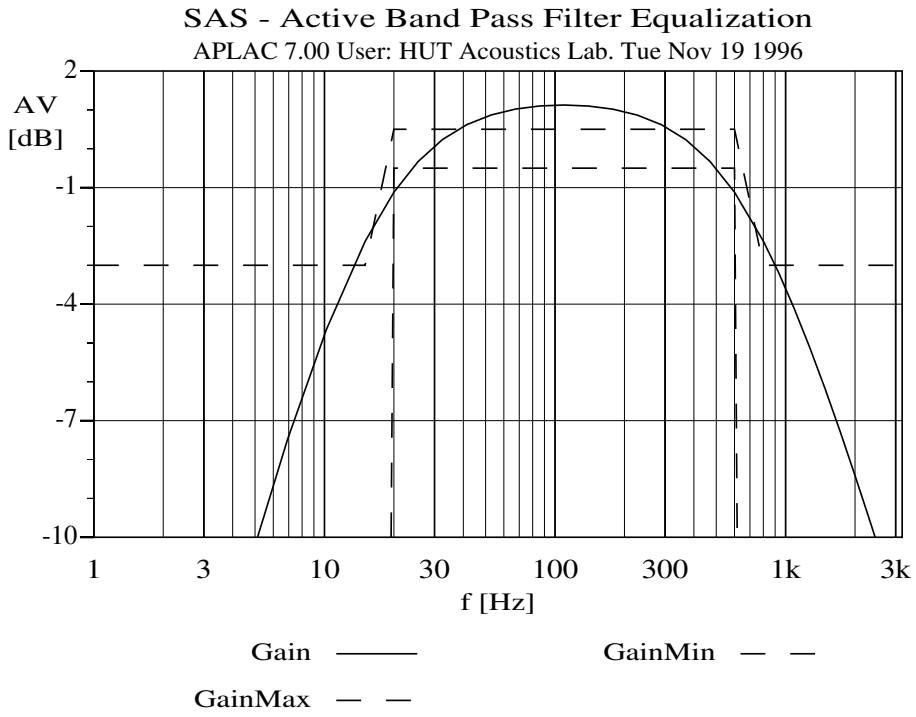
Seuraavassa kuvassa on *Melissa*-mittausjärjestelmällä mitattu taajuusvaste suunnittelemastamme kaiuttimelle menevän signaalin suodattimesta. Mitattu vaste on lähes identtinen simuloidun vasteen kanssa.



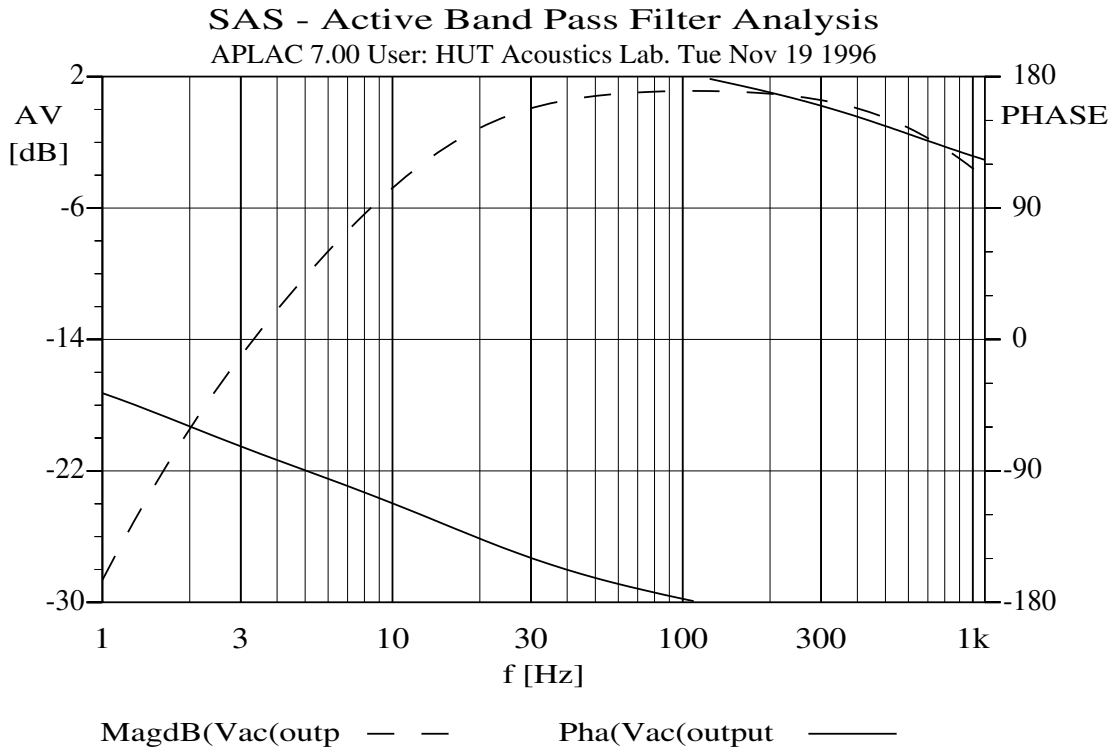
Kuva 12 Melissalla mitattu taajuusvaste herätesignaalin suodattimesta.

3.2.2.2 Mikrofonilta tulevan signaalin suodatin

Mittaussignaali haluttiin myös kaistarajoittaa optimoidun tuloksen saamiseksi. Tavoitteeksi asetettiin samat -3 dB:n rajataajuudet kuin herätesignaalin suotimelle, eli - 15 Hz ja 800 Hz.

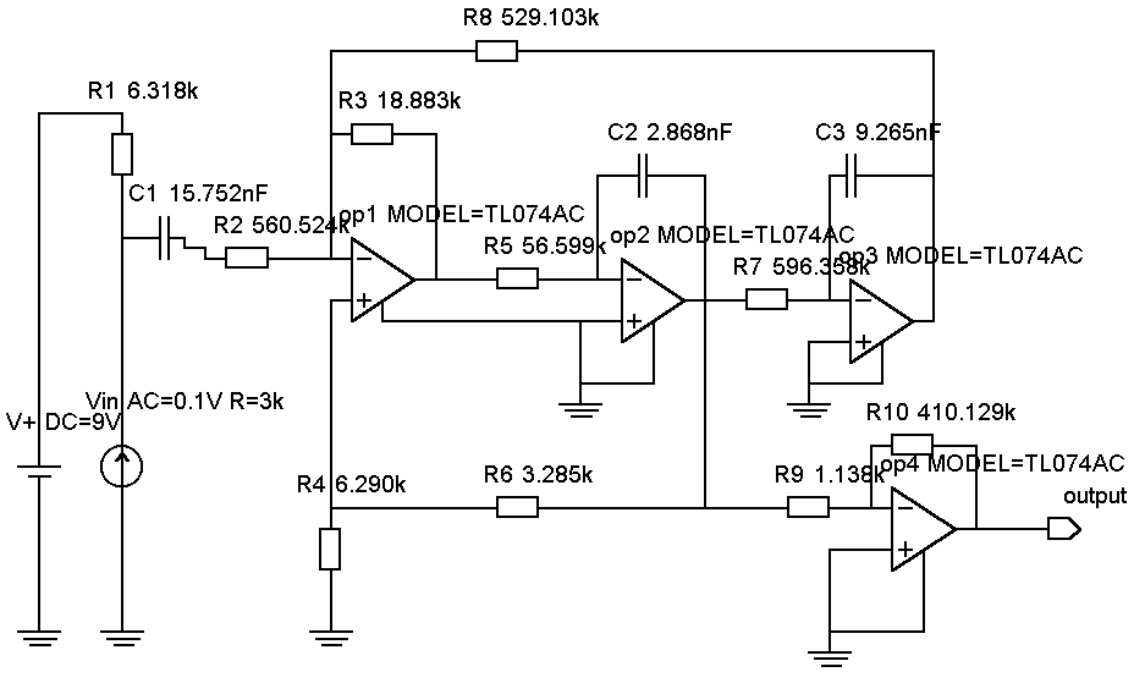


Kuva 13 Optimointiohjeet sekä optimoinnilla saavutettu vaste mikrofoniesivahvistimelle.



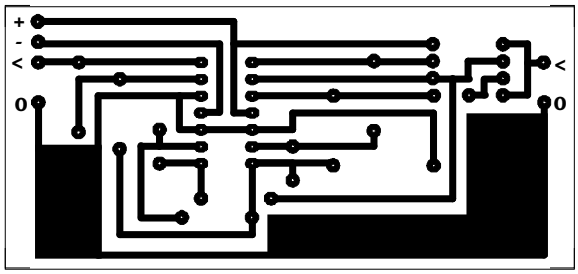
Kuva 14 Mikrofoniesivahvistimen suotimen vaihevaste simuloituna.

Optimointia käytettiin myös sovittamaan mikrofoniesivahvistimen ja mikrofonin sekä Melissa-mittauskortin sisääntulon tasot toisiinsa. Tuloksena saatiin seuraavassa kuvassa esitettävä piirikaavio.



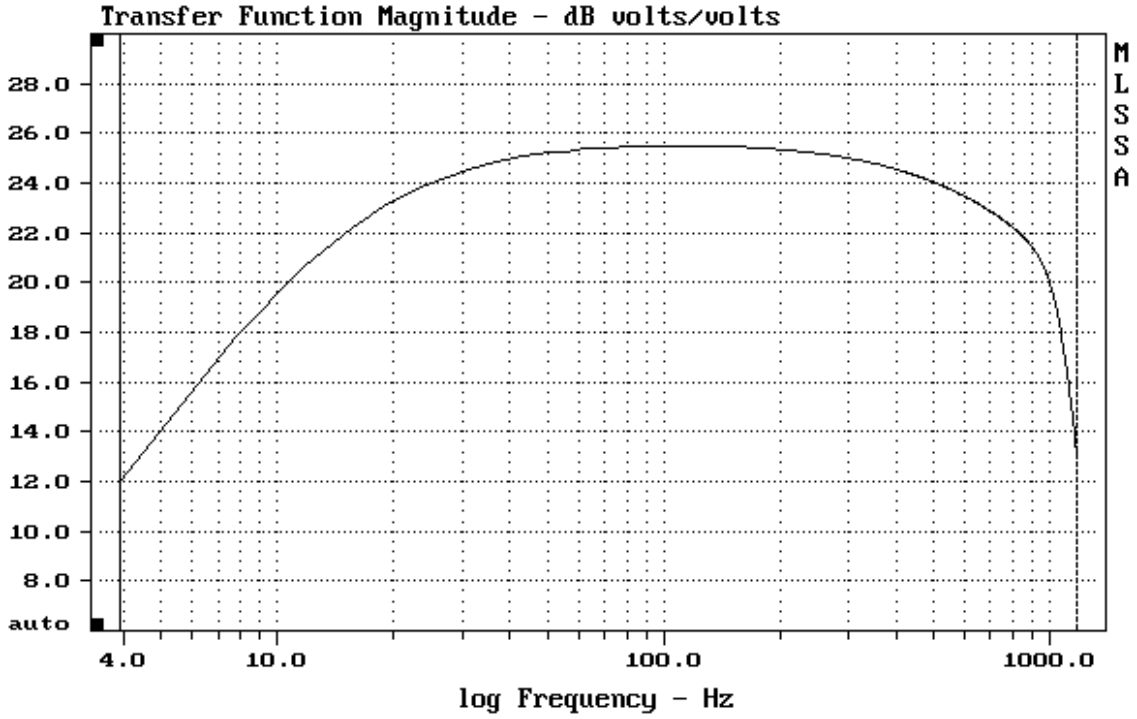
Kuva 15 Mikrofoniesivahvistimen piirikaavio optimoinnin tuloksena saaduilla komponenttiarvoilla.

Piirikaavion mukaan suunniteltiin seuraavan kuvan mukainen piirilevy.



Kuva 16 Mikrofoniesivahvistimen painopiirilevy kuparipuolelta katsottuna.

Melissalla mitattu vaste oli erittäin lähellä Aplacilla simuloitua vastetta. Pienet eroavuudet ovat selitettävissä todellisten komponenttien arvojen poikkeamisella optimoinnin antamista arvoista.



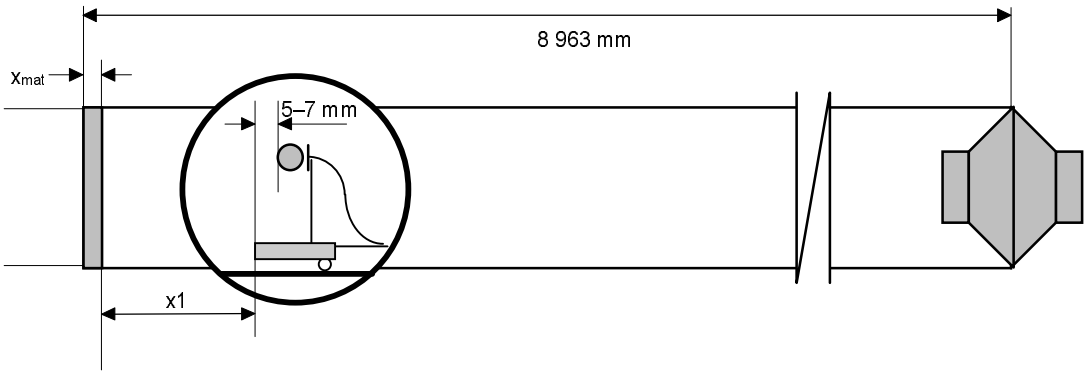
Kuva 17 Mikrofoniesivahvistimen Melissalla mitattu taajuusvaste.

3.3 Uusittu mittausjärjestelmä

3.3.1 Järjestelmän rakenne

Seuraavassa kuvataan uusittu mittausjärjestelmä ja eritellään muutokset vanhaan järjestelmään verrattuna pääpiirteittäin.

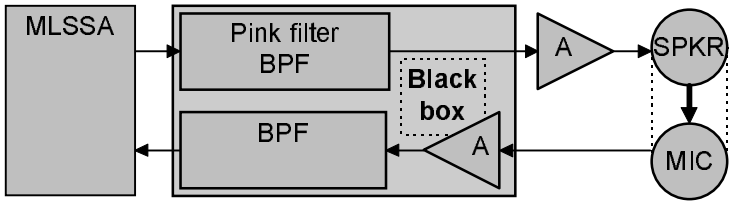
Seuraavassa kuvassa on esitetty putken mittoihin tapahtuneet muutokset.



Kuva 18. Muutokset putken mitoissa.

Mikrofonikapselin liikutteluun tarkoitetun vaunun etuosa on joitakin millimetrejä kapselia edempänä. Tämä suojaa kapselia ja sen kiinnitystä osumasta näytemateriaaliin niiden ollessa ääriasennossaan. Kyseinen väli täytyy kuitenkin muistaa huomioida mittauksissa. Ääriasennossaan mikrofonin etäisyys materiaalin pinnasta ei siis ole nolla, vaan noin 5–7 mm. Lisäksi kapseli pääsee liikkumaan kiinnityksessään edestakaisin muutamia millimetrejä, mikä vaikeuttaa mittauksia pienemmillä aallonpituuksilla.

Putken sisätilan efektiivinen pituus päätyseinästä kaiutinkartioiden keskipisteeseen on 8963 mm.



Kuva 19. Uusitun mittausjärjestelmän signaalikaavio.

Edellisessä kuvassa on uusitun mittausjärjestelmän signaalikaavio. Putken ja MLSSA-mittauslaitteiston lisäksi järjestelmään kuuluu tässä erikoistyössä suunniteltu mikrofonivahvistin-suodatinyhdistelmä eli ns. Black Box. Lisäksi järjestelmässä tarvitaan ulkoinen päätevahvistin kaiutinsignaalia varten. Mittauksissa käytettiin laboratorion Yamaha MX-70 -päätevahvistinta, koska kaiuttimiin syötetyn lähtötehon tarkkailu oli helppoa laitteen tehoilmaisimien avulla. Lisäksi Yamaha on signaalin kannalta huomattavasti laadukkaampi vahvistin kuin ensimmäisessä mittaussarjassa käytetty B&K 2706 -päätevahvistin.

Kaistanpäästösuodatin	Black Box
PINK-suodatin	Black Box
Päätevahvistin	Yamaha MX-70
Mikrofonivahvistin	Black Box
Kaistanpäästösuodatin	Black Box

Taulukko 2. Uusitun mittausjärjestelmän laitteiston erittely.

3.4 Referenssijärjestelmät

Referenssijärjestelminä käytettiin kahta erilaista VTT:llä käytössä olevaa mittausjärjestelmää. Näillä mitattiin samat näytepalat (Duratex, Plain ja EL100), kuin TKK:n uusitulla järjestelmällä.

Otaniemessä (VTT Rakennustekniikka/Akustiikka) mittaukset tehtiin tutkija Raimo Euraston opastuksella B&K 4002 -laitteistolla, jossa on liikuteltava mikrofoni. Putkella voidaan määrittää akustinen impedanssi taajuusalueella 90 - 6500 Hz. Käytimme ainoastaan 10 cm:n halkaisijaltaan olevaa putkea, joten taajuusalue rajoittui yläpäästä 1800 Hz:iin. Käytössä oli lisäksi B&K 1022 -siniaaltogeneraattori. Amplitudin poikkeamat luettiin B&K 2203 -äänitasomittarilla, jossa B&K 1613 -oktaavisuodin rajoitti ei-tutkittavan alueen pois. Herätteinä käytettiin sekä normaaleja sinisignaaleja että MLS-signaalia.

Tampereella (VTT Valmistustekniikka/Turvallisuustekniikka) tutkijat Jukka Tanttari ja Kari Saarinen suorittivat mittaukset automatisoidulla B&K 4206 -laitteistolla. PC-pohjaisen mittausjärjestelmän mittausohjelmistona on B&K:n BZ 5050. Ohjelma laskee ja näyttää graafisesti absorptio- ja heijastuskertoimet sekä normalisoidun impedanssin testinäytteestä. Samoin taajuusvastefunktio voidaan tulostaa järjestelmän kahden mikrofonin välille.Järjestelmä käyttää kohinaherätettä.

4. Mittaukset ja mittaustulokset

4.1 Alkuperäinen järjestelmä: Materiaalit ja mittaukset

Alkuperäisen järjestelmän mittauksiin käytettiin valitettavasti eri näytemateriaaleja kuin uuden järjestelmän mittauksiin. Alkuperäisellä järjestelmällä mitatut näytekappaleet ja mittauksissa käytetyt suodatinyhdistelmät on esitetty alla olevassa taulukossa.

	Tutkittava kappale	HPF	LPF	Pink	Mic LPF
1	vuorivillakiila[1]	—	—	—	—
2	30 mm akustolevy	—	—	—	—
3		15 Hz	1 kHz	—	—
4	50 mm akustolevy	—	—	—	—
5		15 Hz	1 kHz	—	—
6	70 mm akustolevy	—	—	—	—
7		15 Hz	1 kHz	—	—
8	70 mm akustolevy	50 Hz	1 kHz	—	—
9		50 Hz	700 Hz	—	—
10	70 mm akustolevy	30 Hz	1 kHz	—	—
11		30 Hz	700 Hz	—	—
12	70 mm akustolevy	15 Hz	1 kHz	-3 dB/okt.	—
13		15 Hz	1 kHz	-3 dB/okt.	22,4 Hz
14		15 Hz	1 kHz	—	22,4 Hz

1. Kiilan mitat: pohja 25 x 25 cm, pitkä sivu 98,5 cm, lyhyt sivu 15 cm

Taulukko 3. Ensimmäisen mittaussarjan mittausten erittely

MLSSA-ohjelmalla mitatut näytejonot tallennettiin .tim-tiedostomuodossa, josta ne luettiin Matlab-ohjelmaan käsittelyä varten. Matlab-rutiinit ovat selostuksen liitteissä.

4.2 Alkuperäinen järjestelmä: Mittaustulokset ja niiden arviointi

Alkuperäisen järjestelmän mittaustulokset ovat selostuksen liitteissä, koska niiden painoarvo ei osoittautunut suureksi työn kannalta. Tuloskäyrästöihin on laskettu näytemateriaalien kompleksiset heijastuskertoimet ja impedanssit.

4.2.1 Alkuperäisen järjestelmän tulosten luotettavuus

Saadut tulokset vaikuttavat verraten yhtenäisiltä, ja sietävät vertailua ainakin keskenään. Myös tulosten kokoluokka vaikuttaa yleisesti ottaen järkevältä. Virhetermien läsnäolosta kertoo kuitenkin mm. heijastuskertoimen itseisarvossa paikoitellen näkyvät piikit, jotka saavat ykköstä suurempia arvoja. Tämä ei tietenkään ole fysikaalisesti perusteltavissa, vaan aiheutuu mittauksessa tapahtuneista virheistä.

4.2.2 Alkuperäisen järjestelmän systemaattiset virheet

Kaikki järjestelmän signaalitiellä olevat laitteet aiheuttavat omalta osaltaan systemaattisia virheitä. Suurimmat epälineaarisuudet esiintyivät varmasti mikrofonissa (hiilimikrofoni!), päätevahvistimessa ja kaiuttimessa. Lisäksi käyrästöistä saattoi helposti havaita, että suodattimet aiheuttavat levottomuutta vasteeseen rajataajuutensa ympäristöön.

MLSSA-järjestelmä sisältää luonnollisesti omat virheterminsä, mutta ne ovat luonnoltaan sangen pieniä edellä mainittuihin verrattuna.

Putken käyttökelpoisen taajuusalueen rajallisuutta on käsitelty jo aiemmin tässä selostuksessa. Alle 20 Hz ja yli 690 Hz taajuuksilla menetelmän malli kaatuu, eikä tuota oikeita tuloksia. 1 kHz suodattimen vaikutus ei tullut kovin selkeästi esiin käyrästöistä, koska niiden taajuusalue pyrittiin rajaamaan putken käyttökelpoiselle alueelle.

4.2.3 Muut virhetekijät

Kaikki mitattavat kappaleet eivät olleet aivan tarkasti putken päädyn kokoisia ja muotoisia. Tiivis ja aukoton sijoittelu ovat tärkeitä mittauksen luotettavuuden takia, joten jotkut käyrästöjen epämääräisyydet johtuivat varmasti pienistä raoista levyjen kylkien ja putken seinämien välillä.

Mikrofonin tarkan sijainnin mittaaminen osoittautui myös vaikeaksi, ja laskennassa tyydyttiin 0,5 cm mittaustarkkuuteen. Tämä on eräs virhetekijä, jota voisi pienentää rakenteellisilla ominaisuuksilla (valmis mittajana) ja huolellisella mittaustyöllä.

4.3 Uusittu järjestelmä: Materiaalit ja mittaukset (25.9.1996)

Seuraavat akustiikkalevyt mitattiin sekä uusitulla järjestelmällä että molemmilla referenssijärjestelmillä. Tulokset eivät siis ole vertailukelpoisia alkuperäisen järjestelmän tuottamien tulosten kanssa, mutta kylläkin keskenään.

materiaali	**paksuus**
Villa EL100/Paroc	100 mm
Duratex	16 mm
Plain	15 mm

Taulukko 4. Näytemateriaalit TKK:n ja VTT:n mittauksissa

Näytepalojen kiinnityksen tiiviyteen kiinnitettiin TKK:n putkessa erityistä huomiota tiivistämällä näytepalojen ja putken seinämien saumat silikonimassalla mittausten ajaksi.

TKK:n putkella ja VTT:n B&K 4002 -järjestelmällä (Otaniemi) mittaukset tehtiin sekä sini- että MLS-herätteellä. VTT:n B&K 4206 -järjestelmä (Tampere) käyttää mittauksiin kohinaherätettä.

4.4 Uusittu järjestelmä: Mittaustulokset

Mittauksista lasketut absorptiosuhteet ja normalisoidut impedanssit on koottu seuraavassa kohdassa oleviin taulukoihin, joiden avulla TKK:n järjestelmällä saatuja tuloksia voi selkeästi vertailla referenssijärjestelmien tuottamiin tuloksiin.

Selostuksen liitteissä on myös mittaustuloksista lasketut kompleksisen heijastuskertoimen ja impedanssin käyrät sekä SAS-mittausten yksityiskohtaiset tulostaulukot.

4.5 Tulosten vertailu keskenään

Seuraaviin taulukoihin on koottu mittaustuloksista lasketut absorptiosuhteet ja normalisoidut impedanssit. Referenssimittausten tulokset ovat samassa taulukossa vertailun helpottamiseksi. VTT:n 4206-järjestelmän tulokset on arvioitu käyrästöiltä, koska tuloksia ei ollut saatavana numeerisesti käsiteltävässä muodossa. Selostuksen liitteissä on mittaustuloksista lasketut heijastuskertoimen ja impedanssin käyrästöt, joiden avulla tulosten yksityiskohtiin voi tarkemmin tutustua.

		VTT / sas	VTT B&K 4002 / MLS-heräte			VTT B&K	TKK / sas	TKK / MLS-heräte, etäisyys 1			TKK / MLS-heräte, etäisyys 2		
	f / Hz	α	min	max	ka	4206	α	min	max	ka	min	max	ka
EL-100	63	0,20	0,08	0,96	0,33	*0.15*	0,08	-0,04	0,05	-0,01	-0,07	0,11	-0,02
	125	0,40	-0,54	0,81	0,15	*0.32*	0,20	0,05	0,84	0,27	0,11	0,96	0,22
	250	0,77	0,51	0,92	0,61	*0.71*	0,50	0,17	0,79	0,63	0,12	0,78	0,62
	500	0,69	0,30	0,98	0,84	*0.85*	0,09	0,79	0,87	0,84	0,75	0,88	0,83
Duratex	63	0,10	0,08	0,70	0,38	*0.03*	0,01	-0,22	-0,13	-0,16	-0,44	-0,13	-0,18
	125	0,13	-0,04	0,39	0,14	*0.03*	0,02	-4,55	-0,06	-0,45	-4,59	-0,10	-0,43
	250	0,21	-0,09	0,71	0,24	*0.15*	0,05	-0,48	0,79	-0,15	-1,20	0,14	-0,24
	500	0,23	-0,03	0,63	0,26	*0.40*	0,25	0,05	0,88	0,35	-0,07	0,95	0,34
Plain	63	0,03	-0,07	0,55	0,23	*0.07*	0,03	-0,25	-0,08	-0,13	-0,19	-0,10	-0,13
	125	0,03	-0,18	0,38	0,01	*0.07*	0,03	-222,33	-0,03	-1,88	-14,61	-0,02	-0,54
	250	0,02	-0,22	0,69	0,10	*0.10*	0,04	-0,41	0,03	-0,13	-6,68	0,02	-0,26
	500	0,03	-0,61	0,35	-0,13	*0.15*	0,09	-0,16	1,00	0,02	-6,31	0,02	-0,17

Taulukko 5. Mittaustuloksista lasketut heijastussuhteet.

			VTT B&K 4002 / MLS-heräte			VTT B&K		TKK / MLS-heräte, etäisyys 1			TKK / MLS-heräte, etäisyys 2		
	f / Hz		min	max	ka	4206		min	max	ka	min	max	ka
EL-100	63		-71,87	-63,14	-66,58	*6.00*		-77,76	-68,54	-71,55	-86,59	-69,59	-73,56
	125		-69,79	-67,57	-68,54	*4.00*		-86,32	-62,88	-68,86	-84,37	-56,53	-63,67
	250		-75,63	-68,24	-73,06	*2.20*		-74,08	-57,17	-66,11	-74,98	-63,57	-68,24
	500		-76,62	-67,57	-70,46	*2.00*		-73,01	-65,45	-67,96	-73,08	-65,38	-69,03
Duratex	63		-70,00	-63,28	-65,85	*25.00*		-76,91	-68,70	-71,55	-80,19	-69,79	-73,39
	125		-67,57	-66,48	-66,88	*18.00*		-81,41	-62,60	-68,39	-79,32	-54,72	-63,05
	250		-79,61	-67,70	-71,55	*11.00*		-93,18	-56,97	-65,30	-80,11	-51,45	-63,57
	500		-82,28	-68,10	-73,01	*5.00*		-79,83	-55,62	-66,20	-88,18	-62,97	-68,24
Plain	63		-68,24	-62,80	-65,30	*22.00*		-74,37	-67,83	-70,46	-79,63	-69,03	-72,22
	125		-68,24	-66,38	-66,68	*26.00*		-81,66	-66,58	-70,71	-83,28	-56,04	-65,77
	250		-77,06	-68,24	-70,97	*23.00*		-85,51	-52,16	-64,03	-82,12	-53,13	-64,69
	500		-84,90	-67,96	-73,20	*17.00*		-85,36	-49,99	-63,77	-88,54	-51,67	-66,48

Taulukko 6. Mittaustuloksista lasketut normalisoidut impedanssit, $Z(dB)=10\log(Z/Z_0)$

Impedanssien desibeliesityksessä on käytetty arvoa $Z_0 = 20000$, joka on johdettu äänipaineen ja hiukkasnopeuksien suhteesta. VTT:n 4206-järjestelmän impedanssit on luettu kompleksisen impedanssin itseisarvokuvaajilta, mutta asteikon skaalaus poikkeaa selvästi muista, joten sen tuloksia ei voi suoraan vertailla.

Alla olevissa taulukoissa on lueteltu valmistajien akustolevyille ilmoittamia arvoja:

Plain

f / Hz	abs.kerroin
125	0,33
250	0,31
500	0,53
1000	0,68

Duratex (ilmarako takana)

f / Hz	Lmin / dB
125	0,16
250	0,11
500	0,10
1000	0,07

Taulukko 7. Valmistajien ilmoittamia arvoja

Toisistaan poikkeavat mittausjärjestelmät ja tulosten laskentatavat vaikeuttavat tulosten vertailua keskenään. Esimerkiksi B&K 4002 -laitteistolla ei yleensä tehdä mittauksia käyttäen MLS-herätettä, joten putken soveltuvuudesta tarkoitukseen ei sinänsä voitu antaa pitävää tietoa. B&K 4206 -järjestelmä puolestaan käyttää kohinaherätettä, ja laskee

oheisohjelmistoineen mittaustulokset valmiiksi käyriksi, joten jo erilainen laskentatapa, ikkunointi, taajuuspehmennys ym. saa järjestelmän tulokset erottumaan muista. Lisäksi voidaan olettaa, että kyseisen järjestelmän tarkkuus ja mittaustulosten paikkansapitävyys ovat näissä puitteissa omaa luokkaansa.

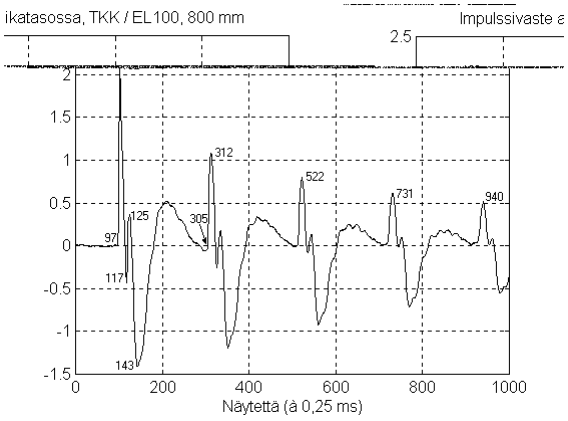
Yleisesti voidaan todeta, että ainakin TKK:n putkella ja VTT:n 4002-putkella tehtyjen mittausten tuloksissa on selvästi havaittavia virhetermejä, jotka sinällään vaikeuttavat tulosten arviointia. Parhaiten tämä käy ilmi liitteissä olevista heijastuskerrointen kuvaajista, sillä niissä näkyy paljon yli yhden olevia arvoja, jotka eivät sinänsä ole fysikaalisesti perusteltavissa.

4.6 Tulosten luotettavuus ja virhelähteet

4.6.1 Systemaattiset virheet

Alkuperäisissä mittaustuloksissa esiintyvien suurten virhemarginaalien pääasialliseksi syyksi paljastui putken kaiutinpäädystä heijastuva ääni, joka vääristää mittausten tuottamat impulssivasteet. Alla olevassa kuvassa on esitetty EL100-villan mittauksessa TKK:n ja VTT:n 4002-putkilla MLS-herätteellä saadut aikatason impulssivasteet. Kummastakin käy erittäin selvästi ilmi, ettei materiaalin impulssivaste ole todellinen, vaan sen loppuosa muodostuu putkessa edestakaisin heijastelevasta äänestä. Heijastukset vaimenevat VTT:n putkessa melko nopeasti, mutta TKK:n putkessa vielä kymmeneskin heijastus erottui selvästi käyrästä jopa kuvissa käytetyllä lineaarisella amplitudiasteikolla.

On selvää, ettei tämän kaltaisesta mittausdatasta saada oikeita tai edes järkeviä tuloksia ainakaan erikseen käsittelemättä. Päädyimme ikkunoimaan TKK:n mittausdatat aikatasossa niin, että jäljelle jäi vain suoran äänen ja materiaalista saapuvan heijastuksen pituinen näytejono, joka katkaistiin pehmennetysti ensimmäisen putken kaiutinpäästä saapuvan heijastuksen kohdalta. Todellisten mittausten kannalta tämä lähestymistapa ei tietenkään ole käyttökelpoinen, sillä 310 pisteen mittausdatasta laskettu taajuusresoluutio on erittäin paljon epätarkempi kuin alkuperäisellä 16 000 pisteen näytejonolla.



Kuva 20. Impulssivasteet aikatasossa

Mittaukset näytteistettiin 4 kHz:n taajuudella, joten yksittäisen näytteen pituus on 0,25 ms. Impulssivasteen käyriin on merkitty huippujen ja käännekohtien näytteiden numerot, joista voidaan laskea kuluneet viipeet. TKK:n putkella ei-toivottujen heijastusten väli on noin 210 näytettä (52,5 millisekuntia), joka vastaa sangen tarkasti äänen kulkemaa matkaa putken päästä päähän ja takaisin (noin 18 m). Kuvan mittaus on tehty 800 mm etäisyydellä villasta, joten materiaalin pinnasta saapuva heijastus osuu noin 4,7 ms (19 näytettä) myöhemmin.

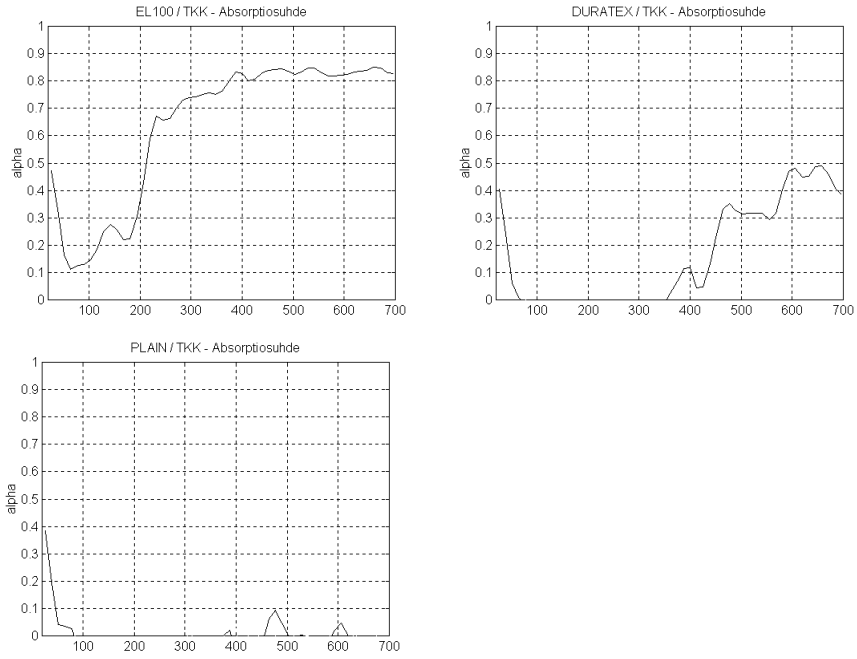
Heijastus sijoittuu siis kuvaan merkityn näytteen 117 kohdalle. Superpositiosta päätellen suoran äänen impulssi vaimenee huomattavasti nousuaan hitaammin, ja tekee oudon nousun näytteen 125 kohdalla (28 näytettä eli 7 ms impulssin nousun jälkeen). Tämän jälkeen materiaalista heijastunut impulssi näkyy paremmin, saavuttaen huippunsa näytteen 143 kohdalla.

Ensimmäinen häiriöheijastus alkaa kuvassa näytteestä 305, joten sitä seuraavat näytteet rajattiin ikkunoimalla pois. Ikkunan pituudeksi valittiin 310 pistettä, sillä häiriöheijastuksen alku vaihteli näytteiden 303–309 välillä eri mittauksissa eri paksuisten materiaalien johdosta. Ikkuna muodostettiin suorakaideikkunasta, jonka viimeiset 20 pistettä korvattiin 40 pisteen Hanning-ikkunan laskevalla puoliskolla. Täten impulssivasteen alkupää saatiin säilymään muuttumattomana, mutta samalla torjuttiin ensimmäisten häiriöheijastusten kohdaltaan vaihteleva alkuosa.

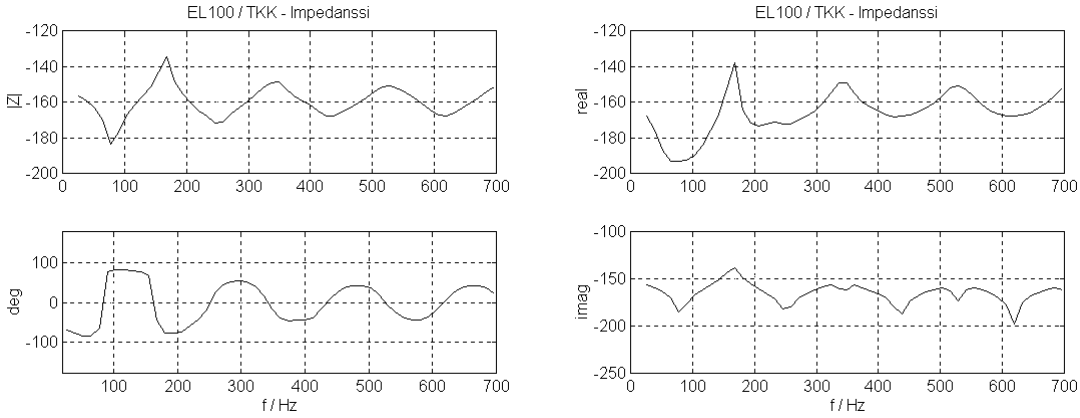
Häiriöheijastusten poistaminen on siis ensisijainen tavoite, jotta putkea voitaisiin hyödyntää todellisissa mittauksissa. Putken tämänhetkinen rakenne aikaansaa erittäin voimakkaita pitkittäisiä heijastuksia, ja tyhjänä putken sisus muistuttaakin lähinnä kaiuntahuonetta. Ratkaisuna voidaan luontevasti esittää heijastusten vaimentamista asentamalla putken kaiutinpäähän sopivia absorbentteja. Koska heijastukset vaimenevat hitaasti jopa yllä kuvatun 100 mm:n vuorivillanäytteen kanssa, on kaiutinpäätyyn löydettävä sangen tehokas vaimennusratkaisu.

Eräs vaihtoehto on asentaa kaiutinpäätyyn koko putken poikkipinnan täyttävä villatukos, jonka paksuus ja tarkka sijainti täytyy luultavasti kokeellisesti määrittää. Vaimentimen paksuus vaikuttaa tietenkin myös kaiuttimesta tulevan suoran äänen vaimennukseen, joten liian paksu vaimennin voi heikentää mittauksen signaalikohinasuhdetta tai aiheuttaa signaalin säröytymistä kaiuttimessa liian suurilla voimakkuuksilla. Vaimentimen sijainnin on oltava lähellä kaiutinelementtejä, jotta putken efektiivinen pituus ei lyhene ja sen myötä mittausten alarajataajuus ei nouse.

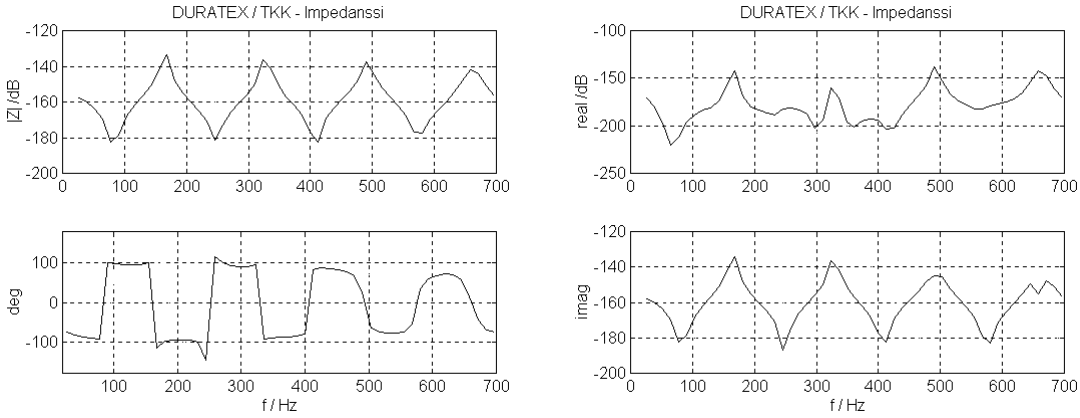
Seuraavassa on esitetty ikkunoiduista näytejonoista lasketut käyrät:



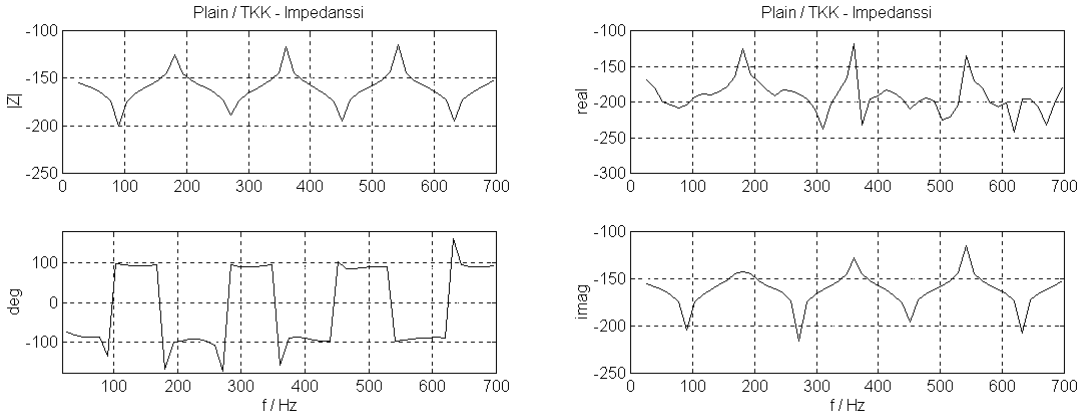
Absorptiosuhteet, TKK:n mittaukset, ikkunoitu 310 näytettä aikatasossa



***EL100**, normalisoitu impedanssi, TKK:n mittaukset, ikkunoitu 310 näytettä aikatasossa*



***Duratex**, normalisoitu impedanssi, TKK:n mittaukset, ikkunoitu 310 näytettä aikatasossa*



***Plain**, normalisoitu impedanssi, TKK:n mittaukset, ikkunoitu 310 näytettä aikatasossa*

4.6.2 Muut virhetekijät

Eräs järjestelmässä esiintyvä, hankalasti mitattava virhetermi on herätesignaalin kytkeytyminen mikrofoniin putken rakenteita pitkin. Kaiutinelementtien tukeva kiinnitys on samalla myös jäykkä, eikä elementtien kiinnityslevyä ole eristetty putkesta kovinkaan paljon. Signaali voi siis kytkeytyä mekaanisesti putken runkoon ja edetä putken seinämiä pitkin mikrofonikapselin tukirakenteisiin. Myöskään kaiutinelementtien taustaa ei ole eristetty millään tavoin, joten akustinen takaisinkytkeytyminenkin on teoriassa mahdollista.

Eräs mittauksia vaikeuttava virhetermi on signaalin säröytyminen, mikäli kaiutinelementtejä ohjataan liian suurella tasolla. Jouduimme uusimaan yhden mittaussarjan, koska putkeen syötetty signaali oli säröytynyt ja tulokset olivat erittäin hajanaisia.

Mikrofonin ja mikrofonivahvistimen dynamiikka asettavat omat rajansa järjestelmän suorituskyvylle. Liian voimakkaalla signaalilla myös mikrofonivahvistin voidaan saada aiheuttamaan säröä.

Putken vaimennuskertoimen mittaukseen ei ryhdytty, vaikka se kuvattiinkin ISO-standardin vedoksessa. Toisaalta vaimennuksen aiheuttama virhe voidaan ainakin toistaiseksi katsoa melko mitättömäksi järjestelmän muiden virhetermien rinnalla.

4.7 Taajuuspehmennyksen käyttö laskennassa

Koska MLSSA-ohjelmalla mitatut näytejonot ovat pitkiä, PSD- ja CSD-funktioiden laskeminen kestää nopeallakin koneella melko kauan. Tulosten käyriä voisi mahdollisesti vielä tasoittaa onnistuneemmalla Hanning-ikkunan pituuden valinnalla. VTT:n 4206-järjestelmän tuottamiin tuloksiin verrattuna Matlab-laskennan tuottamat tulokset sisältävät paljon häiriöitä, jotka olisi vielä mahdollista peittää. Jossakin tulee kuitenkin vastaan raja, jossa keskiarvoistus alkaa peittää yksityiskohtia. Toisaalta vertailu referenssimateriaaliin voisi puolustaa voimakkaamman keskiarvoistuksen käyttöä.

4.7.1 Mittausmenetelmän parannusehdotuksia

Tärkein mittausjärjestelmään tarvittava parannus on putken kaiutinpäädyn vaimentaminen niin tehokkaasti, ettei putkessa synny merkittäviä jälkiheijastuksia. Tämä parantaisi mittaustuloksia todella merkittävästi.

Muita parannusehdotuksia ovat ISO-standardiehdotuksessa mainitut kaiutinelementtien mekaaninen ja akustinen eristäminen, mitattavan kappaleen kiinnityksen järkeistäminen ja mikrofonin etäisyyden mittaustarkkuuden parantaminen. Kukin näistä parannuksista vaatisi kuitenkin huomattavia muutoksia putken nykyiseen rakenteeseen.

4.8 Lopuksi

Erikoistyön alkuperäiseksi tavoitteeksi annettiin parannetun mittausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus. Tämä osoittautui kuitenkin laajuudeltaan niin mittavaksi, ettei merkittävää osaa ISO-standardiehdotuksessa mainituista koemittauksista ja parannuksista voitu toteuttaa. Järjestelmää ei siis saatu kovin tyydyttävään toimintakuntoon erikoistyön puitteissa. Toisaalta työn myötä kertyi runsaasti havaintoja järjestelmän puutteista ja mahdollisista parannuksista. Lisäksi käytännönläheinen tehtävänasettelu toi mukanaan myös käytännön kokemusta mittauksista ja niiden ongelmista. Kaiken kaikkiaan työ oli tekijöilleen sangen mielenkiintoinen, joskin aivan liian laaja kyseisen kurssin suoritukseen nähden.

5. Lähteet

1. IEC-standardi 268-5. *Sound system equipment, Part 5: Loudspeakers*, CEI 1989. 69 s.
2. ISO/DIS 10534 -standardiehdotus. *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance or admittance by the impedance tube method*, ISO 1994. 27 s.
3. ISO/DIS 10534 -standardiehdotuksen laajempi vedos. *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance or admittance by the impedance tube method*, ISO 1994. 33 s.
4. Lahti T., *Akustinen mittaustekniikka*. Raportti 38, joulukuu 1995. TKK 1995. 152 s.
5. Lahti T., *Analysis methods for acoustical systems based on the FFT and intensity techniques*. VTT publications 67, VTT 1990. 288 s.
6. Kivelä S., *Matlab-opas*. 4. painos, Otatieto 1991. 60 s.
7. Toivanen J., *Teknillinen akustiikka*. 4. painos, Otatieto 1976. 518 s.
8. *Aplac 7.0 Manuals*. TKK OFFSET 1996.

6. Liitteet

1. Mittaustulokset ja niiden tarkastelu
   - *Alkuperäisellä järjestelmällä saadut tulokset*
   - *Uusitulla järjestelmällä saadut tulokset*
   - *Referenssijärjestelmillä saadut tulokset*
2. Tulosten laskentaan käytetyt Matlab-makrot
   - *ekaputki.m — ensimmäisten mittaustulosten laskenta*
   - *sasputki.m — uusitun järjestelmän ja referenssitulosten laskenta*
   - *timread.m — MLSSA:n .tim-tiedostojen luku Matlabiin*
   - *ikkputki.m — ikkunoitujen tulosten laskenta*
   - *absimp.m, minmaxka.m — absorptiosuhteiden ja impedanssien laskenta oktaavikaistoittain*
3. MLSSA-mittausjärjestelmän asetukset (.SET-tiedosto)
4. Kaiutinelementtien ripustukseen käytetty tukilevy ja niiden kiinnitys
5. Äänilähteen parannusten määrittäminen
6. Kaiutinelementtien THD-mittaustulokset
7. Aplac-tiedostot

   Herätesignaalin suunnitteluohje

   Mikrofoniesivahvistimen suunnitteluohje
8. B&K 4002- ja 4206-järjestelmien kuvaukset
9. Mikrofonikapselin valmistajan ilmoittamat tiedot