

Denis Siponen

Laajakaista-absorbentti

VTT, Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikka
Ilmatekniikka ja Akustiikka

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 8.6.2005

Työn valvoja:
Työn ohjaaja:

Professori Matti Karjalainen.
Tekniikan tohtori, erikoistutkija Seppo Uosukainen

Tekijä:	Denis Siponen
Työn nimi:	Laajakaista-absorbentti
Päivämäärä:	8.6.2005
Sivumäärä:	57+15
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri:	S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka
Työn valvoja:	Professori Matti Karjalainen
Työn ohjaaja:	Tekniikan tohtori Seppo Uosukainen
<p>Absorbenteilla sekä resonaattoreilla on mahdollista vaimentaa ääntä laajakaistaisesti ja selektiivisillä taajuuskaistoilla.</p> <p>Tämä diplomityö käsittelee absorbenttien ja reikäresonaattorien optimaalista sovitusta Matlab-optimointiohjelman avulla. Työssä suunnitellaan kaksi 100 mm paksuista absorbenttia, joista toinen toimii n. 150 Hz – 20 000 Hz:n taajuusalueella ja toinen n. 100 Hz – 400 Hz:n taajuusalueella. Lisäksi työssä tehdään Matlab-ohjelma, joka optimoi absorbenttien ja reikäresonaattoreiden parametrit mahdollisimman hyvän absorptiosuhteen saavuttamiseksi. Tällä ohjelmalla myös suunnitellaan molemmat absorbentit.</p> <p>Suunnitellut laajakaista-absorbentit valmistetaan VTT:llä ja niiden akustiset arvot mitataan TKK:n impedanssiputkella kaksikanavamenetelmällä. Mittaustuloksia verrataan teoreettisiin tuloksiin, ja pohditaan, miten laskentaohjelmia voi parantaa edelleen. Työssä todetaan, että mittaustulokset korreloivat teoreettisiin tuloksiin ja laajakaistainen absorptio on mahdollista saavuttaa 100 mm rakennepaksuuksilla. Kehitetyn optimointiohjelman avulla on mahdollista suunnitella absorbenttirakenteita, jotka ovat tavanomaisia samanpaksuisia absorbenttirakenteita tehokkaampia.</p>	
Avainsanat:	absorbentti, reikäresonaattori, ominaisvirtausvastus, absorptiosuhde, impedanssiputki, akustisten ominaisuuksien optimointi

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS

Author:	Denis Siponen
Name of the Thesis:	Laajakaista-absorbentti
Date:	8.6.2005
Number of pages:	57+15
Faculty:	Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S-89 Acoustics and Audio Signal Processing
Supervisor:	Prof. Matti Karjalainen
Instructor:	T. Doc. Seppo Uosukainen
<p>With absorbent and resonators it is possible to damp sound in selective frequency bands.</p> <p>This thesis concerns optimal adaptation of absorbers and resonators with help of Matlab-programs. In this work two 100 mm thick absorbents are developed. Their effective frequency bands are 150 Hz – 20 000 Hz and 100 Hz – 400 Hz. Also Matlab-program is created, which optimizes parameters of absorbents and resonators giving most optimal parameters to gain best absorption coefficients. With this program both absorbents are created.</p> <p>Created wideband absorbers are produced in VTT and their acoustical parameters are measured with impedance tube in TKK. Measured parameters are then compared with estimated theoretical results and their correlation is checked. In this thesis it is stated that measurements correlate well along with theoretical results and that wideband absorption is possible to achieve with 100 mm thick elements. With developed optimization program it is possible to create absorber elements, which are more efficient than ordinary absorbers of the same thickness.</p>	
Keywords:	absorbent, perforated resonator, flow resistance, absorption coefficient, impedance tube, optimization of acoustic parameters

ALKULAUSE

Tämä on opinnäytetyö, joka valmistui Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa 8.6.2005. Se dokumentoi Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusyksikössä, Ilmatekniikan ja akustiikan tutkimusryhmässä tehtyä mittaus- ja kehitystyötä. Allekirjoittaneen diplomityö on tehty ”Akustokuitukomposiitti”-projektin puitteissa, ja se on ollut käynnissä vuoden ennen diplomityön aloittamista.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajana toiminutta erikoistutkija Seppo Uosukaista sekä ryhmäpäällikkö Ari Saarista, jotka muiden työtehtävien lomassa antoivat rakentavia neuvoja diplomityöni tutkimus- ja kirjoitustyön aikana. Lisäksi kiitän erikoistutkija Leena Suomi-Lindbergiä sekä teknikko Pentti Ekiä näytteiden valmistuksesta sekä absorbenttien materiaaliakohtaisista neuvoista.

TKK:n impedanssiputken lainaamisesta mittaukseen kiitän assistentti Martti Rahkilaa, ja mittausjärjestelystä sekä impedanssiputken käytön neuvomisesta kiitos tutkija Poju Antsalolle. Lisäksi kiitokset koko VTT:n Ilmatekniikka ja akustiikkaryhmälle miellyttävän ilmapiirin luomisesta.

Lopuksi haluan kiittää vaimoani Hanna-Maija Siposta ja lapsiani Joonatania sekä Jeremiasta kaikesta siitä tuesta, jonka olen heiltä saanut.

Espoossa 8.6.2005

Denis Siponen

SISÄLLYSLUETTELO

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	ii
ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	iii
ALKULAUSE	iv
SISÄLLYSLUETTELO	v
LISTA KÄYTETYISTÄ SYMBOLEISTA	vii
LYHENTEET	viii
1 JOHDANTO	1
2 ABSORBENTIT	3
2.1. JOHDANTO	3
2.2. ERÄIDEN ABSORPTIOMATERIAALIEN OMINAISUUKSIA	4
2.2.1. Villat	5
2.2.2. Luonnonkuidut.....	5
2.2.3. Muut materiaalit.....	6
2.3. POHDINTA	7
3 RESONAATTORIT	8
3.1. JOHDANTO	8
3.2. RESONAATTORITYYPIT	9
3.2.1. Helmholtz-resonaattori	9
3.2.2. Reikäresonaattori	11
3.2.3. Levyresonaattori.....	15
3.3. POHDINTA	17
4 MITTAUSMETODIIKKA	19
4.1. JOHDANTO	19
4.2. JÄRJESTELMÄN IMPULSSIVASTE	19
4.3. TAAJUUSVASTEFUNKTIO.....	21
4.4. MITTAUKSET IMPEDANSSIPUTKELLA	22
4.4.1. Heijastussuhde ikkunointimenetelmällä	24
4.4.2. Heijastussuhde taajuusvastemenetelmällä	25
4.4.3. Absorptiokerroin, ominaisimpedanssi sekä vaihe taajuusvastemenetelmällä.	26
4.5. HERÄTESIGNAALI	27
4.5.1. Impulssi.....	27

4.5.2.	Schroeder-sekvenssi.....	27
4.5.3.	MLS-heräte	29
4.5.4.	Logaritminen taajuuspyyhkäisy	30
4.6.	QUICKSIG	30
5	MATLAB-OHJELMAT	31
5.1.	JOHDANTO	31
5.2.	IMPEDANSSIPUTKIMITTAUSTEN ANALYSOINTIOHJELMA	31
5.3.	REIKÄRESONAATTORIN OPTIMOINTI.....	32
5.4.	ABSORBENTTIEN OPTIMOINTI	34
5.5.	POHDINNAT	35
6	MATERIAALIMITTAUKSET IMPEDANSSIPUTKELLA	38
6.1.	JOHDANTO	38
6.2.	TEKNILLISEN KORKEAKOULUN IMPEDANSSIPUTKI.....	38
6.3.	MITTAUSJÄRJESTELMÄN KUVAUS JA MITTALAITTEIDEN ASETUKSET.....	39
6.4.	ABSORBENTTIMATERIAALIEN JA RESONAATTORIEN PUTKIMITTAUKSET	40
6.4.1.	Lasikuituvilla.....	40
6.4.2.	Puukuitu ja pellava	42
6.4.3.	Reikäresonaattori	43
6.4.4.	Absorbentin ja reikäresonaattorin yhdistelmät.....	44
6.5.	KOMMENTTEJA TEHDYISTÄ MITTAUKSISTA	47
7	MATLAB-SIMULOINNIN JA MITTAUSTEN VASTAAVUUS	50
7.1.	JOHDANTO	50
7.2.	REIKÄRESONAATTORIRAKENNE, JOSSA EI OLE ABSORBENTTIA ILMAVÄLISSÄ	50
7.3.	REIKÄRESONAATTORIRAKENNE, JOSSA ON ABSORBENTTIA ILMAVÄLISSÄ	51
7.4.	LAAJA- JA PUHEKAISTA-ABSORBENTIT	52
7.5.	POHDINNAT	53
8	YHTEENVETO	55
9	LÄHTEET	57
A	MATLAB-OHJELMA: ABSORPTIOSUHDE	60
B	MATLAB-OHJELMA - KESKIARVOISTUSFUNKTIO	64
C	MATLAB-OHJELMA: REIKÄRESONAATTORIOPTIMOINTI	65
D	MATLAB-OHJELMA: ABSORBENTTIOPTIMOINTI	68
E	MATLAB-OHJELMA: VARIATIONS	71

LISTA KÄYTETYISTÄ SYMBOLEISTA

a, a_0	[m]	Helmholtz- tai reikäresonaattorin reiän halkaisija
A	[m ²]	reikäresonaattorin etulevyn pinta-ala
c_0, c	[m/s]	äänen nopeus ilmassa 20 °C lämpötilassa vakioilmanpaineella
d	[m]	mikrofonien 1 ja 2 välinen etäisyys
$d(f)$		viivefunktio
D	[m]	resonaattorin ilmapälin syvyys
E_i	[W]	rakenteeseen kohdistuva ääniteho
E_r	[W]	rakenteesta heijastuva ääniteho
f	[Hz]	taajuus
f_r, f_0	[Hz]	resonanssitaajuus
f_{3dB}	[Hz]	taajuus, jolloin amplitudi on 3 dB pienempi kuin resonanssitaajuus
$F-1$		käänteisfourier-muunnos
F		fourier-muunnos
S	[m ²]	pinta-ala
S_a	[m ²]	Helmholtz- tai reikäresonaattorin reiän pinta-ala
h		huokoisuuskerroin
$h(t)$		yksikköimpulssivastefunktio
$H(f), H_R(f), H_I(f)$		taajuusvastefunktio, reaali- ja imaginääriosat
$H_{12}(f)$		taajuusvastefunktio mikrofonien 1 ja 2 välillä
J_0, J_1		nollannen ja ensimmäisen kertaluvun bessel-funktiot
k		reikäresonaattorin reikien lukumäärä, aaltoluku
l	[m]	Helmholtz- tai reikäresonaattorin levyn paksuus
L	[H]	sähköisen piirin induktanssi
m	[s]	normeerattu sähköisen piirin massatermi
m_s	[kg/m ²]	levyresonaattorin neliömassa
M	[kg/m ²]	sähköisen piirin massatermi
p	[Pa]	paine, reikäresonaattorin perforaatioaste
P_t	[W]	sähköisen piirin häviöteho
Q		hyvyysluku
r	[Ω]	normeerattu sähköisen piirin resistanssi, reikäresonaattorin reiän säde
R	[Ω]	sähköisen piirin resistanssi
$R(f)$		kompleksinen heijastuskerroin
t	[s]	aika
v	[m/s]	absorbenttiin kohdistuvan ilmapälin nopeus
V	[m ³]	tilavuus
x	[m]	absorbentin paksuus, etäisyys
$x(t)$		signaali
$z(f, x)$		normeerattu impedanssifunktio

Z_d	[Pas/m]	kuormitusimpedanssi
Z_0	[Pas/m]	ilman karakteristinen impedanssi
$Z(f,x)$		impedanssifunktio
α		absorptiosuhde
α_{max}		absorptiosuhteen maksimi
Δf	[Hz]	taajuusresoluutio
η	[Pas]	viskositeettikerroin
ρ	[Kg/m ³]	ilman tiheys
$\rho(f,x)$		absorptiokerroinfunktio
ρ_A	[kg/m ³]	absorbenttilevyn tiheys
ρ_M	[kg/m ³]	absorbentin kuitujen tiheys
σ	[Ns/m ⁴]	ominaisvirtausvastus
φ	[rad]	kulma
$\varphi(f,x)$		kulmataajuusfunktio
ω_t	[rad/s]	sähköisen piirin kulmataajuus
ω_0	[rad/s]	resonanssikulmataajuus

LYHENTEET

AD	Analog to Digital
ALFA	Alternative Non-Fibrous Absorbers
CLOS	Common Lisp Object System
DA	Digital to Analog
EPC	Enhanced Porosity Concrete
FFT	Fast Fourier Transform
MLS	Maximum Length Sequence
NAC	Noise Absorption Coefficient
TEKES	Teknologian kehittämiskeskus
TKK	Teknillinen korkeakoulu
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

JOHDANTO

Melu on yksi suurimmista ongelmista nykypäivänä lähes kaikissa maailman maissa. Tutkimusten ja mielipidemittausten mukaan melu koetaan suureksi haitaksi jokapäiväisessä elämässä. Se heikentää keskittymiskykyä, aiheuttaa stressiä, unettomuutta sekä sitä kautta bruttokansantuotteen heikkenemistä. Melunhallinnasta on tullut tärkeä suunnittelun osa-alue liikennevälineissä, teollisuudessa, toimisto- ja asuinrakennuksissa [1].

Vuoden 2004 alussa VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa käynnistyi 3-vuotinen TEKES-hanke ”Akustokuitukomposiitti”, jossa tutkitaan ja kehitetään puukuitumateriaaleja laajakaistaisesti ääntä vaimentaviin akustisiin sovelluksiin. Samalla pyritään huomioimaan materiaalien mekaanista kestävyyttä, palokestävyyttä sekä puhdistettavuutta. Hanke on kaksivaiheinen: Ensimmäisessä vaiheessa tarkennetaan visiota elementin rakenteesta sekä suunnitellaan geneerinen laajakaista-absorbenttielementti. Samalla optimoidaan elementin eri kerroksien paksuudet sekä akustiset ominaisuudet. Toisessa vaiheessa geneerisellä elementillä saavutettua laajakaistaisuutta sovelletaan eri sovelluskohteisiin. Tämä diplomityö sijoittuu hankkeen ensimmäiseen vaiheeseen. Se käsittelee elementin ja sen osien akustisten ominaisuuksien kartoitusta, kehittämistä, optimointia sekä teorian todentamista mittaustuloksien.

Allekirjoittaneen aloittaessa opinnäytetyötä oli hankkeessa päätetty elementin rakenneosat. Koska elementistä halutaan mahdollisimman ohut ja absorptio laajakaistaiseksi, tulee sen perustua akustisiin ilmiöihin kuten resonanssiin sekä viskoottiseen vaimennukseen. Viskoottisia vaimennuksia saadaan aikaa huokoisilla materiaaleilla ja resonanssi erilaisilla resonaattoreilla.

Absorbenttejä käsitellään luvussa 2. Siinä käydään läpi yleisimmät absorptiomateriaalit sekä niiden akustiset ominaisuudet. Samalla pohditaan myös eri materiaalien soveltuvuutta hankkeeseen.

Luvussa 3 esitellään tyypillisimmät resonaattorityypit. Kuten luvussa 2, tässäkin vertaillaan eri ratkaisujen akustisia ominaisuuksia sekä materiaalitekniisiin ja dimensioihin liittyviä vaatimuksia.

Elementin rakenteiden ja materiaalien absorptiokäyttäytymistä kuvaava Matlab-ohjelma on kehitetty VTT:llä [2]. Tämän ohjelmaan nojautuen allekirjoittanut teki mitoitusohjelman, jolla optimoidaan elementin akustisia ominaisuuksia. Ohjelmia ja niiden tuloksia käsitellään luvussa 5 ja niiden lähdekoodi on liitteessä 1.

Teoria sekä Matlab-laskentatulokset on todennettu suorittamalla mittauksia impedanssiputkella. Luku 4 käsittelee mittaustuloksia, ja itse mittaukset

sekä niiden tulokset on esitetty luvussa 6. Koska koko laajakaista-absoorbenttielementin suunnittelu perustuu Matlab-simulointeihin, on niiden vastaavuudesta mittaustuloksiin keskusteltu perusteellisesti luvussa 7.

Diplomityö kulminoituu suunniteltavan elementin akustisten ominaisuuksien optimoimiseen. Tätä pohditaan luvussa 8, ja samalla punnitaan koko projektissa saavutettuja tuloksia.

ABSORBENTIT

2.1. Johdanto

Absorbenteilla tarkoitetaan huokoisia materiaaleja, joita käytetään vaimentamaan ääntä. Akustisten ominaisuuksien takia niitä käytetään lähinnä keski-, ja suurten taajuuksien vaimentamiseen. Tässä kappaleessa on käsitelty absorbenttien teoriaa, niiden eri materiaalivaihtoehtoja sekä niiden sovelluskohteita.

Absorbentissa osa siihen kohdistuvasta tai siinä etenevästä äänienergiasta absorboituu energiahäviöihin. Tällöin heijastuneen ääniaallon energia on pienempi kuin rakenteeseen kohdistuvan ja sen läpäisevän ääniaaltojen energioiden erotus. Vaimennuksen voimakkuus eli absorptiosuhde α määritellään pintaan kohdistuneen äänitehon E_i ja heijastuneen äänitehon E_r erotuksen suhteena kohdistuvaan äänitehoon, joten absorptiosuhteeseen vaikuttavat sekä energiahäviöt että rakenteen äänen läpäisy (2.1).

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i} \quad (2.1)$$

Mikään pinta ei kuitenkaan heijasta saapuvaa aaltoa täysin, vaan aina syntyy energiahäviöitä ja osa äänienergiasta läpäisee rakenteen.

Absorbentissa ääniaalto vaimenee ensisijaisesti kahdesta syystä. Suurilla taajuuksilla vaimennus johtuu pääosin väliaineen molekyylien pitkittäisen liikkeen kitkasta vaimennusmateriaalissa. Virtauksen suunnanmuutokset, laajentuminen sekä supistuminen epäsäännöllisten huokosten läpi aiheuttavat häviöitä aallon etenemisessä. Pienillä taajuuksilla lämpöhäviöt ovat merkittävä tekijä ääniaallon vaimentumiseen. Tässä ilmiössä ilma kuiduissa laajenee ja supistuu jaksollisesti muuttaen lämpötilaa. Koska pienten taajuuksien puolikas jakso on suhteellisen pitkä, kuitujen pintojen suhde tilavuuteen on suuri ja kuitujen lämmönjohtavuus on suuri sekä paineenmuutos isoterminen [3].

Akustinen resistanssi on verrannollinen materiaalin huokoisuuteen. Toinen tärkeä parametri absorption kannalta on ominaisvirtausvastus σ , jolla kuvataan materiaalin läpi liikkuvan ilman vastusta tietyllä paine-erolla. Ominaisvirtausvastus (2.3) saadaan Navier-Stokesin yhtälöstä (2.2) tekemällä oletuksia, jotka ovat esitetty viitteessä [4].

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \eta \Delta \bar{v} = -\nabla \bar{p} \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{1}{v} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{tS}{V} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.3)$$

Kaavassa (2.3) ∂p on staattisen paineen muutos homogeenisessä aineessa, ∂x on aineen paksuus, v on materiaaliin kohdistuvan ilmapinnan nopeus, V on materiaalin läpi menevän ilmapinnan tilavuus ajassa t ja S kuvaa pinta-alaa, johon ilmapirtaus kohdistuu. ρ puolestaan on ilman tiheys, η viskositeettikerroin ja p paine.

Akustisesti huokoisilla materiaaleilla käsitetään yleensä erilaisia mattoja, levyjä, vaahtomaisia lasi-, villa- sekä orgaanisia kuituja. Yhteisenä piirteenä näille materiaaleille on alle yhden millimetrin mikroreiät, joiden halkaisija on äänen aallonpituutta paljon pienempi. Huokoiset, puupohjaiset materiaalit voivat olla terveydelle haitallisia ja niihin voi muodostua bakteerikantoja [5,6]. Tämän takia vaimentimia on kehitetty vaimentimia esim. kierrätyslasista. Fraunhofer-instituutti Saksassa on kehittänyt tällaisia ratkaisuja pitkään ja tuonut markkinoille mm. Alfa-tuotteet [7,8].

Absorbenttien pinta on tavallisesti tasainen, mutta myös muun muotoisia absorbentteja on tutkittu ja niitä on myös kaupallisesti saatavilla [9]. Tyypillisimpiä pinnanmuotoja ovat tasaisen pinnan lisäksi puolipallo, kiila sekä porrasmuoto. Laskennallisesti on todettu, että esim. kiilamainen pinnanmuoto parantaa äänen absorptiota sekä äänen läpäisyvaimennusta 1500 Hz suuremmilla taajuuksilla.

Yleisesti ottaen tasainen pinta on pienillä paksuuksilla optimaalinen absorbentin muoto laajakaistaiseen vaimennukseen, mutta suurilla paksuuksilla kiilamainen pinnanmuoto on tehokkaampi. Tämä johtuu siitä, että ääniaallon edetessä absorbentissa tapahtuu heijastuksia, jolloin tasaisessa pinnassa ne heijastuvat takaisin tulosuuntaan. Kiilamaisella pinnalla näin ei tapahdu, vaan heijastunut ääniaalto heijastuu kiilan pinnan normaaliin nähden pois päin muihin kiiloihin, jolloin se vaimenee entisestään. Pinnanmuodon lisäksi myös absorbentin epähomogeenisuus voi vaikuttaa absorptiosuhteen eli NAC-arvoon (Noise absorption coefficient). Teoreettisissa tutkimuksissa on todettu, että NAC-arvo on suurimmillaan kuitukankailla, kun kankaan keskiosan huokoisuus on pieni ja etu- ja takaosa huokoisuus suuri. Polyesterillä tilanne on päinvastoin; keskiosan tulisi olla huokoisuudeltaan suuri [10]. Käytännössä tällaisia rakenteita on kuitenkin vaikea valmistaa.

2.2. Eräiden absorptiomateriaalien ominaisuuksia

Kuitu- ja solupohjaisien materiaalien äänen absorptiokykyyn vaikuttaa pääasiassa kolme tekijää: ominaisvirtausvastus, huokoisuus, sekä huokoisuuden muodot [11]. Nämä kolme tekijää riippuvat toisistaan ja esimerkiksi pienellä huokoisuudella ja monimutkaisella huokosten muodoilla saavutetaan suuri ominaisvirtausvastus.

2.2.1. Villat

Villamateriaaleja käytetään laajalti lämmöneristeenä rakennustekniikassa. Niillä on kuitenkin myös erinomaiset äänitekniset ominaisuudet ja siksi niitä käytetään tilojen akustoinnissa.

Yleisimmät markkinoilla olevat villatyypit ovat lasivilla sekä kivivilla. Ne valmistetaan sulattamalla ja puristamalla raaka-ainetta pienten reikien läpi. Tämän jälkeen kuidut katkaistaan halutun paksuiksi ja pituisiksi kuiduiksi. Massa kyllästetään sidosaineella ja kuunnetaan, jolloin sidosaine sitoutuu kuituihin. Haluttu kuitujen orientaatio on yleensä yhdensuuntainen pinnan kanssa kulmahajonnan ollessa satunnainen. Kuitujen halkaisija on usein luokkaa 1-10 µm hajonnan ollessa 2-5 µm. Kivivillassa kuituja ei ole lainkaan, vaan se koostuu mikrokokoisista pisaroista, joiden läpimitta on yli 100 µm [3].

Kivi- ja lasikuituvilla ovat anisotrooppisia materiaaleja. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi ominaisvirtausvastus ei ole sama kohtisuoraan ja sivusta. Villoissa kuitujen tiheys on $\rho_M = 2450 \text{ kg/m}^3$. Tämä ei kuitenkaan ole itse villalevyn tiheys ρ_A , sillä kuitujen seassa on ilmaa sekä sidosaineita. Villojen tiheys on normaalisti 30 - 100 kg/m^3 . Poikkeuksena ovat erikoisvillat, joiden tiheys on 7 - 20 kg/m^3 ja kuitukoko pienempi kuin normaalivilloissa. Näitä käytetään esimerkiksi lentokoneissa, joissa tavallinen villa olisi liian raskasta [3].

Huokoisuuden h voi laskea villan tiheydestä ja villakuitujen tiheydestä kaavalla (3.4).

$$h = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} \quad (3.4)$$

Koska näiden villojen huokoisuus on lähellä arvoa 1, ne voidaan laskennassa korvata vastaavalla fluidilla.

2.2.2. Luonnonkuidut

Suurin ero puukuidun ja villojen välillä on kuitujen ontto rakenne. Siinä, missä lasi- ja kivivillojen kuidut ovat umpinaisia, ovat puukuidut onttoja ja näin jopa 65 % kuidun tilavuudesta voi olla ilmaa [12]. Toinen merkittävä ero on kuitujen keskimääräinen halkaisija. Tyypillisesti akustisiin tarkoituksiin käytetyissä lasi- ja kivivillassa kuitujen keskimääräinen halkaisija on noin 6 - 10 µm. Tällaisten lasivillojen kuidun pituus on noin 10 - 30 mm. Kivivillan kuidun pituus on lyhyempi, tyypillisesti noin 3 mm. Puukuitu puolestaan on muodoltaan suorakulmainen. Sen leveys on n. 40 µm, pituus n. 35 µm ja seinämäpaksuus n. 3 µm. Näin puukuidulle saadaan tiheydeksi noin 480 kg/m^3 kosteuden ollessa 0 %. Eräs luonnonkuitujen haittatekijä on niiden absorptiokyvyn heikkeneminen pitkällä aikavälillä, mikäli ne altistuvat kosteudelle. Lisäksi kosteudesta aiheutuu homeongelmia.

Lämmöneristysominaisuuksia ja akustiikkaa on tutkittu myös hedelmien kuorista. Potentiaalisimpia hedelmiä ovat kookoskuitu sekä durian-hedelmän kuori [13,14]. Kookoskuitua saadaan kookospähkinöiden kuoren ulko-osasta

josta puristamalla saadaan patjoiksi materiaalia, jota käytetään esimerkiksi autojen penkkien täytteenä. Kookoskuidussa on suuri ligniinipitoisuus, joka tekee kuidusta kovan, sitkeän ja erittäin huokoisen. Kuitujen huokoisuus voi olla jopa 95 % [15].

2.2.3. Muut materiaalit

Villojen ja luonnonkuitujen käyttö absorbenttina voi aiheuttaa terveysriskejä niistä irtoavien hiukkasten takia. Tämän takia on kehitetty absorbentteja jotka ovat ns. kuituvapaita. Tällaisia ovat metallivaahdot, kierrätyslasivaahdot sekä polyesterivaahdot. Lisäksi nämä materiaalit ovat tuotantokustannuksiltaan halpoja ja ne kestävät hyvin sääolosuhteita. Kierrätyslasivaahdot käytetään Alfa-tuotepereissä, ja niiden mainostetaan olevan akustisesti yhtä tehokkaita kuin villatkin [7,8]. Polyesterivaahdon suuri etu on sen taipuisuudessa, mutta sen ominaisvirtausvastus on hyvin pieni, tyypillisesti n. 20 % saman tiheyden omaavasta villasta.

Akustinen absorptio on alumiinivaahdon yksi tärkeimmistä ominaisuuksista. Sen etuja ovat erinomainen säikestävyys sekä hygienia. Alumiinivaahdot on olemassa sekä avosolu-, että umpisolurakenteisena. Avosoluinen vaahto absorboi ääntä tehokkaammin, sillä sen ominaisvirtausvastus on suuri [16]. Umpisoluinen metallivaahdot on huono absorbentti, mikä johtuu kovien soluseinämien heikosta sisäisestä vaimennuksesta sekä vähäisestä avoimesta huokoisuudesta. Kokeellisesti on todettu, että pienistä soluista koostuva alumiinivaahdot absorboi äänienergiaa tehokkaimmin, kun sen takana ei ole ilmapäliä. Tällöin optimaalinen solukoko olisi 0.1 mm. Ilmapälin kanssa tehokkaimmin ääniä absorboivat keskikokoiset solut. Kuvassa 2.1 on esitetty erilaisia epäorgaanisia absorbentteja.

Huokoisen betoni EPC:n pinnan huokoisuus on 15 – 20 %. Akustisten ominaisuuksien lisäksi huokoisen betonin vahvuuksia ovat vähäinen kiilto ja liukkaus, mikä johtuu sen erinomaisesta veden imukyvystä [17]. Tutkimuksissa on todettu, että EPC-betonin absorptio-ominaisuudet ovat hyvät, kun polypropyleenikuitujen osuus on 1.5 % EPC-betonin tilavuudesta. Tämä johtuu siitä, että nämä kuidut yhdistävät EPC-betonin huokosia ja tällöin EPC-betoniin kohdistuva ääniaalto kulkee pidemmän matkan, mikä kasvattaa etenevän ääniaallon energiahäviötä. On myös tärkeää, että polypropyleenikuitujen pituus on pienempi kuin EPC-betonin huokoisten halkaisija.



Kuva 2.1. Epäorgaanisia absorbentteja. Vasemmalla kierrätyslasivaahto ja oikealla avosoluinen alumiinivaahto.

2.3. Pohdinta

Villojen erinomaiset akustiset ominaisuudet ovat olleet tiedossa jo pitkään mutta niiden absorptio tehokkuudessa ei ole tapahtunut merkittäviä parannuksia viime vuosina. Tämä johtuu siitä, että niiden mikrorakenne vaimentaa ääntä optimaalisesti. Siksi vaihtoehtoisten absorbenttien tutkimus ja kehitystyö ovat johtuneet muista seikoista kuten materiaalin säänkestävyydestä, epäorgaanisuudesta ja ympäristöystävällisyydestä. Tällaisia materiaaleja onkin kehitetty, ja yleisimpiä niistä ovat kierrätyslasi-, sekä alumiinivaahto. Nämä materiaalit ovat paloturvallisuutensa ja säänkestävyytensä ansiosta erinomaisia vaihtoehtoja villalle sijoituksissa, joissa tällaisia ominaisuuksia tarvitaan.

RESONAATTORIT

3.1. Johdanto

Koska absorbenttien kyky vaimentaa ääntä pienillä taajuuksilla on varsin heikko, on tätä varten kehitetty akustisia resonaattoreita. Resonaattoreiden toiminnallinen taajuusalue on heikko suhteessa absorbentteihin, mutta resonaattoreiden eduksi voidaan katsoa niiden viritettävyyden pienille taajuuksille. Toisin kuin absorbenteilla, resonaattoreilla akustinen toiminta ei ole riippuvainen ainoastaan elementin paksuudesta. Ne voidaan viritellä haluttuun toiminnalliseen keskitaajuuteen monilla eri parametreilla. Tässä kappaleessa on esitetty resonaattoreiden teoriaa, niiden yleisimmät tyypit sekä käyttökohteet.

Akustinen resonaattori on rakenne, joka muuttaa äänienergiaa värähtelijän liike- ja potentiaalienergiaksi ja kykenee siten vaimentamaan ääniaallon energiaa. Tämä johtuu resonaattorin kyvystä värähdellä voimakkaasti ääniaallon taajuudella. Värähteleminen voi tapahtua joko resonaattorielementin ilmatilassa ilman värähtelyä, tai se voi olla resonaattorin seinämissä tapahtuvaa levyn värähtelyä. Värähtely voi kytkeytyä edelleen rakenteen sisäisten häviöiden kautta lämpöenergiaksi. Häviöitä voivat aiheuttaa ilmatilan absorpentit, viskoottiset ilmiöt rei'issä tai seinärakenteiden sisäiset häviöt. Koska äänienergia kytkeytyy resonaattorin fysikaalisiin rakenteisiin, sen toimintakaistanleveys on aina rajoitettu. Tämän takia resonaattoreiden käyttö on usein rajoittunutta ja ne on suunniteltaessa viritettävä käyttötarkoitukseen sopivaksi. Yleensä resonaattorit suunnitellaan passiivisiksi. Tämä tarkoittaa sitä, että niiden parametreja ei voi säätää resonaattorin toiminnan aikana. Joissakin tapauksissa tämä on kuitenkin tarpeellista, ja siksi on kehitetty aktiivisia resonaattoreita. Näissä niiden ominaisuuksia ohjataan toiminnan aikana esimerkiksi tietokoneella.

Resonaattorien ns. hyvyttä voidaan luonnehtia Q -arvolla. Q -arvo on värähtelypiirin laadun mittaluku ja se määritellään sähköiseen piiriin varastoituneen energian ja piirin häviötehon suhteena [18]:

$$Q = \frac{\omega_r W}{P_t} \quad (3.1)$$

missä ω_r on piirin resonanssikulmataajuus, W on piirin tekemä työ ja P_t on piirin häviöteho. Yksinkertaiselle värähtelypiirille tämä voidaan lausua myös muodossa,

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} \quad (3.2)$$

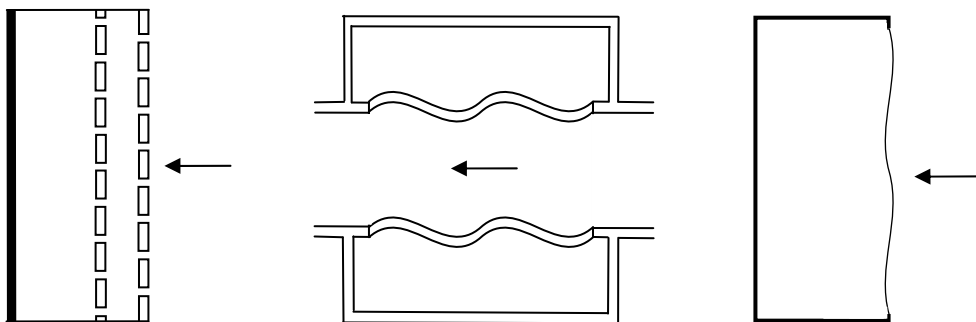
jossa R on piirin tehollinen resistanssi, L piirin induktanssi ja. Akustiikassa käytetyin Q -arvon kaava on kaava (3.3), jossa nähdään Q -arvon ja läpäisykaistan leveyden riippuvuus, jossa Δf_{3dB} on läpäisykaistan 3 dB leveys ja f_r on resonanssitaajuus [18].

$$Q = \frac{f_r}{2\Delta f_{3dB}} \quad (3.3)$$

Resonaattoreita hyödynnetään laajalti soittimissa. Useasti resonaattorit mielletään soittimissa kuitenkin pelkiksi ”kaikukopaksi”. Seuraavassa käydään läpi oleelliset akustiset resonaattorityypit ja niiden käyttökohteet.

3.2. Resonaattorityypit

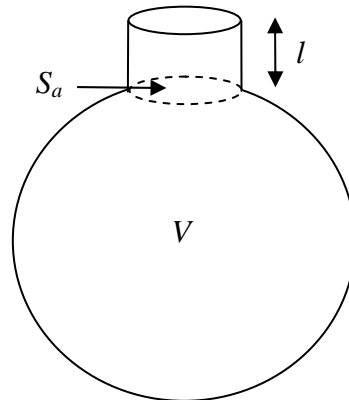
Lähes kaikki kaupalliset resonaattoriratkaisut perustuvat joko ilmassan tai levyn värähtelyyn, koska näillä ilmiöillä saadaan tutkimusten mukaan tehokkaimpia tuloksia. Näistä tärkeimmät ovat Helmholtz- ja reikäresonaattorit. Näiden lisäksi on kehitelty muita resonaattorityyppejä, mutta ne perustuvat enemmän tai vähemmän Helmholtz- tai levyresonaattorin toimintatapaan. Tällaisia ovat esimerkiksi, kaksilevyinen Helmholtz-resonaattori, rumpuresonaattori ja kalvoresonaattori. Näiden toimintaperiaatteet ovat esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1, Resonaattorityyppejä. Vasemmalta: kaksilevyinen reikäresonaattori, rumpuresonaattori ja kalvoresonaattori. Äänen tulosuunta on esitetty kuvissa nuolella.

3.2.1. Helmholtz-resonaattori

Helmholtz-resonaattori on reaktiivinen ääntä takaisin heijastava vaimennin. Sen toiminta perustuu jousi-massa -järjestelmän resonanssiin. Tämä resonanssi muodostuu säiliön ilmatilavuudesta syntyvän akustisen kapasitanssin ja säiliön yhdysputkessa tai suuaukossa olevan ilmassan yhteisvaikutuksesta. Hyvin toimiakseen Helmholtz-resonaattorin seinämän on oltava jäykkä, ilmatilan tiivis ja suuaukon molemmille puolille on jätettävä vähintään suuaukon levyinen ilmatila. Helmholtz-resonaattorin rakenne on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2, Helmholtz-resonaattorin rakenne, missä S_a on reiän pinta-ala, V on resonaattorin tilavuus, l on suuaukon pituus.

Passiivisia Helmholtz-resonaattoreita on hyödynnetty äänenvaimennuksessa jo antiikin Kreikasta lähtien [19]. Nykyisin niitä käytetään yleisimmin kirkkoissa, tehtaiden ilmastointikanavissa, piipuissa sekä autojen pakoputkissa. Helmholtz-resonaattoreita käytetään myös käänteisesti äänen muokkaimena. Useissa akustisissa soittimissa kuten esimerkiksi viuluissa ja kitaroissa kaikukoppa toimii Helmholtz-resonaattorina. Resonaattorit on mitoitettu siten, että ne korostavat sävelasteikkoon sopivia äänitaajuuksia suhteessa muihin taajuuksiin, ja luovat kauniin soinnin soittimeen.

Soittimissa Helmholtz-resonaattoreiden seinämiä ei pyritä tekemään täysin jäykiksi, koska seinämäpintojen yksi tarkoitus on toimia tehokkaasti ääntä säteilevänä pintana. Helmholtz-resonaattoreita käytetään lisäksi mm. kaiuttimien bassorefleksikoteloidissa. Niissä kotelon sisätila muodostaa Helmholtz-resonaattorin säiliön, ja jossakin kopan seinämässä sijaitseva reikä resonaattorin suuaukon. Kotelo ja suuaukko suunnitellaan siten, että Helmholtz-resonanssi on bassoelementin alarajataajuuden alueella. Tällöin viritystaajuuden ympäristössä resonaattorin suuaukko säteilee äänitehoa samassa vaiheessa kun bassokaiutin. Kotelo kuormittaa samalla bassoelementtiä, jolloin sen liikepoikkeama ja harmoninen särö pienenevät. Bassorefleksikotelolla saadaan siten ulotettua bassotoistoa pienemmille taajuuksille.

Vaikka resonaattorin rakenne on yksinkertainen, se on suunniteltava huolellisesti. Tämä siksi, että Helmholtz-resonaattorin vaimennettava taajuusalue on suhteellisen kapeakaistainen. Vaimennettavaa taajuuskaistaa voi laajentaa leveämmäksi lisäämällä ilmatilaan vaimennusmateriaalia kuten lasi- tai kivivillaa. Tällöin maksimivaimennus pienenee, mutta vaimennettava taajuusalue kasvaa. Vaimennuksen maksimitaajuus voidaan laskea kaavasta (3.4), missä f_0 on resonanssitaajuus, S_a on reiän pinta-ala, V on resonaattorin tilavuus, l on levyn paksuus ja a on reiän säde [3].

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_a}{V \left(l + \frac{16a}{3\pi} \right)}} \quad (3.4)$$

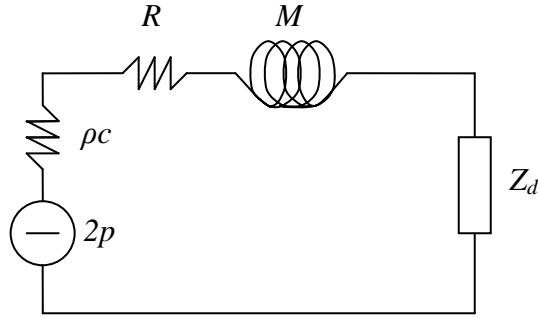
Aktiivisessa Helmholtz-resonaattorissa kaulan dimensioita ja kotelon tilavuutta muutetaan ulkoisen ohjausjärjestelmän avustuksella jolloin saadaan haluttu resonanssitaajuus [19]. Tällaisia ratkaisuja on tarjolla esimerkiksi rakennuksien ilmanvaihtokanaviin. Koska ilmanvaihtokanavissa etenevän äänen taajuus riippuu mm. ilmavirtauksen nopeudesta, taajuus muuttuu ilmanvaihtotehoa muutettaessa. Tässä tapauksessa perinteinen Helmholtz-resonaattori ei kelpaa sen staattisen viritystaajuuden vuoksi. Adaptiivisen vaimennuksen huono puoli on että sen hinta kasvaa näytteenottotaajuutta kasvatettaessa ja mikroprosessoreita nopeutettaessa.

3.2.2. Reikäresonaattori

Reikäresonaattori koostuu reiitetyistä levystä, joka on tietyllä etäisyydellä akustisesti kovasta pinnasta. Siten siinä on käytetty useita Helmholtz-resonaattoreita, joiden väliseinät on poistettu. Reikäresonaattorin etu tavanomaiseen Helmholtz-resonaattoriin nähden on sen laajempi vaimennusalue, joka voi olla jopa useita oktaaveja. Toisin kuin Helmholtz-resonaattorissa, reikäresonaattorissa reikien halkaisijat ovat millimetrin luokkaa. Tämä on myös reikäresonaattorin suurin etu, sillä näin siinä syntyy akustisia häviöitä ilman viskositeetin takia. Tämä on yksi syy reikäresonaattorien laajempaan toiminnalliseen taajuuskaistaan Helmholtz-resonaattoriin verrattuna. Reikäresonaattorin akustinen ominaisimpedanssi ja vaimennustehokkuus riippuu äänen tulokulmasta, mutta ominaisimpedanssin voi saada siitä riippumattomaksi lisäämällä sisätilaan sivuseinät reikiä ympärille [5]. Näin jokainen reikä on kuin solussa ja resonaattori toimii paikallisesti reagoivan materiaalin tavoin, jolloin sen akustinen ominaisimpedanssi ei ole riippuvainen tulokulmasta [20].

Kun reikiä halkaisijaa pienennetään siten, että reiän dimensiot ovat samaa suuruusluokkaa viskoottisen rajakerrospaksuuden kanssa vaimennettavalla taajuusalueella, puhutaan mikroperforoidusta reikäresonaattorista tai mikroreikäresonaattorista [7]. Näissä reikiä koot ovat tyypillisesti 0.2 mm – 1 mm, ja pienen kokonsa tähden vaimennettavaa taajuuskaistaa saadaan entistä laajemmaksi. Tämä johtuu siitä, että rei'issä ja niiden läheisyydessä liikkuvan ilman massa on pieni, mutta viskoottiset häviöt suuret.

Reikäresonaattorin sähköinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Reikäresonaattorin sähköinen sijaiskytkentä.

Reikäresonaattorin etulevyyn kohdistuvan ääniaallon äänenpaine on $2p$, joka on analoginen avoimen piirin jännitteelle sähköisessä sijaiskytkennässä ja ρc on ilmassa etenevän tasoallon impedanssi. M kuvaa reikien akustisen ominaisimpedanssin massatermiä ja R reikien akustisen ominaisimpedanssin resistiivistä termiä. Resonanssisysteemi koostuu reikien massa-vastus-elementistä, joka on sarjassa ilmvälin reaktanssin $Z_d = \rho c \cot(\omega D/c)$ kanssa, jossa D on ilmvälin paksuus. Tällöin kohtisuoralle tulokulmalle äänen absorptiosuhde α_N saadaan kaavalla (3.5). Mielivaltaiselle tulokulmalle $0 < \theta < \pi/2$ pätee (3.7) [21]. Kaavoissa on oletettu, että ilmvälissä ei ole absorboivaa materiaalia.

$$\alpha_N = \frac{4R\rho c}{(R + \rho c)^2 + (\omega M - \rho c \cot(\omega D/c))^2} \quad (3.5)$$

$$= \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \cot(\omega D/c))^2} \quad (3.6)$$

$$\alpha_\theta = \frac{4r \cos \theta}{(1+r \cos \theta)^2 + (\omega m \cos \theta - \cot(\omega D(\cos \theta)/c))^2} \quad (3.7)$$

Yo. Kaavoissa $m = M/\rho c$ ja $r = R/\rho c$. Absorptiosuhteen maksimi kohtisuoraan saapuvalle ääniaallolle on tällöin (3.8) resonanssikulmataajuudella ω_0 (3.9).

$$\alpha_{\max} = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (3.8)$$

$$\omega_0 m - \cot(\omega_0 D/c) = 0 \quad (3.9)$$

Reikäresonaattori on mahdollista virittää halutulle taajuudelle monilla parametreilla. Merkittävin parametri on etulevyn rei'itysaste, eli perforaatioaste p . Perforaatioaste voidaan laskea kaavalla (3.10), jossa k on reikien määrä, h on reiän halkaisija ja A on etulevyn pinta-ala.

$$p = \frac{k(\pi h/2)^2}{A} \quad (3.10)$$

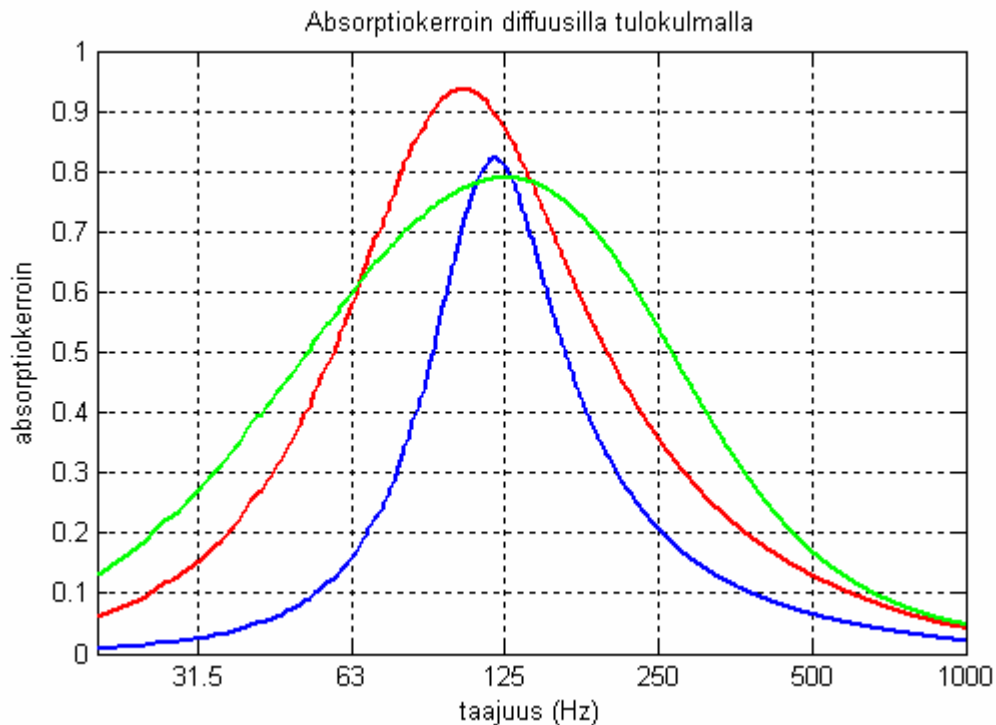
Reiän säteen sekä etulevyn paksuuden suhde ominaisimpedanssiin on nähtävissä kaavassa (3.11). Siinä Z on akustinen ominaisimpedanssi, J_0 ja J_1 ovat nollannen sekä ensimmäisen kertaluvun Besselin funktioita. Lisäksi η on viskositeettikerroin ja t on levyn paksuus [21]. Kaavassa ei ole otettu päätykorjauksia huomioon.

$$Z = j\omega\rho l \left[1 - \frac{2}{x\sqrt{-j}} \frac{J_1(x\sqrt{-j})}{J_0(x\sqrt{-j})} \right]^{-1}, \quad x = a_0 \sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}} \quad (3.11)$$

Perforaatioaste on reikäresonaattoreissa tyypillisesti luokkaa 0.2 % - 5 % [22]. Etulevyn paksuudella, ilmavälin syvyydellä ja reikien halkaisijalla on myös mahdollista vaikuttaa resonaattorin keskitaajuuteen sekä absorptiokaistanleveyteen. Näistä ilmavälin syvyys ja reikien halkaisija ovat tärkeässä asemassa resonaattorin tehokkuutta mitattaessa. Etulevyn paksuudella on ratkaisevasti merkitystä ainoastaan suurilla taajuuksilla, jolloin sen paksuus vaikuttaa resonaattorin tehokkuuteen.

On syytä huomata, että reikäresonaattorin suurin vahvuus on sen tarjoamissa vaihtoehtoissa virittää resonaattori monen eri tekijän kautta. Siinä, missä levyresonaattori (kts. luku 3.2.3) on mahdollista virittää ainoastaan ilmaväliä sekä etulevyn neliömassaa muuttamalla, reikäresonaattori voidaan virittää neljän eri parametrin avulla. Nämä parametrit ovat ilmaraon syvyys, reikien halkaisija, etulevyn paksuus sekä etulevyn perforaatioaste. Tämä antaa huomattavan vapauden suunnittelussa, sillä haluttu taajuus voidaan saavuttaa periaatteessa neljän muuttujan äärettömän monella yhdistelmällä. Reikäresonaattori on siis mahdollista virittää toimimaan 100 Hz:n keskitaajuudella 200 mm:n ilmavälillä sekä myös 50 mm:n ilmavälillä, ja säilyttää silti toiminnallisen taajuuskaistana laajana. Levyresonaattorille tällainen suunnittelun vapaus ei ole mahdollista. Reikäresonaattorit ovat yleensä passiivisia, koska niiden parametreja on hankala muuttaa käytön aikana. Aktiivinen reikäresonaattori periaatteessa on mahdollista suunnitella, mutta tällöin sen ainoa säädettävä parametri olisi ilmaraon syvyys. Joissain sovelluskohteissa tämä voi olla kuitenkin riittävä.

Kuten kaikkien ilmatilaa hyödyntävien resonaattoreiden, myös reikäresonaattorin tehokkuutta voidaan parantaa lisäämällä ilmatilaan vaimennusmateriaalia. Lisätyllä vaimennusmateriaalilla ei ole heikentävää vaikutusta maksimivaimennukseen kuten tavanomaisella Helmholtz-resonaattorilla, jonka ilmatilassa on vaimennusmateriaalia. Vaimennusmateriaalin avulla reikäresonaattorin vaimennettavaa taajuusaluetta saadaan siirretyksi pienemmille taajuuksille [23]. Tämä johtuu siitä, että äänen nopeus vaimennusmateriaalissa on pienempi kuin ilmassa, jolloin ilmatilan efektiivinen syvyys kasvaa. Vaimennusmateriaalia on myös mahdollista asentaa reikälevyn päälle. Tällöin suurempien taajuuksien vaimennus kasvaa, mutta itse reikäresonaattorin maksimivaimennus laskee. Esimerkki vaimennusmateriaalin sijoituksen vaikutuksesta on esitetty kuvassa 3.4.

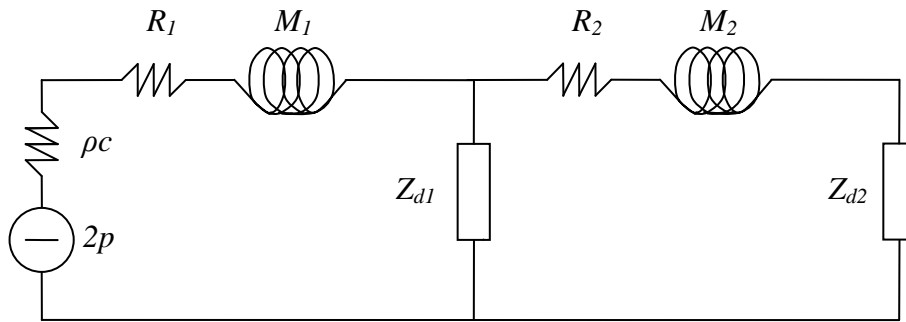


Kuva 3.4. Vaimennusmateriaalin sijoituksen vaikutus toiminnalliseen kaistanleveyteen. Sinisellä on sellaisen reikäresonaattorin absorptiokäyrä, jonka ilmatilassa ei ole absorpenttia. Punaisella taas on absorptiokäyrä reikäresonaattorista jossa on ilmatilassa ominaisvirtausvastukseltaan $10\,000\text{ Nm/s}^4$ olevaa absorpenttia. Vihreällä on absorptiokäyrä reikäresonaattorista, jonka ilmatila on täynnä absorpenttia, jonka ominaisvirtausvastus on $30\,000\text{ Nm/s}^4$. Reikäresonaattorin reikien säde on 1 mm, levyn paksuus 2 mm ja ilma-aiheen syvyys 150 mm. Absorptiokertoimet ovat laskettu diffuusille tulokulmalle.

Koska reikäresonaattorin seinämien ainoa vaatimus on niiden jäykkyys, reikäresonaattori on mahdollista rakentaa lukuisista eri materiaaleista. Yleisimpiä materiaalivalintoja ovat puu, kovalevy ja lasikuitu. Lisäksi pintaviimeistelyssä voidaan käyttää mitä tahansa sisustuksellisia ratkaisuja. Yksi tällainen ratkaisu on ALFA-tuoteperheen reikäresonaattori joka ei sisällä lainkaan vaimennusmateriaalia ja jonka etulevy on lasia. Näin se on varsin edustava ja huomaamaton ratkaisu esimerkiksi kauppakeskuksissa tai toimistoissa.

Reikäresonaattoreita voidaan asentaa vaativiin olosuhteisiin, kuten kosteisiin, tuulisiin ja lämpötilaltaan vaihteleviin olosuhteisiin. Näissä sijoituksissa seinäminä käytetään lasia, metallia tai muovia. Tällöin reikäresonaattorit kestävät vaikeitakin olosuhteita. Rajoituksena on poikkeuksetta sellaisten vaimennusmateriaalien käyttö reikäresonaattorissa, joka laskee sen suorituskykyä. Esimerkiksi lasivilla, puu- tai muut luonnonkuidut eivät tule kysymykseen, sillä ne eivät kestä vaativia olosuhteita ja resonaattorin elinikä jäisi varsin lyhyeksi. Hyvään säikestävyyteen on yritetty kehittää ratkaisuja jo pitkään. Tähän ongelmaan metalli- ja kierrätyslasivaahdot ovat parhaat ratkaisut tähän mennessä.

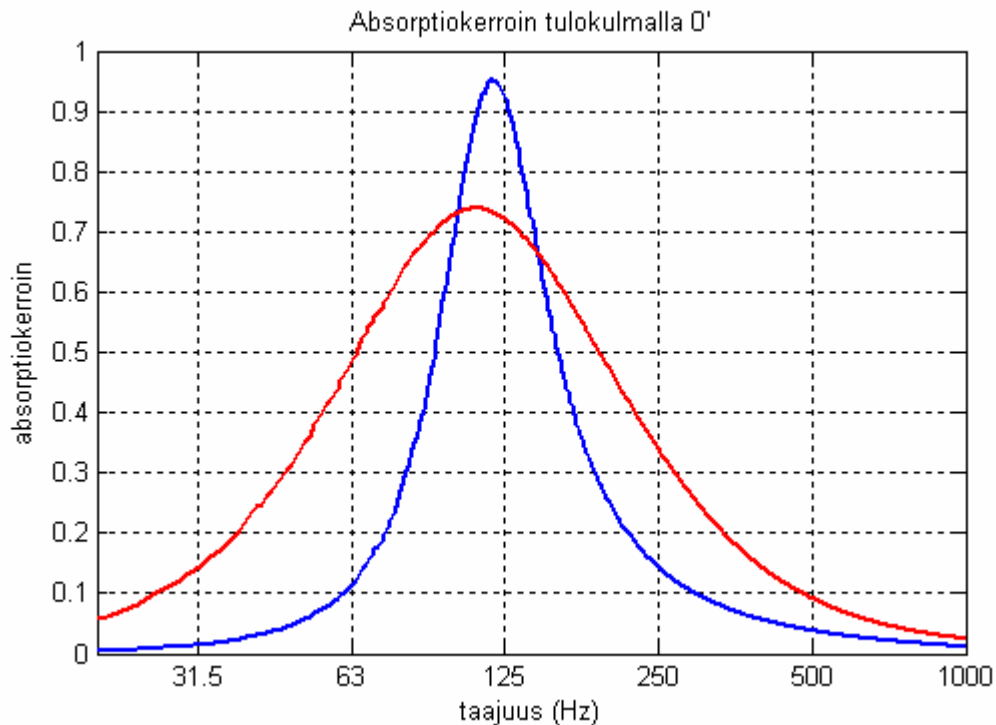
Reikäresonaattori on mahdollista toteuttaa myös siten, että reikälevyjä on kaksi tai useampia yhden sijasta. Tällöin resonaattorin keskitaajuuksien lukumäärä on reikälevyjen lukumäärä. Tyypillisesti käytetään kahta reikälevyä, jolloin puhutaan kaksoisreikäresonaattorista tai dual-reikäresonaattorista. Näillä on mahdollista levittää absorptiotaajuuskaistaa laajakaistaisemmaksi, mikä on tärkein syy miksi kaksoisreikäresonaattoreita suunnitellaan. Kaksoisreikäresonaattorin sähköinen sijaiskytkentä noudattaa samaa analogiaa kuin kuvassa 3.3 esitetyn tavanomaisen reikäresonaattorin.



Kuva 3.5. Kaksoisreikäresonaattorin sähköinen sijaiskytkentä. Parametrien alaindeksit kuvaavat kumman reikäresonaattorin parametri on.

3.2.3. Levyresonaattori

Levyresonaattori toimii kuten Helmholtz-resonaattori, mutta siinä suuaukko on korvattu joustavalla umpinaisella etulevyllä. Levyresonaattori muodostuu täten akustisesta kapasitiivisesta massa-jousi-rakenteesta, jossa massana toimii umpinainen etulevy ja jousena ilma. Ilma sijaitsee ilmativiissä ja umpinaisessa takatilassa. Vaikka levyresonaattorin vaimennus on suurimmillaan massa-jousijärjestelmän resonanssitaajuudella, lisävaimennusta saadaan suuremmilla taajuuksilla myös etulevyn ominaistaajuuksilla tapahtuvasta sisäisestä vaimennuksesta. Levyresonaattorin rakenne on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6. Vaimennusmateriaalin sijoituksen vaikutus absorptiokaistanleveyteen. Sinisellä on sellaisen levyresonaattorin absorptiokerroin, jonka ilmatilassa on ilmaa ja punaisella absorptiokerroin, jonka ilmatila on täynnä ominaisvirtausvastukseltaan $30\,000\text{ Nm/s}^4$ olevaa absorpenttia

Vaimennettava taajuusalue levyresonaattorissa on varsin kapeakaistainen, tosin taajuusaluetta voi kasvattaa lisäämällä ilmatilaan vaimennusmateriaalia kuten villaa. Tällöin huippuvaimennus laskee tyypillisesti noin 3 dB vaimennettavan taajuuskaistan kasvaessa sen verran, että kokonaisabsorptioenergia pysyy samana. Levyresonaattorin resonanssitaajuus lasketaan kaavalla (3.12),

$$f_c = \frac{60}{\sqrt{m_s D}} \quad (3.12)$$

jossa m_s on etulevyn neliömassa ja D on ilmapälin syvyys. Kuten kaavasta (3.12) nähdään, levyresonaattori on mahdollista mitoittaa kahden eri muuttujan avulla. Käytännössä tämä ei kuitenkaan toteudu tyydyttävästi, sillä toiminnallisen taajuuskaista pienenee huomattavasti ilmapälin pienentyessä, ellei etulevyn neliömassaa kasvateta samassa suhteessa. Etulevyn suuri neliömassa tekee kuitenkin resonaattorista raskaan, mikä tekee siitä vaikeasti liikuteltavan. Ilmapälin on siis syytä pitää mahdollisimman suurena, jolloin absorptioala on mahdollisimman leveä, ja keskitaajuutta voidaan säätää valitsemalla etulevyn neliömassa halutuksi.

Kapean vaimennusalueensa tähden levyresonaattoria käytetään lähinnä huoneakustiikassa huonemoodien vaimennukseen. Tyypilliset vaimennettavat taajuudet ovat 50 – 200 Hz [24], mutta suurella ilmapälinällä ja etulevyn neliömassalla on mahdollista päästä jopa 20 Hz keskivaimennustaajuuteen.

Käyttökohteensa ansiosta levyresonaattori asennetaan usein kiinni seinään, jolloin seinä toimii jäykkänä takalevynä. Takalevyn on oltava jäykkä, muuten keskivaimennus siirtyy suuremmille taajuuksille useita prosentteja. Umpinaisen rakenteensa ansiosta levyresonaattoreita on mahdollisuus käyttää vaativissa olosuhteissa kuten savupiipuissa ja tuuletuskanavissa [25]. Lisäksi etulevy on mahdollista pinnoittaa ohuella joustavalla materiaalilla, jolloin etulevystä saadaan esteettisesti miellyttävän näköinen. Etulevy voi olla käytännössä mitä tahansa jäykkää materiaalia. Tyypillisesti etulevyn materiaalina käytetään kumia, kovalevyä tai kipsiä.

3.3. Pohdinta

Tässä luvussa esiteltiin tärkeimmät ja olennaisemmat resonaattoryypit, joita ovat Helmholtz-, levy-, ja reikäresonaattori. Helmholtz-resonaattorin vaatimuksena on kohtuullinen ilmatila, sekä putken suuaukon halkaisija, josta resonaattorin Q -arvo on riippuvainen. ”Akustokuitukomposiitti”-projektissa tarvittavan resonaattorin tehtävä on ulottaa absorbenttielementin vaimennusaluetta pienimmille taajuuksille. Helmholtz-resonaattorilla, jossa suuaukko olisi resonaattorin sivussa, tätä ei ole mahdollista saavuttaa. Tämä johtuu siitä, että resonaattorin suuaukon on oltava halkaisijaltaan yli 100 mm. Toinen vaihtoehto olisi sijoittaa suuaukko resonaattorin etulevyyn, jolloin suuaukon halkaisija voi olla riittävän suuri. Tällöin resonaattorin toiminta kuitenkin heikentyisi, sillä resonaattorin esteettömän toiminnan aikaansaamiseksi putken molemmissa päissä on oltava vähintään putken halkaisijan verran ilmatilaa ilmapatsaan värähtelyn edellyttämiseksi. Tämän lisäksi koko absorptioelementin paksuudesta on jätettävä noin puolet itse vaimennusmateriaalille mikä tarkoittaa, että Helmholtz-resonaattorin suuaukon leveys saisi olla maksimissaan 50 mm. Näin pieni suuaukko heikentäisi Helmholtz-resonaattorin Q -arvoa merkittävästi.

Levyresonaattorissa on samantyyppisiä ongelmia kuin Helmholtz-resonaattorissa. Kun Helmholtz-resonaattorin suuaukon halkaisijan on oltava pienillä taajuuksilla suuri, tulee levyresonaattorin levyn neliömassan oltava pienillä taajuuksilla merkittävä. Tämä vaatisi väistämättä paksua etulevyä sekä tilaa levyn vapaaseen värähtelyyn, mikä vähentää elementin absorbenttipaksuutta ja edelleen kokonaisuudessaan laajakaista-absorbentin tehokkuutta. Levyresonaattori toimisi akustisesti tehokkaasti, mikäli sillä olisi suuri ilmatila. Tämä ei projektin absorbenttielementissä ole mahdollista 100 mm rakennepaksuuden puolesta.

Reikäresonaattori osoittautuu tähän projektiin ylivoimaisesti parhaaksi vaihtoehdoksi, koska sen suurin vahvuus on mitoittaa resonaattori usean eri muuttujan kautta projektin absorptioelementtiin. 50 mm tai jopa pienempi ilmatila antaa hyvän absorptiopinta-alan reikäresonaattorille ja mahdollistaa jopa kaksoisreikäresonaattorin käytön elementissä.

Reikäresonaattori on suunniteltava ja mitoitettava optimaaliseksi, jotta ylimääräistä hyötysuhdetta ei menisi hukkaan. Tämä on periaatteessa

mahdollista laskea teoreettisilla reikäresonaattorin mitoituskäytännöillä. Allekirjoittanut ratkaisi ongelman hyödyntämällä VTT:n Matlab-koodia reikäresonaattorin mitoitusta varten [2] ja kehitti optimointiohjelman parhaimman resonaattorin ratkaisemiseksi halutuilla arvoilla. Asiaa on käsitelty luvussa 5.

MITTAUSMETODIIKKA

4.1. Johdanto

Tässä luvussa käsitellään diplomityössä suoritettujen mittauksien metodiikkaa, sekä niiden teoriaa. Suoritetuissa mittauksissa kiinnostuksen kohteina on ollut impulssivaste. Tämän saamiseksi systeemi on todettava ideaaliseksi. Ideaalisella fysikaalisella järjestelmällä on neljä pääominaisuutta [26]:

- 1) realisoituva eli fysikaalisesti toteutettavissa
- 2) parametreiltään vakio
- 3) stabiili
- 4) lineaarinen

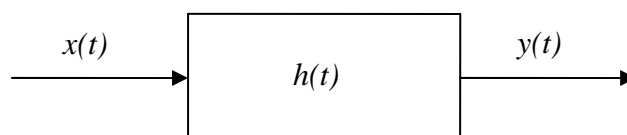
4.2. Järjestelmän impulssivaste

Kun mittaussysteemi täyttää tämän luvun johdannossa mainitut neljä ehtoa, se on ideaalinen. Tällaisen järjestelmän tärkein perusominaisuus on sen yksikköimpulssivastefunktio $h(t)$ eli lyhyesti impulssivaste. Impulssivastefunktio sisältää täydellisen informaation järjestelmän käyttäytymisestä ja vasteesta mille tahansa herätteelle. Impulssivastefunktiolla on nolasta poikkeava arvo ainoastaan ajan hetkellä 0 (4.1), ja sen integraali on yksi (4.2) [27].

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & , t = 0 \\ 0 & , t \neq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (4.2)$$

Tarkastellaan järjestelmää, jonka herätteenä on tulosignaali $x(t)$ ja jonka vaste on lähtösignaali $y(t)$, kuva 4.1.



Kuva 4.1. Ideaalinen yhden tulo- ja yhden lähtösignaalin järjestelmä.

Yksikköimpulssivastefunktio määritellään

$$h(t) = y(t), \quad \text{kun} \quad x(t) = \delta(t) \quad (4.3)$$

missä t on aika mitattuna siitä hetkestä lähtien, kun deltafunktio $\delta(t)$ tulee järjestelmään. Kun tunnetaan järjestelmän yksikköimpulssivastefunktio, mille tahansa mielivaltaiselle tulosignaalille $x(t)$ saadaan järjestelmän vaste $y(t)$ konvoluutiointegraalilla (4.4).

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (4.4)$$

Lausekkeessa (4.4) integraalin alaraja on 0, koska kausaalinen eli fysikaalisesti realisoituva järjestelmä ei voi tuottaa vastetta herätteelle ennen kuin heräte on saapunut järjestelmän tuloon. Tällöin

$$h(\tau) = 0, \quad \text{kun} \quad \tau < 0 \quad (4.5)$$

Fysikaalinen järjestelmä on parametreiltään vakio, jos yksikköimpulssivastefunktio ei ole riippuvainen tulosignaalin saapumisajankohdasta (4.6).

$$h(t, \tau) = h(\tau) \quad \text{kaikille} \quad -\infty < t < \infty \quad (4.6)$$

Tällöin stationääriset herätteet tuottavat aina stationääriset vasteet. Järjestelmä on stabiili, jos mikä tahansa rajoitettu tulosignaali tuottaa rajoitetun vasteen. Tämä ehto täyttyy, jos kaava (4.7) pätee.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(\tau)|d\tau < \infty \quad (4.7)$$

Järjestelmä on lineaarinen, jos se on additiivinen ja homogeeninen. Additiiviselle järjestelmälle pätee

$$y = h * x = y_1 + y_2, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} x = x_1 + x_2 \\ y_1 = h * x_1 \\ y_2 = h * x_2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Homogeeniselle järjestelmälle pätee (4.9), missä termi C on vakio.

$$y_2 = Cy_1, \quad \text{kun} \quad \begin{cases} x_2 = Cx_1 \\ y_1 = h * x_1 \\ y_2 = h * x_2 \end{cases} \quad (4.9)$$

Usein systeemin lineaarisuus on vaikeimmin saavutettavissa oleva ideaalisuuden ehto mitattavissa systeemeissä. Akustiikassa epälineaarisuus liittyy yleensä suuriin äänenpaineisiin tai sähköakustisiin järjestelmiin. Äänenpaineen ollessa suurempi kuin n. 164 dB signaalin puoliallot eivät ole

enää symmetrisiä, eikä systeemi näin ollen ole lineaarinen. Tämä johtuu siitä, että ääniaallon harventuman ilmanpaine lähestyy nollaa, jolloin systeemin vastustus ilmapaineen pienenemiseen käy merkittäväksi. Käytännössä tällaisia tilanteita esiintyy vain harvoissa tapauksissa. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi raketin laukaisu tai ampuma-aseella ampuminen.

4.3. Taajuusvastefunktio

Lineaarisia ja aikainvariantteja fysikaalisia järjestelmiä kuvataan useammin joillain impulssivastefunktion $h(t)$ lineaarisella muunnoksella mieluummin kuin impulssivasteella itsellään. Jos tavoitellaan järjestelmästä esitystä taajuusalueessa, hyödyllisintä ja tehokkainta on käyttää Fourier-muunnosta, sillä se tuottaa suoraan esityksen taajuusalueessa.

$$\mathbf{H}(f) = \int_0^{\infty} h(t)e^{-2j\pi ft} dt \quad (4.10)$$

Kaava (4.10) on nimeltään taajuusvastefunktio. Se on kompleksinen taajuuden funktio, jolla on reaali- ja imaginääriosat. Kompleksiset funktiot ovat merkitty kaavoissa lihavoidulla kirjasimilla.

$$\mathbf{H}(f) = H_R(f) - jH_I(f) \quad (4.11)$$

$$H_R(f) = \int_0^{\infty} h(t)\cos(2\pi ft) dt \quad (4.12)$$

$$H_I(f) = \int_0^{\infty} h(t)\sin(2\pi ft) dt \quad (4.13)$$

Käytännössä on usein tarkoituksenmukaisempaa ilmoittaa taajuusvastefunktio polaarinoitaatiolla itseisarvon ja vaiheen avulla:

$$\mathbf{H}(f) = |\mathbf{H}(f)|e^{-j\phi(f)} \quad (4.14)$$

$$|\mathbf{H}(f)| = \sqrt{H_R^2(f) + H_I^2(f)} \quad (4.15)$$

$$\phi(f) = \arctan\left(\frac{H_I(f)}{H_R(f)}\right) \quad (4.16)$$

Vastaavasti impulssivastefunktio $h(t)$ on mahdollista laskea taajuusvastefunktiosta käänteis-Fourier-muunnoksella (4.17).

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{H}(f)e^{j2\pi ft} df \quad (4.17)$$

Tärkein syy, miksi Fourier-muunnosta käytetään signaalianalyysissä, on sen tuoma helpotus eräissä laskennoissa. Kahden signaalin konvoluutiointegraali aika-alueessa on mahdollista korvata pelkällä kertolaskulla taajuusalueessa. Tämä on suuri helpotus, sillä konvoluutiointegraali on usein matemaattisesti

varsin hankala tai jopa analyttisesti ratkeamaton laskutoimitus. Konvoluutiointegraali (4.17) yksinkertaistuu muotoon

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (4.18)$$

Tämän jälkeen itse vaste aika-alueessa saadaan käänteismuunnoksella.

$$y(t) = \mathcal{F}^{-1}\{Y(f)\} \quad (4.19)$$

Jos siis on ratkaistava systeemin impulssivaste $h(t)$, on lähes poikkeuksetta järkevää ratkaista se taajuusvastefunktiosta kahden mittaussignaalin Fouriermuunnosten avulla:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (4.20)$$

On vain harvoja tapauksia, jossa impulssivaste $h(t)$ voidaan ratkaista aika-alueessa konvoluutiointegraalilla. Tällainen on esimerkiksi tapaus, jossa herätesignaali on mittajaan itsensä synnyttämä, ja tämän kontrollissaan.

4.4. Mittaukset impedanssiputkella

Impedanssiputki on työväline, jolla mitataan materiaalien akustisia ominaisuuksia. Se on tärkein mittausväline tässä opinnäytetyössä, koska sillä suoritettiin kaikki mittaukset opinnäytetyössä testattavilla materiaaleilla. Impedanssiputki on yleensä pyöreä tai suorakulmainen putki, jonka toisessa päässä on äänilähde ja toisessa mitattava materiaali, jonka takana mittauksen kannalta akustisesti kova seinä. On huomattava, että mittaustulokset ovat realisoitavissa ainoastaan tilanteisiin, jossa mitattavan näytteen takana sijaitsee kova seinämä. Impedanssiputken toiminta perustuu tasoaalton

$$P(x, f) = P_i(f)e^{-jkx} + P_r(f)e^{jkx} \quad (4.21)$$

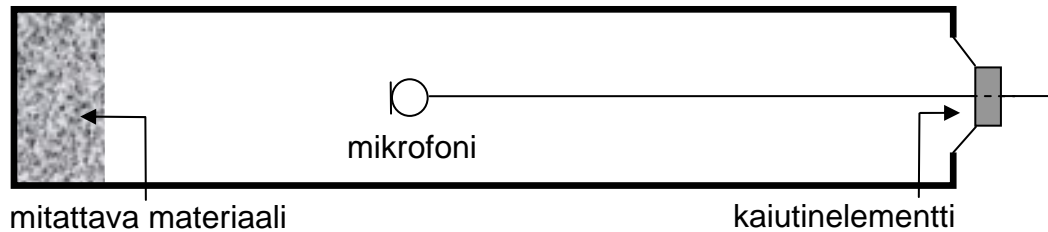
etenemiseen. Kaavassa (4.21) ensimmäinen termi kuvaa etenevää tasoaaltoa ja jälkimmäinen heijastunutta tasoaaltoa. Tasoallon ylärajataajuuden f_{max} määrää putken halkaisija h (4.22) [28]. Suorakulmaisessa putkessa kaava (4.22) korvautuu kaavalla (4.23), missä h on putken pidempi dimensio.

$$f_{max} = 1.84 \frac{c}{\pi h} \quad (4.22)$$

$$f_{max} = \frac{c}{2h} \quad (4.23)$$

Yksiulotteisuudesta johtuen impedanssiputken avulla mitatut ominaisimpedanssi, heijastussuhde sekä absorptiosuhde pätevät ainoastaan kohtisuoraan pintaan tulevalle tasoallolle.

Perinteisessä impedanssiputkessa äänikentän mittauksessa käytetään yhtä mikrofonia, jota liikutellaan putkessa sen pituussuunnassa. Seisovan aallon putki on esitetty kuvassa 4.2.

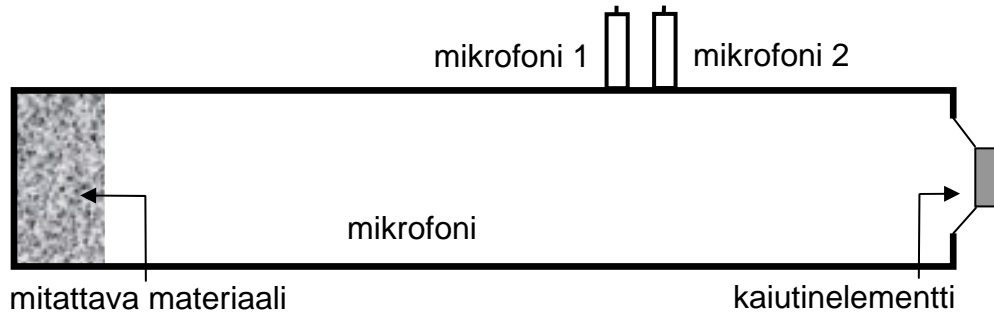


Kuva 4.2. Perinteinen impedanssiputki. Tutkittava näyte sijaitsee putken vastakkaisessa päässä äänilähteeseen nähden.

Heijastussuhde ratkaistaan seisovan aallon putkessa nimensä mukaisesti seisovan aallon menetelmällä. Äänilähteeseen syötetään sinisignaalia ja äänikenttä mitataan pistetaajuus kerrallaan. Putkessa vallitsevasta yksiulotteisesta tasoaltokentästä etsitään äänenpaineminimit sekä maksimit liikuteltavan mikrofonin avulla. Mittauksen taajuusresoluutio määräytyy käytettyjen pistetaajuuksien resoluutiosta. Näin ollen heijastussuhteen mittaaminen leveältä taajuusalueelta seisovan aallon putkella on varsin työläs prosessi. Alarajataajuuden f_{min} perinteisessä impedanssiputkessa määrää putken pituus l (4.24). Tämä johtuu siitä että putken alimpaa seisovaa aaltoa pienemmällä taajuuksilla ei ole mahdollista löytää äänenpaineen maksimeja, sillä putken muodostuneen aallon pituus on pienempi kuin mitattavan taajuuden aallonpituuden neljännesaallonpituus.

$$f_{min} = \frac{c}{2l} \quad (4.24)$$

Seisovan aallon menetelmää nykyaikaisempaa on käyttää kaksikanavamenetelmää jossa mittaustulos saadaan nopeasti signaalianalyysin avulla. Siinä portaattomasti liikuteltava mikrofoni on korvattu kahdella, lähietäisyydellä toisistaan olevilla mikrofonilla, jotka sijaitsevat kiinteällä etäisyydellä äänilähteestä. Tähän tarkoitukseen suunniteltu impedanssiputki on esitetty kuvassa 4.3.

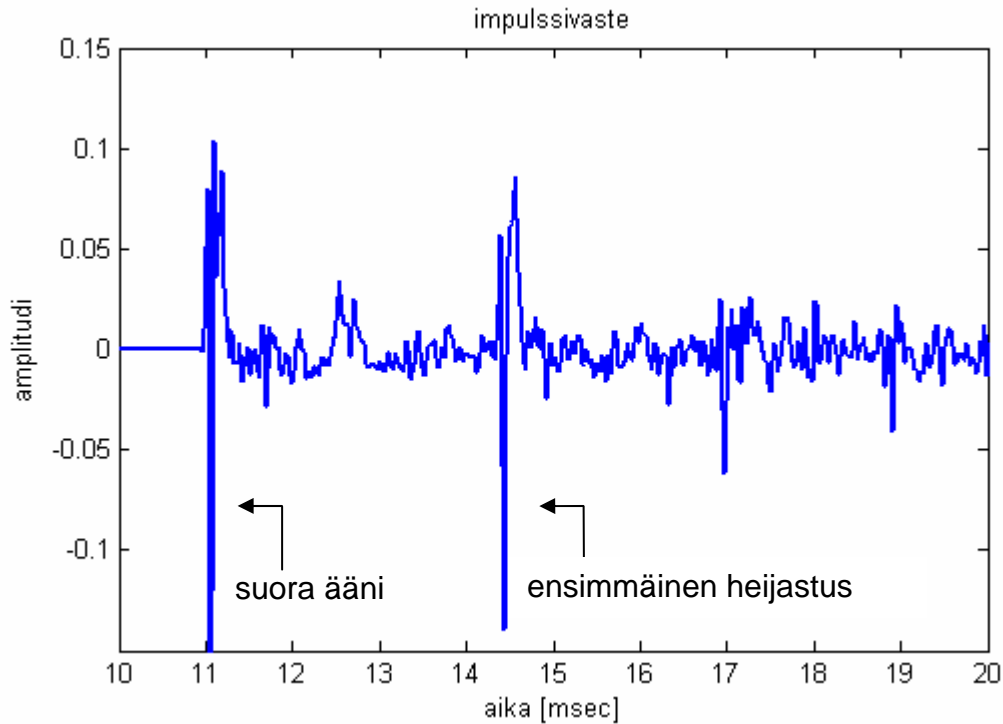


Kuva 4.3, Nykyaikaisessa Impedanssiputkessa kaksi mikrofonia sijaitsee kiinteästi näytteen ja äänilähteen välissä lähietäisyydellä toisistaan.

Impedanssiputkessa impulssivaste lasketaan systeemin vasteesta kaavalla (4.17). Tässä herätteenä voi toimia käytännössä mikä tahansa signaali, joka sisältää taajuusalueen kaikkia komponentteja. Heijastussuhde voidaan laskea impulssivasteista joko ikkunointimenetelmällä tai taajuusvastemenetelmällä. On huomattava että nykyaikaisessa impedanssiputkessa mitattavissa oleva alarajataajuus ei määräydy putken pituudesta, sillä sen mittausmetodiikka poikkeaa perinteisestä seisovan aallon menetelmästä. Koska kaksikanava-menetaelmällä mitataan kahden mikrofonin välistä siirtofunktiota, mikrofonien välinen etäisyys asettaa mitattavan alarajataajuuden. Tämä johtuu siitä, että taajuuden lähestyessä nollaa mikrofonien välinen siirtofunktio lähestyy arvoa 1.

4.4.1. Heijastussuhde ikkunointimenetelmällä

Ikkunointimenetelmässä mitataan tuleva ja heijastunut aalto samanaikaisesti impedanssiputken sisällä ja lasketusta impulssivasteesta ikkunoidaan saapuvan äänen osuus pois. Näin jäljelle jää ainoastaan heijastunut ääni, josta saadaan mitatun materiaalin heijastussuhde Fourier-muunnoksen avulla jakamalla se taajuuksittain signaalista leikatulla saapuvan äänen osuudella. Mittauksessa käytetään ainoastaan yhtä mikrofonia. Menetelmä vaatii kuitenkin mitattavalta systeemiltä tiettyä minimitulavuutta tai mitattavalta pinnalta tiettyjä minimidimensioita, jotta heijastukset muista pinnoista eivät sotkisi mittaussignaalia [26,29]. Impedanssiputken yksiulotteisen äänikentän tapauksessa näitä rajoituksia ei ole. Lisäksi käytetyn äänilähteen impulssivasteen pituus määrää minimietäisyydet äänilähteen, mittausmikrofonin ja mitattavan näytteen välille.



Kuva 4.4. Mitatun systeemin impulssivasteesta on selvästi nähtävissä suoran äänen ja heijastuneen äänen osuus.

Systeemin taajuusresoluutio on

$$\Delta f = \frac{1}{T_{eff}} \quad (4.25)$$

missä T_{eff} on suoran äänen etureunan ja impulssivasteen loppuosan välinen aikaväli. Tästä seuraa suoraan, että liian lyhyt impedanssiputki tuottaa huonon taajuusresoluution absorptiokertoimelle. Tätä asiaa ei voi kiertää nostamalla näytteenottotaajuutta, eikä millään muullakaan signaalinkäsittelymenetelmällä, sillä sen määrää aika-taajuus-epätarkkuusperiaate.

4.4.2. Heijastussuhde taajuusvastemenetelmällä

Vaihtoehtoinen, usein relevantimpi tapa mitata materiaalin heijastussuhdetta on mitata äänikenttä (4.21) kahdella, toisistaan etäisyydellä d olevalla painemikrofonilla. Tällöin saadaan ratkaistuksi sekä heijastuskerroin, että ominaisimpedanssi ja kaikki intensiteetit millä tahansa kohdalla impedanssiputkessa. Tässä menetelmässä ratkaistaan taajuusvastefunktio $H_{12}(f)$ mikrofoniin 1 ja 2 välillä kummankin mikrofoniin taajuusvasteiden Fourier-muunnoksella (4.17), jotka kerrotaan keskenään (4.18). Tämä on mahdollista, koska yksiulotteisessa tasoaltokentässä taajuusvastefunktiot mikrofoniin välillä tunnetaan analyttisesti kummallekin tasoaltokomponentille:

$$H_i(f) = e^{-jkd} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{H}_r(f) = e^{jkd} \quad (4.27)$$

Kompleksisen heijastuskertoimen ratkaisu mikrofonin 1 kohdalla on

$$\mathbf{R}(f) = \frac{\mathbf{H}_{12}(f) - e^{-jkd}}{e^{jkd} - \mathbf{H}_{12}(f)}, \quad (4.28)$$

josta sitä voidaan siirtää laskennallisesti mihin kohtaa impedanssiputkea tahansa kaavan (4.29) avulla. Kaavassa (4.29) R_0 on vaihevasteen reaaliosa ja x siirtymä [26].

$$\mathbf{R}(f, x) = R_0(f) e^{2j k x} \quad (4.29)$$

Luonnollisesti heijastuskerroin siirretään mitattavan materiaalin kohdalle, jolloin saadaan mitattavan materiaalin kompleksinen heijastuskerroin. Jos pelkästään heijastuskertoimen itseisarvo on oleellinen, ei siirtoa ole tarpeellista tehdä, sillä siirrettäessä ainoastaan heijastuskertoimen vaihe muuttuu.

4.4.3. Absorptiokerroin, ominaisimpedanssi sekä vaihe taajuusvastemenetelmällä.

Kaavalla (4.28) saadusta mitatun näytteen heijastuskertoimesta on mahdollista ekstrapoloida absorptiosuhde, ominaisimpedanssi sekä vaihe. Kun heijastuskerroin on siirretty näytteen etupinnalle kaavalla (4.29), saadaan siitä absorptiosuhde kaavalla (4.30).

$$\rho(f, x) = 1 - |R(f, x)|^2 \quad (4.30)$$

Näytteen pinnan ominaisimpedanssin määrittämisessä on ensisijaisen tärkeää, että heijastuskerroin on siirretty täsmälleen näytteen etupinnan kohdalle. Jo 1 tai 2 mm virhe etäisyydessä johtaa suureen virheeseen pintaimpedanssissa varsinkin suuren ominaisvirtausvastuksen omaavissa näytteissä [12]. Ominaisimpedanssi saadaan heijastuskertoimesta kaavalla (4.31)

$$Z(f, x) = \frac{1 + R(f, x)}{1 - R(f, x)} Z_0, \quad (4.31)$$

missä Z_0 on ilman karakteristinen impedanssi. Usein impedanssista halutaan tietää vain normeerattu itseisarvo, joten kaavasta (4.31) saadaan:

$$z(f, x) = \frac{|Z(f, x)|}{Z_0} \quad (4.32)$$

Vaihe saadaan heijastuskertoimesta kaavalla (4.33).

$$\varphi(f, x) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(R(f, x))}{\text{Re}(R(f, x))} \right) \quad (4.33)$$

4.5. Herätesignaali

4.5.1. Impulssi

Impulssin käyttö herätesignaalina olisi ideaalista, sillä tällöin mitatusta järjestelmästä saatu vaste on suoraan haluttu impulssivaste. Tämä ei kuitenkaan käytännössä ole mahdollista, sillä ideaalisen impulssin tuottamiseen tarvittaisiin ääretön kaistanleveys. Äärettömän kaistan ongelma voidaan kuitenkin kiertää luomalla sellainen impulssi, jonka spektri ulottuu ainoastaan mitattavalle taajuuskaistalle. Tämä on tiettyyn pisteeseen saakka mahdollista, sillä impulssin tasainen spektri on kääntäen verrannollinen impulssin pituuteen. Lisäksi impulssivasteen huippukerroin CF on kääntäen verrannollinen signaalin pituuteen. Tästä seuraa välittömästi, että ideaalisen impulssin huippukerroin on ääretön. Huippukerroin määritellään yhtälöllä (4.34), missä $\max\{|x(t)|\}$ on signaalin $x(t)$ suurin arvo ja T on signaalin kesto.

$$CF = \frac{\max\{|x(t)|\}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t))^2 dt}} \quad (4.34)$$

Mittauksissa on edullista käyttää huippukertoiltaan mahdollisimman pientä mittausignaalia, sillä tällä tavalla saadaan mahdollisimman hyvä signaalikohinasuhde ja mitattavaan systeemiin saadaan syötettyä paljon energiaa lineaarisella toiminta-alueella. Impulssiherätettä käytettäessä signaalikohinasuhdetta on mahdollista parantaa keskiarvoistamalla monen mittauskerran yli. Tällöin itse hyötösignaalin teho kasvaa $20\log_{10}N$ laskettaessa N mittauskerran vasteet yhteen. Signaali-kohinasuhde ei kuitenkaan kasva samassa suhteessa, sillä kohinan satunnaisuudesta johtuen se ei korreloi mittauskertojen välillä. Kohinan teho kasvaa N keskiarvoistuksessa suhteessa $10\log_{10}N$, joten signaali-kohina suhde kasvaa siis suhteessa $10\log_{10}N$ laskettaessa N mittauskerran yli. Hyvän signaali-kohinasuhteen saavuttaminen käyttäen impulssia herätteenä edellyttää siten lukuista mittauksen toistoa ja sen keskiarvoistamista. Esimerkiksi 10 mittauskerran yli keskiarvoistaminen parantaa signaali-kohinasuhdetta ainoastaan 2 dB ja sadan mittauskerran yli 20 dB verrattuna yhteen mittauskertaan.

Mittauksiin riittävä impulssi saadaan aikaan käyttämällä äänilähteenä kaiutinta. Kaiuttimen rajoituksena tosin on, että sen toistaman impulssin muoto vääristyy johtuen kaiuttimen kartiomuodosta. Tyypillisesti kaiutinkartiot ovat keskeltä syvempiä kuin reunoilta, jolloin ääni säteilee kartion reunoista kartion keskiosaa aiemmin [37].

4.5.2. Schroeder-sekvenssi

Schroeder-sekvenssin tarkoituksena on minimoida signaalin huippukerroin CF . Tämä tapahtuu kontrolloimalla signaalin harmonisten komponenttien vaihetta kaavalla (4.35), missä N on harmonisten komponenttien lukumäärä, l on harmonisten komponenttien kertaluku ja p_l on harmonisen komponentin

amplitudi [30].

$$\phi_n = \phi_1 - 2\pi \sum_{l=1}^{n-1} (n-l)p_l \quad (4.35)$$

Tasaisen magnitudispektrin tapauksessa kaava (4.35) palautuu muotoon (4.36), sillä nyt harmonisten komponenttien amplitudi on sama.

$$\phi_n = \phi_1 - \frac{\pi n^2}{N} \quad (4.36)$$

Vastaava aika-alueen sekvenssi olisi äärettömän pitkä taajuuspyyhkäisy, joka syntyisi viemällä ideaalinen impulssi $\delta(t)$ sellaisen yksikkösuotimen läpi, jonka ajallinen viive $d(f)$ on taajuuden lineaarinen funktio [31] (4.37).

$$d(f) = kf \quad (4.37)$$

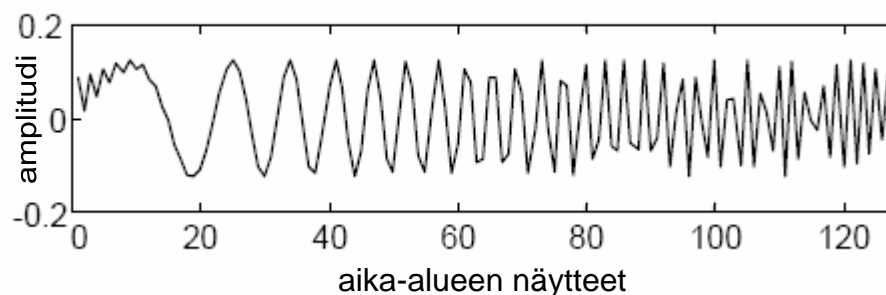
Viive voidaan myös määritellä kaavalla (4.38)

$$d(f) = \frac{\phi(\omega)}{\omega} = \frac{\phi(f)}{2\pi f} \quad (4.38)$$

missä ω on kulmataajuus ja $\phi(\omega)$ viivettä $d(f)$ vastaava vaihekulman kiertyminen taajuuden funktiona. Kaavoista (4.37) ja (4.38) saamme vaiheelle lausekkeeksi (4.39).

$$\phi(f) = 2\pi kf^2 \quad (4.39)$$

Vaihe on siten verrannollinen taajuuden neliöön, kuten myös kaavassa (4.36). Näin aika-alueessa diskreeteistä sekvensseistä muodostuu taajuuspyyhkäisyn approksimaatio, jolla on joitakin mittausteknisiä etuja. Siinä ei ole epäjatkuvuuskohtaa, sillä pyyhkäisy alkaa alusta loputtuaan. Näin ollen spektri on lähes valkoinen. Koska sekvenssistä puuttuu epäjatkuvuus, sitä voi toistaa sulavasti peräkkäin, mikä on hyödyllistä keskiarvostuksessa.



Kuva 4.5. 128 näytteen pituinen Schroeder-sekvenssi, jonka huippukerroin CF on 1.417 [31].

4.5.3. MLS-heräte

Maksimipituusjono (Maximum Length Sequence, MLS) on näennäissatunnaista herätesignaalia käyttävä menetelmä, jolla voidaan mitata systeemin impulssivaste. Toisin kuin useimmat muut menetelmät, MLS-menetelmässä primäärikäsittely tapahtuu taajuusalueen sijaan aika-alueessa. Itse signaali koostuu näennäissatunnaisesta jaksosta diskreettejä näytteitä -1 ja 1 .

Impulssivaste määritetään MLS-menetelmällä syöttämällä järjestelmään tunnettu näennäissatunnainen, mutta deterministinen signaali, ja laskemalla vasteen sekä herätteen ristikorrelaatio. Korrelaatiofunktio ei kuitenkaan ole tavallinen, vaan synkronoitu kehämäinen ristikorrelaatio [26]. Näin vältetään tavallisen konvoluution perustuvaan ristikorrelaation laskennan hitaus, sillä tunnettu, deterministinen heräte voidaan synkronoida vasteen kanssa. Lisäksi laskennassa käytetään erikoiskäsittelyitä kuten esim. ns. Nopea Hadamard-muunnosta, jolloin laskentanopeus on suunnilleen FFT:n suuruusluokka, vaikka toimitaankin aika-alueessa. Maksimipituusjonomenetelmällä on useita sekä teoreettisia, että käytännöllisiä hyötyjä tavanomaisiin mittaussignaaleihin nähden [32]:

- MLS-herätteellä huippukerros CF on 1 eli pienin mahdollinen. Tämä tarkoittaa sitä, että tällä menetelmällä saadaan optimaalinen signaalikohinasuhde.
- Toisin kuin valkoinen kohina, MLS-heräte ei ole satunnainen vaan deterministinen eli se on täsmälleen toistettavissa. Tästä syystä ei ole tarvetta mitata samanaikaisesti herätesignaalia, kuten tavallisessa 2-kanavaisessa FFT-analyysissä, sillä se on tunnettu.
- Signaalia ei tarvitse ikkunoida, sillä MLS-heräte on jaksollinen. Näin vältetään ikkunoinnin aiheuttamilta lisähankaluuksilta. Lisäksi signaalin katkaisuefektiiä ei esiinny, sillä koko yhden jakson pituista jonoa käytetään impulssivasteen laskemisessa ristikorrelaation avulla.
- MLS-signaalin matemaattisten ominaisuuksien ansiosta on mahdollista laskea tehokkaasti hyvinkin pitkiä impulssivasteita. Kun tästä otetaan FFT-muunnos, saadaan suuriresoluutioinen taajuusvaste.

Käytettäessä MLS-herätettä järjestelmän vasteen mittaamiseen on kuitenkin otettava huomioon, että MLS-signaalia on syötettävä järjestelmään tarpeeksi pitkän aikaa, jotta alkutransientit ehtivät tasaantua. Lisäksi on huomioitava, että järjestelmän vaste ei muutu mittausunäytejonon hankinnan aikana, sillä MLS-sekvenssi sopii vain aikainvarianttien järjestelmien mittaamiseen. MLS-signaali ei myöskään sisällä tasavirtakomponenttia, mutta akustisia järjestelmiä mitattaessa tämä on yleensä hyöty eikä haitta. Tärkeää on myös huolehtia laskostumisestosta kahdesta syystä: MLS-mittauksessa voi esiintyä taajuusalueen laskostumista johtuen AD-muunnoksesta ja aika-alueen laskostumisesta. Lisäksi Nyquist-taajuuteen ei päästä virheettömästi, sillä MLS-signaalin autospektri on sinc-funktion muotoinen eli signaali on pudonnut n. 1.5 dB taajuudella, joka on $1/3$ näytteenottotaajuudesta eli 67 % Nyquist-taajuudesta. Näistä syistä Nyquist-taajuuden on hyvä olla kolme kertaa

näytteenottotaajuus [11].

4.5.4. Logaritminen taajuuspyyhkäisy

Logaritmisella taajuuspyyhkäisyllä voidaan mitata tehokkaasti mitattavan systeemin epälineaarisuutta, koska sen avulla voidaan dekonvoloida mitatusta signaalista suoran äänen ja kaikkien harmonisten impulssivasteet [33]. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mitatun vasteen dekonvoluutiosta nähdään selvästi sekä suoran-, että harmonisten äänien impulssivasteet aika-alueessa. Näitä impulssivasteita on mahdollista tarkastella yksittäisesti taajuusalueessa FFT:n ja signaalin ikkunoinnin avulla.

Logaritmisien taajuuspyyhkäisyn etuja muihin herätteisiin verrattuna ovat [33,34]:

- Logaritminen taajuuspyyhkäisy käyttää saman ajan kaikilla oktaaveilla, ja siten kaikilla oktaaveilla on sama energia. Tällöin kaikilla taajuuksilla on sama signaali-kohina-suhde.
- Logaritmisella taajuuspyyhkäisyllä pyyhkäisynopeus on verrannollinen taajuuteen. Pyyhkäisynopeus on suhteellisesti hidas pienillä taajuuksilla mutta nopea suurilla taajuuksilla. Tämä mahdollistaa systeemin epälineaarisuuden mittaamisen myös pienillä taajuuksilla ilman, että pyyhkäisysignaalin nopeus olisi hidas koko taajuusalueella.
- Logaritminen taajuuspyyhkäisy sietää mittauksen aikana hyvin pientä systeemin aika-varianssia, sekä vasteen ja herätteen epäsynkronointia.

Logaritminen taajuuspyyhkäisy on virheensietokykyisä ja systeemin epälineaarisuustarkastelunsa ansiosta käytetyin herätesignaali nykypäivänä. Se on parempi kuin MLS-heräte, koska MLS-herätteessä vaste on synkronoitava tarkasti herätteen kanssa. Se on myös parempi kuin Schroeder-signaali, koska Schroeder-signaalin etuna on ainoastaan herätteen huippukertoimen minimoiminen. Tällä ei logaritmisessa taajuuspyyhkäisyssä ole väliä, koska epälineaarisuudet voidaan ikkunoida mittaussignaalista pois.

4.6. Quicksig

Quicksig on oliopohjainen ohjelma digitaalista signaalinkäsittelyä varten ja sitä käytettiin diplomityön putkimittauksissa [35]. Putkimittausta varten mittaussignaali alustettiin seuraavasti: Amplitudi asetettiin 10000 bittiä suureksi ja pyyhkäisysignaalityypiksi Schroeder-signaali. Sen pituudeksi asetettiin 2^{14-1} bittiä, jolloin mittaussignaalin kestoksi tulee n. 1.6 sekuntia. Näytetaajuus asetettiin arvoon 44100 Hz. Mittausmenetelmäksi valittiin kaksikanavamenetelmä, jonka keskiarvoistus tehtiin kolmen mittauskerran yli. Pyyhkäisysignaalityypiksi ei ollut mahdollista valita logaritmista taajuuspyyhkäisyä, sillä ohjelmassa tämä ei ollut vaihtoehtona kaksikanavamenetelmällä.

MATLAB-OHJELMAT

5.1. Johdanto

Allekirjoittaneen aloittaessa opinnäytetyötä VTT:llä "Akustokuitukomposiitti"-projektin parissa suunnitteilla ei ollut käyttää absorpenttielementtien suunnittelussa optimointimetoodeja. Oivallus tuli allekirjoittaneelle reikäresonaattorin tutkimusten myötä, ja se päätettiin kirjoittaa itse Matlab-ohjelmalla. Tämä johtuu siitä, että vaikka kehittyneitä optimointimetoodeja on useita, ei niiden käyttöä projektin tarkoitukseen katsottu tarpeelliseksi. Olemassa olevat optimointimenetelmät ovat tarkoitettu lähinnä hyvin raskaisiin laskutoimituksiin, jossa laskutoimitukset tai muuttujien määrät voi olla hyvin suuria. Näin ei kuitenkaan ole projektissa suunniteltavien rakenteiden kohdalla, koska suunniteltavat rakenteet koostuvat enintään kuudesta muuttujasta. Tämän takia optimointimenetelmäksi valittiin kaikkein yksinkertaisin menetelmä, jossa tulos lasketaan kaikkien mahdollisten muuttujien yhdistelmällä.

Projektia varten on kehitetty useita Matlab-ohjelmia analysoimaan mittausdataa ja estimoimaan laskennallisesti erilaisten rakenteiden akustisia ominaisuuksia. Näistä tärkein ohjelma on allekirjoittaneen opinnäytetyön ohjaajan, VTT:n Seppo Uosukaisen kirjoittama. Tämä ohjelma laskee siirtojohtoteoriaa käyttämällä absorpenttirakenteen heijastus- sekä absorptiokertoimen halutulla tulokulmilla. Ohjelman hienous on sen kyky laskea kertoimet mille tahansa absorptentin, reikäresonaattorin ja ilmaraon yhdistelmälle. Lisäksi ohjelman antamat tulokset ovat tarkkoja, sillä absorptenttiyhdistelmän rakenteesta tehdään siirtojohtosijaisfunktio, eikä siinä siten käytetä laskennassa minkäänlaisia likiarvokaavoja.

5.2. Impedanssiputkimittausten analysointiohjelma

Absorptiokertoimen mittaustulosten analysointia varten allekirjoittanut kirjoitti ohjelman, joka laskee absorptiokertoimen mitatusta kahdesta impulssivasteesta (kts. luku 4.4.2) kaavaa (4.28) käyttäen. Lisäksi saatu vaste keskiarvoistetaan halutulla tarkkuudella, jolloin itse kuvaajasta tulee visuaalisesti miellyttävämmän näköinen. Matlab ohjelma "absorptiosuhde.m" on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Ohjelman oleellimmat komentorivit ovat esitetty alla:

```
H1 = (fft(h((delay:length(h)),1),fs));  
H2 = (fft(h((delay:length(h)),2),fs));
```

Laskee impulssivasteista taajuusvasteet kaavaa (4.10) käyttäen. FFT:n. Näytejonon pituus on impulssivasteiden pituus, jolloin ikkunointia ei tarvita ja taajuusvasteen resoluutio on 1 Hz. H1 ovat mikrofonin 1 ja H2 mikrofonin 2

taajuusvastefunktiot.

```
H12 = H1./H2;
```

Koska taajuusvaste on taajuusalueessa, mikrofonien välinen taajuusvaste H12 voidaan laskea yksinkertaisella kertolaskulla (4.18).

```
for A = signal_min:(length(H12)/2)
    k = 2*pi*(A)/320;
    R(A) = (H12(A)-exp(-j*k*d))/(exp(j*k*d)-H12(A));
end
```

Tässä lasketaan kompleksinen heijastuskertoimen R ratkaisu mikrofonin 1 kohdalla kaavan (4.28) avulla.

```
for A = signal_min:(length(H12)/2)
    k=2*pi*(A)/320;
    R2(A) = R(A)*exp(2*j*k*r);
end
```

Heijastuskerroin R on siirrettävä Smithin kartan avulla mitattavan materiaalin etureunan kohdalle, jotta se vastaa sen heijastuskerrointa R2. Etäisyys mikrofonin 1 kohdalla mitattavan näytteen etureunalle on arvo r.

```
Y = 1-(abs(R2).^2);
```

Absorptiokerroin Y saadaan heijastuskertoimesta R2 käyttämällä kaavaa (4.30).

```
[Y] = frequencyaveraging(Y,fmin,fmax,0.93);
```

Tässä absorptiokerrointa keskiarvoistetaan allekirjoittaneen kirjoittamalla Matlab-funktiolla frequencyaveraging oktaavin kymmenesosakaistoittain taajuusalueella fmin – fmax, joka on impedanssiputken mittaussuure. Koska oktaavin taajuussuhde on $1/\sqrt{2}$ ja vastaavasti terssikaistan $1/\sqrt[3]{2}$, on oktaavin kymmenesosan taajuussuhde $1/\sqrt[10]{2} \approx 0.93$. Funktio on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

5.3. Reikäresonaattorin optimointi

Ohjelman tavoitteena on löytää optimaalinen levyresonaattorin rakenne Seppo Uosukaisen ohjelman avulla. Tämä tapahtuu syöttämällä koodiin ilmaraon syvyyden, sekä reiän säteen pienimmät ja suurimmat arvot sekä haluttu resonanssitaajuus. Tämän jälkeen ohjelma laskee 100 eri kombinaatiota mahdollisista reikäresonaattoreista ja laskee absorptiokerroimen jokaiselle kombinaatiolla erikseen. Ohjelman pääalgoritmi on esitetty alla.

```
A = 1;
for J = 1:10
    for K = 1:10
        p = ((f_res/50.8)^2)*d*(dp*K + (1.6*r*J));
        tiedot(A,1) = d; tiedot(A,2) = J*r; tiedot(A,3) = K*dp; tiedot(A,4) = p;
        [absc,R,Za] = abscoeff( constr, tiedot(A,1), [], [], tiedot(A,3), tiedot(A,2),
        tiedot(A,4), f, Zk,theta);
        integraali = 0;
```

```

for L = 2:(n)
    integraali = integraali + absc(L)*absc(L)*((-log(L) + log(n))/log(n));
end
tiedot(A,5) = integraali;
A = A + 1;
end
end

```

Algoritmi ei muuta laskelmissaan ilmaraon syvyyttä, sillä pienillä taajuuksilla sen muutos suurempaan on aina aidosti kasvava. Toisin sanoen pienillä taajuuksilla paras absorptiokerroin saadaan aina suurimmalla mahdollisella ilmaraon syvyydellä. Useiden mahdollisten reikäresonaattoreiden löytäminen halutuista mitoista perustuu kaavaan (3.4):

Koska optimoinnissa taajuus f ja ilmaraon syvyys l eivät muutu, reikien säde a sekä levyn paksuus V saavat vain 'for' lauseen mukaisia arvoja. Tällöin ainoa muuttuva parametri on perforaatioaste S_a . Perforaatioaste S_a saadaan helposti muokkaamalla kaavaa (3.4):

$$S_a = \left(\frac{f_0}{c_0/2\pi} \right)^2 V \left(l + \frac{16a}{3\pi} \right) \quad (5.1)$$

Näin saamme taajuudella f kaikki mahdolliset reikäresonaattorin mitat halutulla intervallilla.

```

[absc,R,Za] =
abscoeff(constr,tiedot(A,1),[],[],tiedot(A,3),tiedot(A,2),tiedot(A,4),f,Zk,theta);

```

Jokaisen resonaattorirakenteen absorptiokerroin 100 eri mahdollisuudesta lasketaan Seppo Uosukaiset ohjelmaa käyttäen.

Jotta reikäresonaattoreiden tehokkuutta voidaan mitata keskenään, niiden absorptiokertoimia on kyettävä vertaamaan järkevästi keskenään. Tämä tapahtuu laskemalla absorptiokertoimen integraali, jota painotetaan sekä taajuuslogaritmissä painotteisesti että amplitudinelioä painotteisesti. Lopuksi yksinkertainen algoritmi etsii taulukosta tiedot suurimman painotetun integraalin omaavan reikäresonaattoriyhdistelmän ja piirtää sen ruudulle.

```

integraali = 0;
for L = 2:(n)
    integraali = integraali + absc(L)*absc(L)*((-log(L) + log(n))/log(n));
end
tiedot(A,5) = integraali;
A = A + 1;

```

Algoritmi absorptiokertoimen laadullisuuden laskemiseksi. Oleellista integraalilaskennassa on painottaa amplitudi neliöllisesti ja taajuus logaritmisesti siten, että suurin amplitudipainoarvo ja pienin taajuuspainoarvo ovat 1. Vastaavasti pienimän amplitudin painoarvo ja suurimman taajuuden painoarvo ovat 0. Ohjelman lähdekoodi on esitetty viitteessä 3.

5.4. Absorbenttien optimointi

Tämän ohjelman peruseräite on sama kuin reikäresonaattorin optimointiohjelmassa, eli tässä tapauksessa pyritään löytämään paras absorbenttiyhdistelmä annetuista vaihtoehtoista. Ohjelman toiminta-ajatus perustuu siihen, että tietyn paksuinen absorbentti on usein tehottomampi kuin muutama ohuempi, yhteispaksuudeltaan sama oleva absorbentti. Näillä ohuilla absorbenteilla on usein toisistaan poikkeavat virtausvastukset. Ero ei usein ole merkittävä, mutta silti harkinnan arvoinen, varsinkin jos tällainen monikerrosrakenne on mahdollista toteuttaa helposti ja kohtuuhintaan. Alla on esitetty ohjelman tärkeimmät komentorivit ja algoritmit. Ohjelman lähdekoodi on esitetty liitteessä 4.

```
constr = ['iaaa'];
```

Ohjelmakoodiin on syötettävä haluttu absorbentin rakenne, jonka jälkeen on syötettävä kunkin kerroksen tiedot alla oleviin komentoriveihin sen mukaisesti. On huomattava, että ohjelma etsii kaikille elementin absorbenteille optimaaliset arvot, eikä vain peräkkäin oleville. Siten esimerkiksi "arariaaa" elementin optimoiminen on mahdollista kyseisellä ohjelmalla.

```
Di = [0.05];  
r0 = [10000 10000 10000];  
d = [0.01 0.01 0.01];  
t = [];  
rp = [];  
p = [];
```

Jos elementissä on ilmapäli tai ilmapälejä, on niiden syvyydet metreissä syötettävä Di muuttujaan. Absorbenttikerroksien minimiominaisvirtausvastukset kirjoitetaan muuttujaan r0 yksikön ollessa Ns/m^4 . Kunkin absorbentin paksuus syötetään muuttujaan d. Jos taas elementti sisältää yhden tai useamman reikäresonaattorin, on niiden paksuudet t, reikien säteet rp ja perforaatioasteet p syötettävä muuttujiin. Paksuuden t ja reikien säteiden rp yksikkö on metri. Jos ei kyseistä rakennetta tule elementtiin, jätetään sen vaatimat muuttujat tyhjäksi.

```
theta = [0 30 45];
```

Äänen tulokulmaa normaaliin nähden voi muuttaa theta-muuttujassa. Arvo voi olla välillä $0 - 90^\circ$ tai se voi olla myös diffuusi, jolloin se merkitään merkinnällä 'd'. Lisäksi siihen voi syöttää useampia kuin yhden kulman, jolloin piirtyvät omat käyrät jokaiselle tulokulmalle erikseen. Muuttuja theta ei hyväksy diffuusin ja muiden kulmien yhdistelmiä. Alla on esitetty ohjelman tärkeimpiä algoritmeja ja komentorivejä:

```
absorbent_count = 0;  
for l = 1:length(constr)  
    if constr(l) == 'a'  
        absorbent_count = absorbent_count + 1;  
    end  
end
```

Tässä lasketaan kuinka monta absorbenttikerrosta on syötetty ja tallennetaan

tieto muuttujaan `absorbent_count`, jota tarvitaan useaan otteeseen myöhemmin ohjelmassa.

```
tiedot = r0_step*variations(floor(r0_max/r0_step),absorbent_count);
```

Jotta kaikkien absorpenttikombinaatioiden absorptiokertoimien laskenta olisi mahdollista, on ensin luotava taulukko kaikille mahdollisille kombinaatioille. Tämän voisi toteuttaa helposti sisäkkäisillä for-lauseilla, mutta tällöin itse koodia pitäisi muuttaa jos haluaa muuttaa absorpenttikerroksien lukumäärää. Tämä ei kuitenkaan ole tarkoitus, sillä ohjelman on oltava käyttöliittymältään yksinkertainen ja helppo. Tähän tarkoitukseen tehtiin funktio `variations`, jolle syötetään ominaisvirtausvastukset ja absorpenttikerroksien lukumäärä. Funktio palauttaa $m \cdot n$ taulukon, jossa m on eri absorpenttikerroskombinaatioiden määrä ja n on absorpenttikerroksien määrä. On huomattava, että ensimmäinen arvo taulukossa kaikille kerroksille on 0. Vaikka usein paras tulos saadaan, kun käytetään absorpentteja [36], on olemassa joitain tilanteita, jossa ilmaväli on tehokkaampi. Tämän takia on suositeltavaa, että jos ohjelman optimoitu rakenne sisältää yhden tai useamman reikä-resonaattorin, sen taakse laitetaan kuviteltu absorpentti. Tällöin ohjelma laskee tuloksen sekä ilmavälillä, että sen paksuisella absorpentilla. Matlab-ohjelma `variations` on esitetty liitteessä 5.

```
for l = 1:length(tiedot)
    [absc,R,Za] = abscoeff(constr,Di,tiedot(l,:),d,t,rp,p,f,Zk,theta);
    integraali = 0;
    for Z = 2:(n)
        integraali = integraali + absc(Z)*absc(Z)*((-log(Z)+log(n))/log(n));
    end
    tiedot(l,absorbent_count+1) = integraali;
end
```

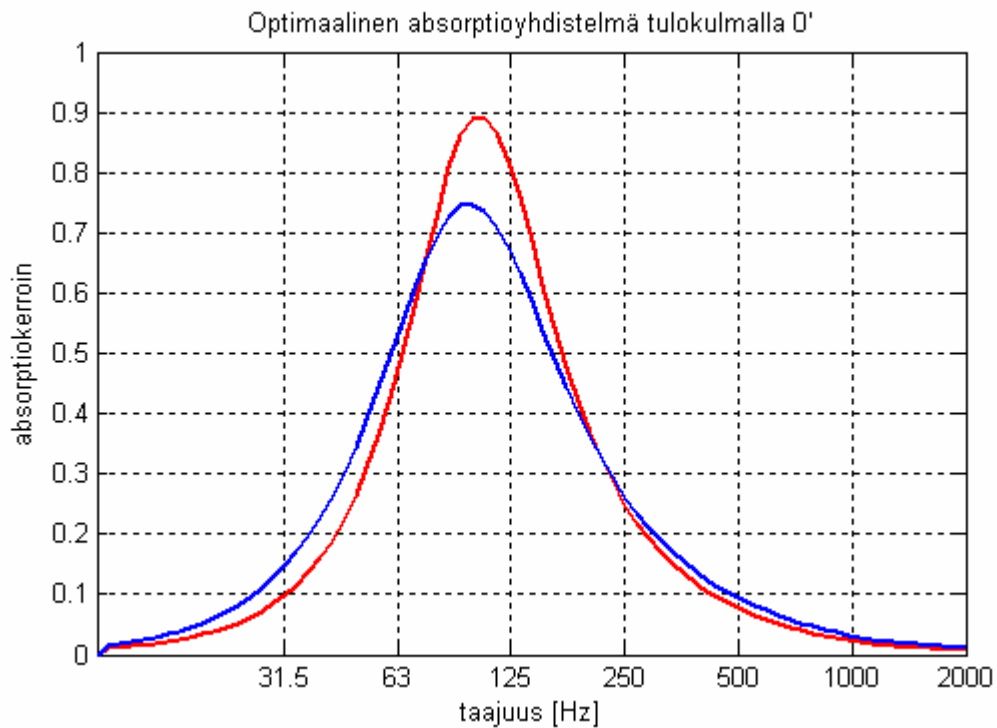
Algoritmi itse absorptiokertoimen laskentaan on yksinkertainen, ja samalla lasketaan käyrän integraalin laatuanalyysiä varten. Integraali painotetaan sekä taajuuden että neliöllisesti amplitudin mukaan kuten reikäresonaattorin optimointiohjelmassa.

5.5. Pohdinnat

Reikäresonaattorin optimointi tuottaa hyviä absorptiokäyriä verrattuna tavallisiin suunniteltuihin reikäresonaattoreihin. Referensseissä reikäresonaattoreiden mitat ovat lähes poikkeuksetta pyöristettyjä kokonaislukuja ja siten eivät usein ole optimaalisia. Mielenkiintoista on, että alan kirjallisuudessa tai julkaisuissa ei ole julkaistu kaavoja tai diagrammeja reikäresonaattoreiden optimoimiseksi. Tämä voi osaltaan johtua siitä, että optimointikaavan johtaminen voi olla varsin työlästä ja vaikeaa. Lisäksi kaavoja olisi luultavasti useampia, joten niiden käyttäminen optimointiin olisi varsin työlästä ja hankalaa.

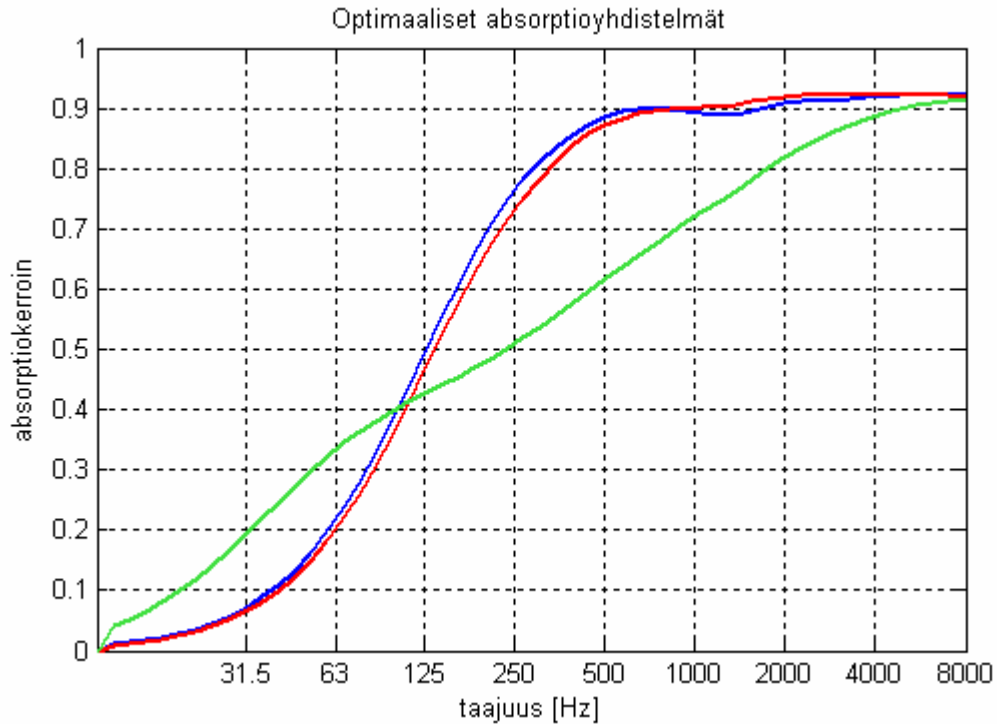
Molemmissa optimointiohjelmissa on tärkeää, että laskettuja absorptiokäyriä painotetaan asianmukaisella tavalla, sillä muuten parhaimman absorptiokertoimen omaavaa yhdistelmää ei todennäköisesti löydetä pelkkiä integraaleja tarkastelemalla. Kuvassa 5.1 on esitetty esimerkki mitä vaihtoehtoja reikäresonaattorin optimointiohjelma antaa absorptiokäyrän integraalin erilaisilla

painotuksilla.



Kuva 5.1. Parhaimmat absorptiokäyrät eri amplitudipainotuksilla. Sinisellä painottamaton ja punaisella neliöllisesti painotettu absorptiokäyrä.

Absorbenttioptimointiohjelman löytämä ratkaisu on poikkeuksetta parempi kuin tavallisen, yhtenäisen kerroksen absorptiokäyrä. Tämä johtuu siitä, että on tehokkaampaa tehdä absorbenttiyhdistelmä, jonka ensimmäinen ja viimeinen osa ovat ominaisvirtausvastusarvoltaan suuremmat kuin keskiosat. Näiden rakenteiden absorptiosuhteiden ero on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Ero yhtenäisen absorbentin ja erillisistä kerroksista koostuvan absorbenttikerroksien välillä. Sinisellä on 100 mm paksun absorbenttiyhdistelmän absorptiokerroin. Yhdistelmä koostuu neljästä 25 mm paksusta absorbentista. Optimointiohjelman antama optimaalinen tulos on ominaisvirtausvastuksilla $40\,000\text{ Nm/s}^4$, $10\,000\text{ Nm/s}^4$, $10\,000\text{ Nm/s}^4$ ja $10\,000\text{ Nm/s}^4$ päällimmäisestä alimpaan. Sinisellä taas on yhden 100 mm paksun ominaisvirtausvastukseltaan $20\,000\text{ Nm/s}^4$ olevan absorbentin absorptiokerroin. Vihreällä on optimointiohjelman antama huonoin vaihtoehto 100 mm paksun neljästä 25 mm paksusta absorbentista koostuva absorbenttiyhdistelmä. Ominaisvirtausvastukset ovat kaikki $100\,000\text{ Nm/s}^4$.

MATERIAALIMITTAUKSET IMPEDANSSIPUTKELLA

6.1. Johdanto

VTT:llä projektia varten valmistettujen absorbenttien ja reikäresonaattorien akustisten ominaisuuksien mittausta suoritettiin TKK:n Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion impedanssiputkella. Tässä kappaleessa käydään läpi mittausjärjestely mittalaitteasetuksineen. Myös mittaustulokset on esitetty pohdintoineen.

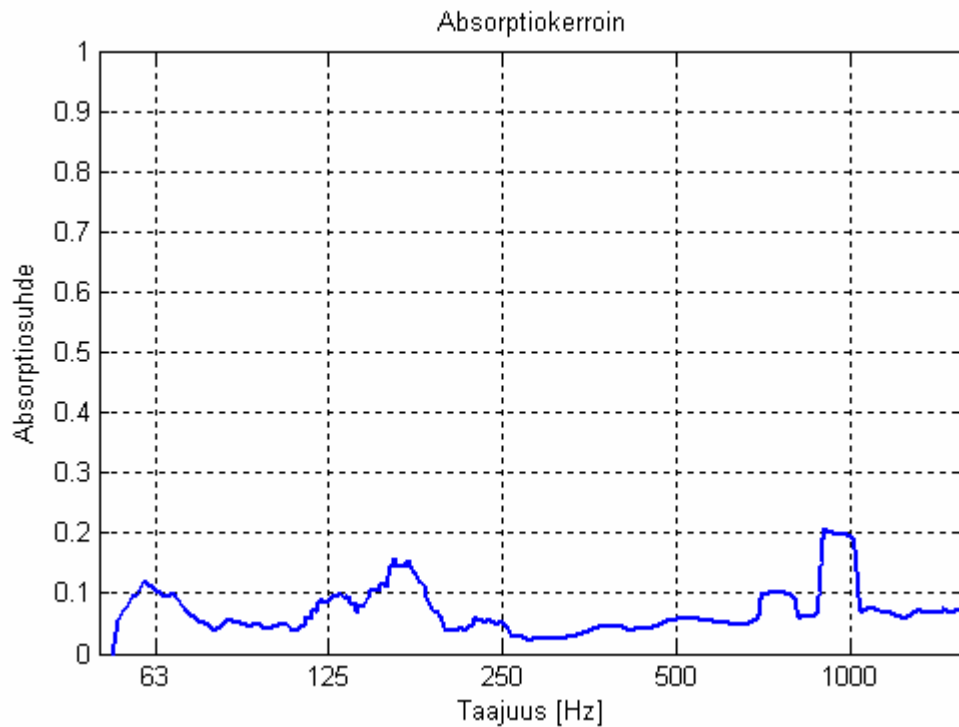
6.2. Teknillisen korkeakoulun impedanssiputki

TKK:n Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion impedanssiputki on Brüel&Kjær:in valmistama malli 4206, ja se on esitetty kuvassa 6.1. Sen sisähalkaisija on 99 mm ja sisäpituus 700 mm pituussäätimen ollessa asennossa "0 mm". Sisäpituudeksi tulee 900 mm pituussäätimen ollessa kokonaan ulkona eli asennossa "-200 mm".



Kuva 6.1. TKK:n Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion impedanssiputki [28].

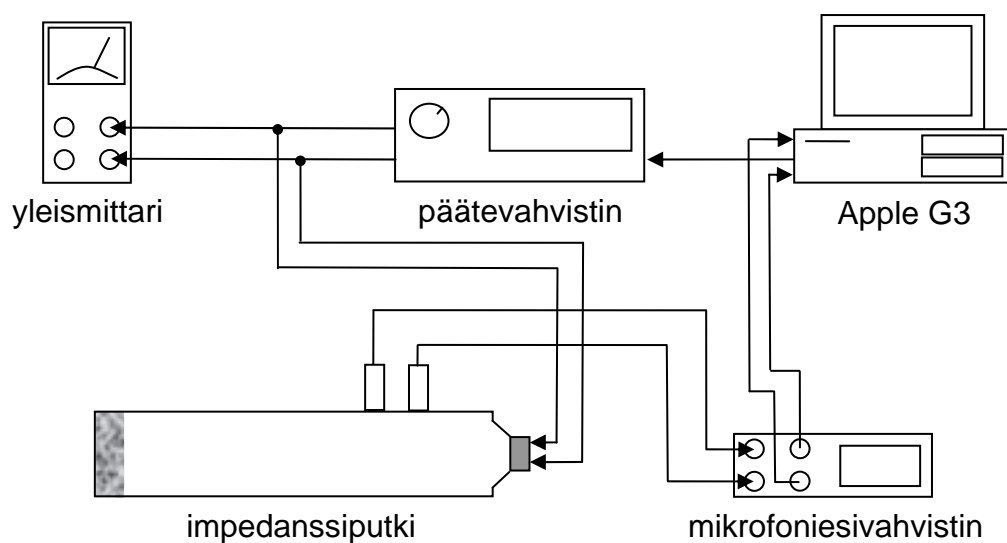
Impedanssiputken toiminnallinen ylärajataajuus saadaan kaavasta 4.22. Sillä on helposti laskettavissa, että impedanssiputken taajuusalueen yläraja on n. 2000 Hz. Tämä ei kuitenkaan vastaa Brüel&Kjær:in ilmoittamaa taajuusaluetta, joka on 50 – 1600 Hz. Ero ylärajataajuudessa on tuntematon, sillä allekirjoittaneen mittaukset osoittavat, että ylärajataajuus on n.2000 Hz. On mahdollista, että käytetty malli 2406 ei ole tarpeeksi ilmatiivis, jolloin painehäviöt suurilla taajuuksilla ovat niin suuret, että ne vääristävät mittaustulosta [37]. Ilmoitettu alarajataajuus johtuu impedanssiputken äänilähteenä toimivasta kaiuttimen toiminnallisesta alarajataajuudesta, sekä impedanssiputken mikrofonien keskinäisestä etäisyydestä. Lisäksi impedanssiputken seinämien äärellinen kovuus ja jäykkyys voidaan jättää mittaustuloksia analysoidessa huomioimatta. Tämä siksi, koska absorbenttien absorptiokertoimet ovat niin pieniä, että putken seinämien aiheuttamat vääristymät vaikuttavat mitattaviin tuloksiin erittäin vähän. Kuvassa 6.2 on esitetty tyhjän impedanssiputken heijastuskerroin, joka on mitattu kappaleessa 6.3 esitetyllä mittajärjestelyllä.



Kuva 6.2. Tyhjän impedanssiputken heijastuskerroin.

6.3. Mittausjärjestelmän kuvaus ja mittalaitteiden asetukset

Mittausjärjestelmä koostui impedanssiputken lisäksi Apple G3 tietokoneesta, Yamaha Mx-70 päätevahvistimesta, Brüel&Kjær Nexus mikrofoniesivahvistimesta sekä Fluke 45 dual display multimeter yleismittarista ja se on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3. Mittausjärjestelmä.

Herätesignaali tuotetaan Apple G3 tietokoneella kappaleessa 4.5.4 kuvatulla Quicksig ohjelmalla, josta se viedään linjatasoisena Yamaha MX-70 päätevahvistimelle. Tästä se puolestaan viedään eteenpäin vahvistettuna kaiutintasoisena impedanssiputken kaiuttimelle. Kaiutintasoista herätesignaalia mittaa Fluke 45 Dual Display Multimeter –yleismittari, jonka avulla signaalitaso säädettiin n. 0.3 volttiin. Impedanssiputkesta vietiin molemmat kondensaattorimikrofonit Brüel&Kjær Nexus mikrofoniesivahvistimelle ja siitä eteenpäin linjatasoisena takaisin Apple G3 tietokoneelle. Mikrofoniesivahvistimen herkkyys säädettiin arvolle 1 mV/Pa ja taajuusalueeksi 10 – 10000 Hz. Herkkyys säädettiin siten, että se saatiin mahdollisimman suureksi ilman, että signaali leikkautui Apple G3:n äänikortissa.

6.4. Absorbenttimateriaalien ja resonaattorien putkimittaukset

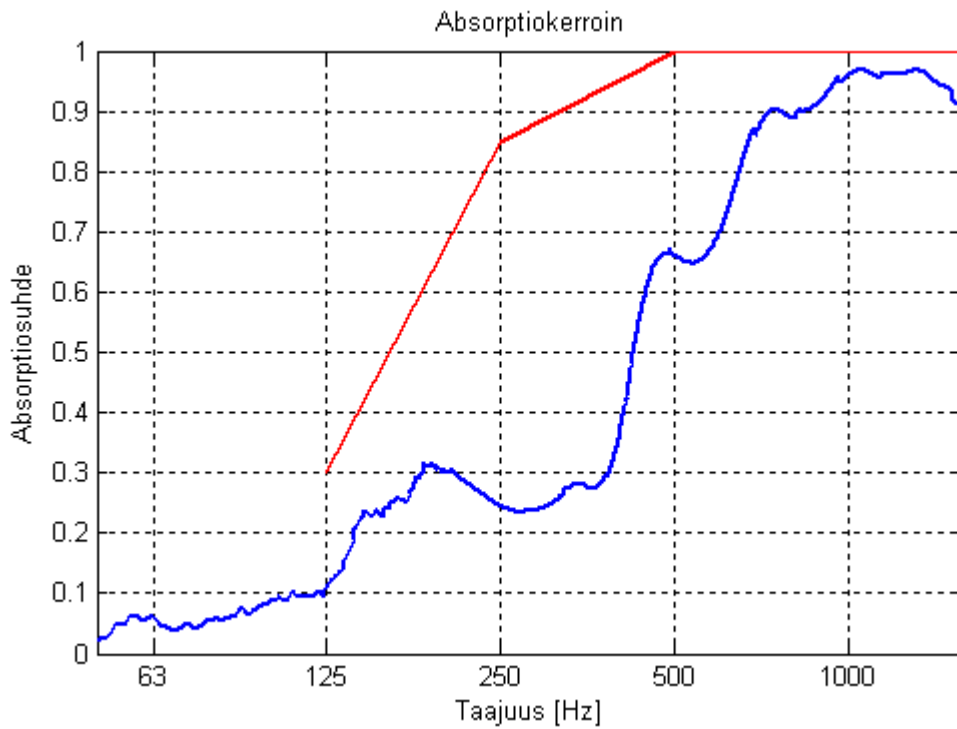
Kuten kappaleessa 2.1 todettiin, ominaisvirtausvastus ja solujen avoimuus vaikuttavat eniten huokoisen materiaalin akustisiin ominaisuuksiin. Projektia ja diplomityötä varten valmistetuista näytteistä ominaisvirtausvastusta ei tiedetty, vaan ne jouduttiin erikseen mittaamaan. Allekirjoittaneen impedanssiputkimittauksien tarkoituksena oli todentaa optimointiohjelman absorptiokäyrien korreloiminen mittaustulosten kanssa, sekä mitattavan materiaalin tai materiaaliyhdistelmän akustisten ominaisuuksien kartoittaminen ”Akustokuitukomposiitti”-projektia varten.

6.4.1. Lasikuituvilla

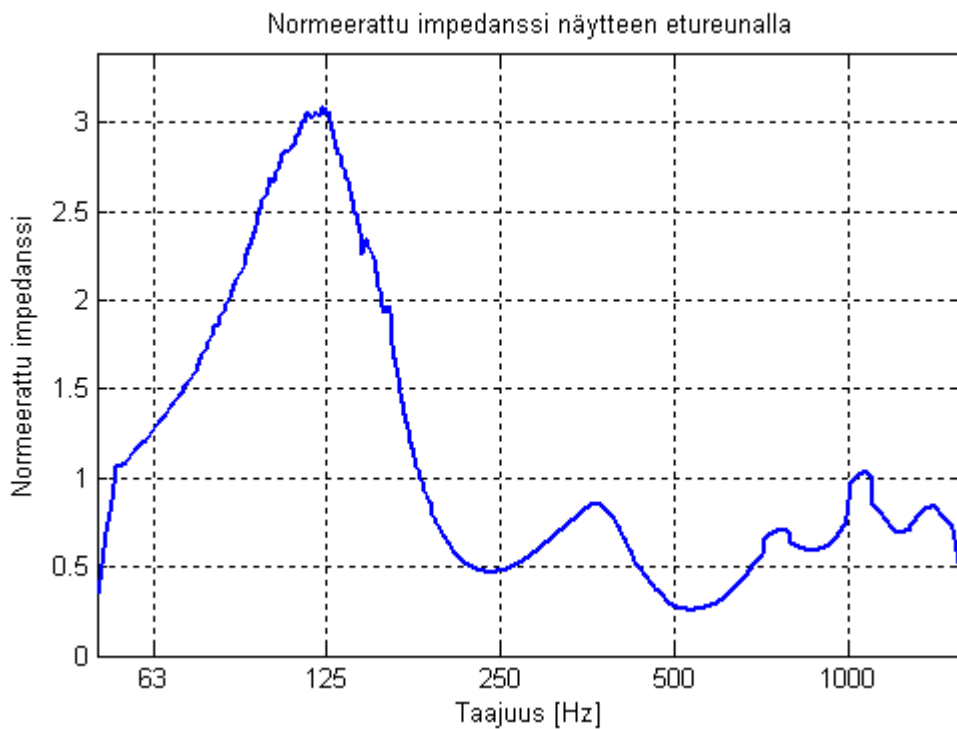
Lasikuituvillanäytteet hankittiin diplomityötä varten referenssiksi, sillä sen absorptiokäyrä oli yleisesti saatavilla valmistajan sivuilla. Referenssimateriaaliksi valittiin 50 mm paksuista Ecophonin Master A/Alpha akustointilevyä. Kuvassa 6.4 on esitetty levyn valmistajan ilmoittama sekä mitattu absorptiokerroin.

Projektissa mitatun ja valmistajan antaman absorptiosuhteen ero johtuu pääosin impedanssiputken rajallisesta mittauskulmasta. Valmistajan antama mittaustulos on peräisin VTT:llä suoritetusta mittauksesta, joka on tehty diffuusissa kentässä kaiuntahuoneessa. Täten sitä ei voi suoraan verrata impedanssiputken tasoaltomittaukseen, mutta siitä voidaan silti päätellä miltä impedanssiputkimittauksissa saadut absorptiokertoimet näyttävät diffuusissa kentässä. Absorptiosuhde sinänsä on melko tyypillinen äänen vaimennukseen tarkoitetuille huokoisille materiaaleille, lukuun ottamatta n. 140 – 230 Hz:n korostusta. Mittausero johtuu luultavasti mitatun levyn pinnan kipsipinnan mikroperforoinnista, joka valmistajan mukaan parantaa levyn absorptiosuhdetta pienillä taajuuksilla.

Kuvassa 6.5 on esitetty saman levyn normeerattu impedanssi. Kuvaaja sinänsä on tyypillinen huokoisille materiaaleille, korostuma n. 120 Hz:n kohdalla kertoo lähinnä mitattavan levyn akustisista rajoista. Toisin sanoen, jos levyn absorptiosuhde 120 Hz taajuusalueella olisi merkittävästi suurempi, olisi normeeratun impedanssin piikki samassa kohdassa merkittävästi pienempi.



Kuva 6.4. Ecophon Master A/Alpha akustointilevyn valmistajan annettu absorptiokerroin kuvassa punaisella. Sinisellä taas on levyn mitattu absorptiokerroin.



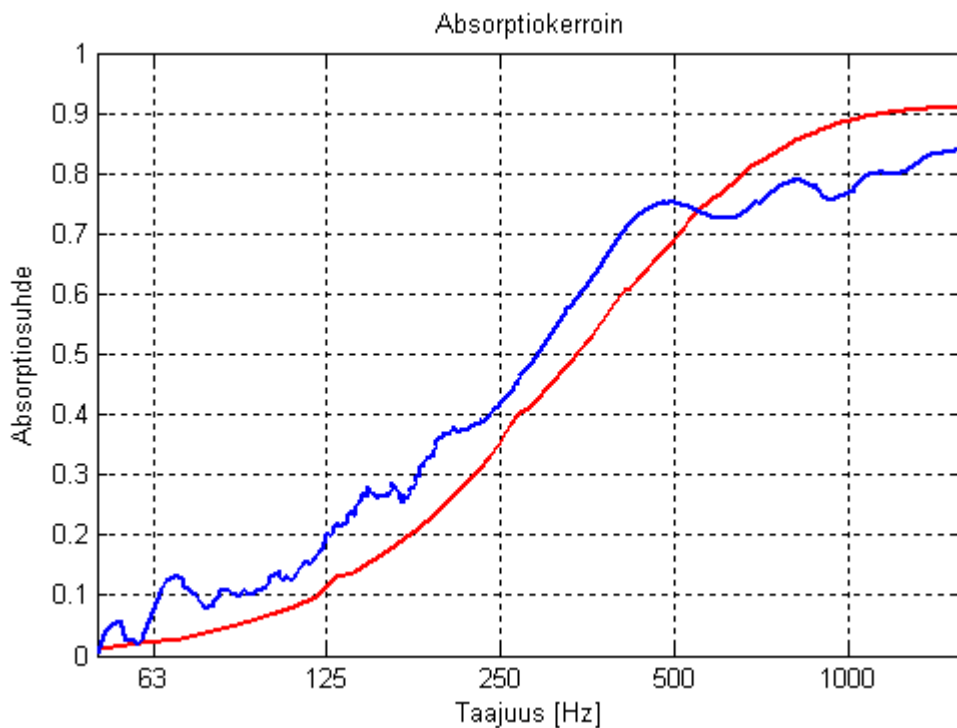
Kuva 6.5. Ecophon Master A/Alpha akustointilevyn mitattu normeerattu impedanssi.

6.4.2. Puukuitu ja pellava

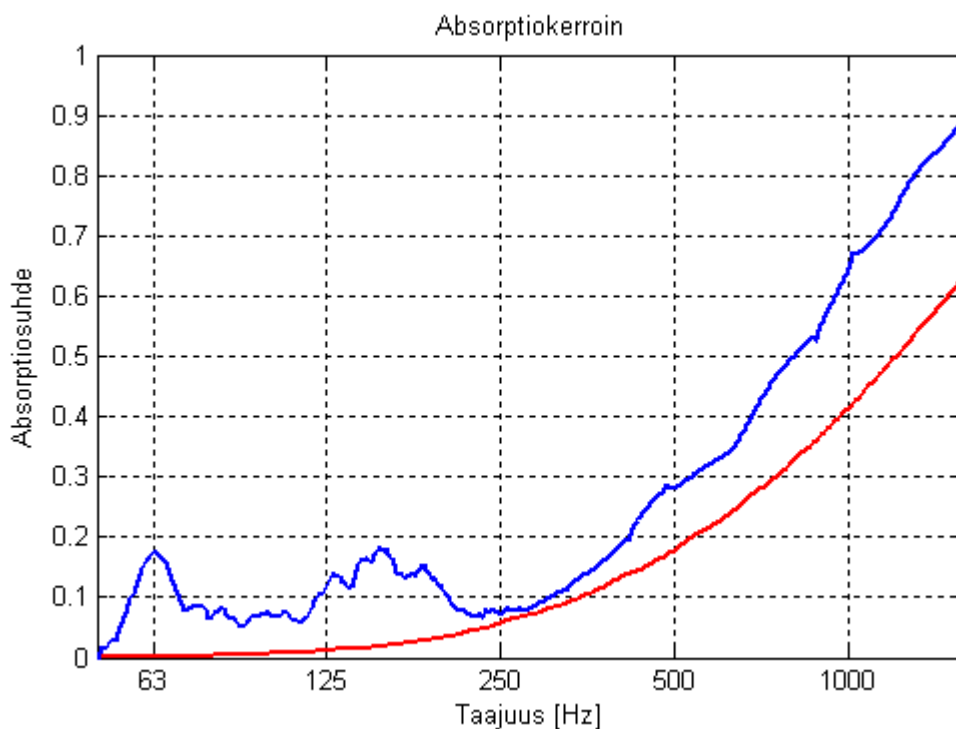
Mitatut puukuitu- ja pellavanäytteet valmistettiin VTT:llä märkäpuristusmenetelmällä. Tuotekehitystä ei tässä vaiheessa oltu vielä suoritettu, ja varsinkin puukuitunäytteet olivat hauraita käsitellä.

Kuvassa 6.6 on esitetty 40mm paksun, tiheydeltään 94 kg/m^3 karkean puukuitunäytteen absorptiosuhde, ja kuvassa 6.7 on pellavanäytteen absorptiosuhde. Kuvista nähdään, että mittaustulokset korreloivat hyvin laskentaohjelman antaman teoreettisen tuloksen kanssa sekä puukuitu- että pellavanäytteiden kanssa. Lisäksi kuvista voi päätellä, että materiaalit omaavat hyvät akustiset ominaisuudet. Mitattavia näytteitä voitaisiin siten käyttää yhdessä reikäresonaattoreiden kanssa edustamaan absorbenttejä, joiden ominaisvirtausvastus on 10000 Nm/s^4 ja 30000 Nm/s^4 . Mittauksia suoritettiin myös muilla absorbenttinäytteiden paksuuksilla, ja mittaustulokset olivat johdonmukaisia verrattuna kuvan 6.6 ja 6.7 tuloksiin.

Ainoana huomioitavana seikkana voidaan mainita, että paksuuden kasvattaminen ei kasvata merkittävästi absorptiosuhdetta suurilla taajuuksilla. Pienillä taajuuksilla absorptiosuhde luonnollisesti kasvaa, kuten teoriassakin.



Kuva 6.6. 55 mm paksun karkean puukuitunäytteen mitattu absorptiosuhde sinisellä ja teoreettinen punaisella

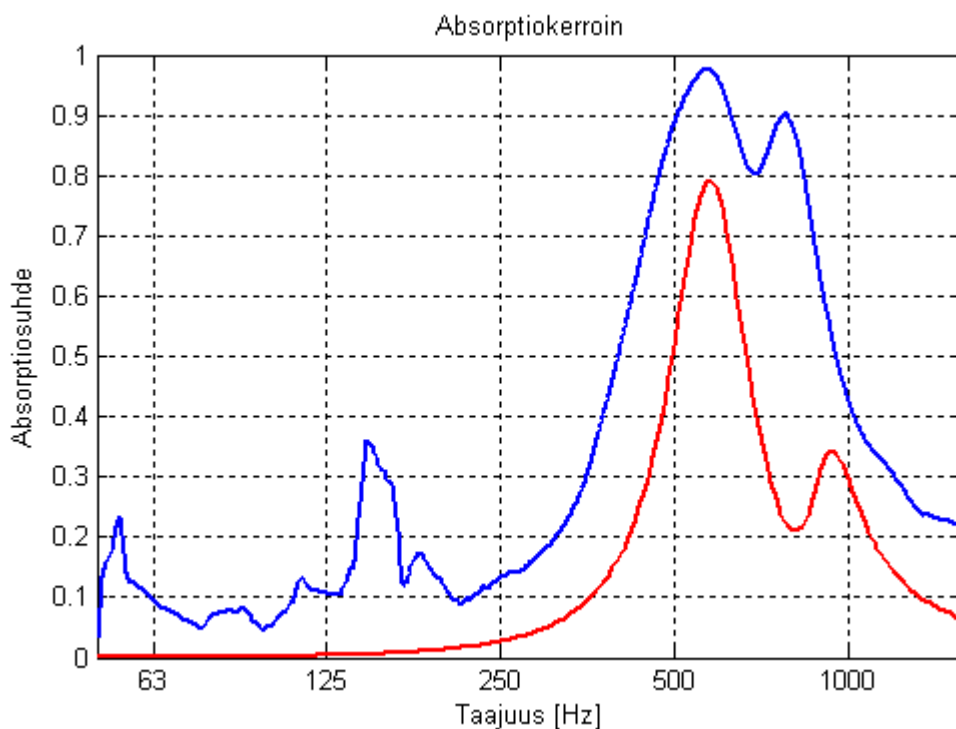


Kuva 6.7. 25 mm paksun pellavanäytteen mitattu absorptiosuhde sinisellä ja teoreettinen punaisella.

6.4.3. Reikäresonaattori

Tutkimuksen kannalta oli olennaisempaa selvittää reikäresonaattorimittausten toimivuutta verrattuna absorptiomittauksista saatuihin tuloksiin, sillä on tärkeää selvittää, miten Seppo Uosukaisen laskentaohjelman ja allekirjoittaneen optimointiohjelman antama teoreettinen tulos korreloi mittaustulosten kanssa. Mittausasettelun kanssa oli oltava tarkkana, sillä huonosti asennettu reikäresonaattori ei ole tiivis reunoiltaan tai voi päästä värähtelemään, jolloin mittaustulokset vääristyvät. Näytteen kiinnitys tapahtuikin kätevästi sinitarraa käyttämällä, jolloin kiinnitys oli ilmatiivis ja erittäin tiukka.

Kuvassa 6.8 on mittaus sekä teoreettinen tulos 2 mm paksusta reikäresonaattorista. Reikäresonaattorin materiaalina käytettiin kuusta, sen paksuus oli 2 mm ja tiheys n. 380 kg/m³. Resonaattori oli viritetty optimointiohjelman antaman tuloksen sekä impedanssiputken dimensionaalisten rajoitusten mukaan, jolloin sen reikien halkaisijaksi saatiin 1 mm ja perforaatioasteeksi 1.96 % ilmavälin ollessa 40 mm. Näin viritystaajuudeksi saadaan n. 580 Hz ja tämän voi nähdä myös kuvaajassa. N. 780 Hz:n kohdalla oleva resonanssi puolestaan johtuu resonaattorilevyn omasta taivutusvärähtelystä, eli 780Hz on sen taivutusvärähtelyn alimman ominaisuuden ominaistaajuus. Tämä nähdään myös teoreettisessa tuloksessa, mutta hieman eri kohdassa n. 940 Hz:ssä. Ero voi osittain johtua levyn lasketun ja todellisen tiheyden välisestä erosta.

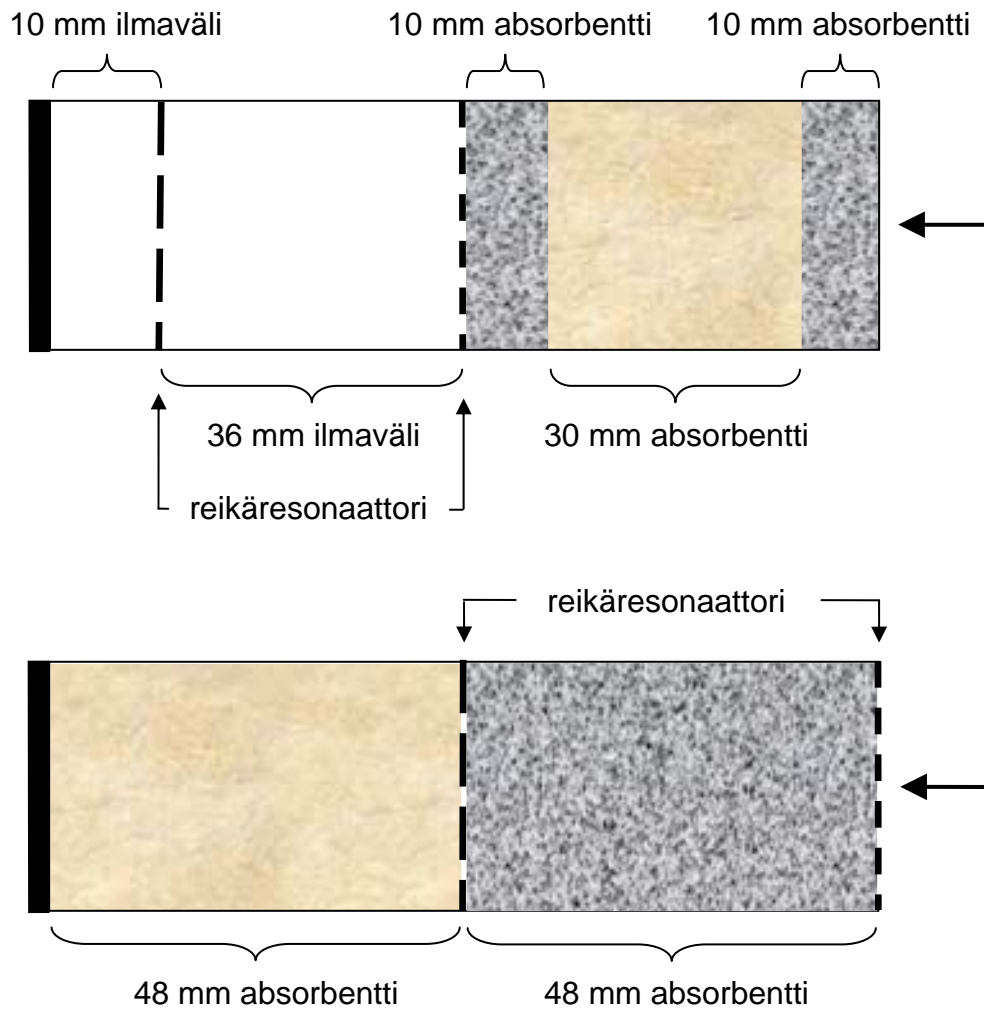


Kuva 6.8. 2 mm paksun reikäresonaattorin mitattu absorptiosuhde sinisellä ja teoreettinen punaisella. Reikäresonaattorin takana oli 40 mm ilmaväli.

6.4.4. Absorbenttien ja reikäresonaattorin yhdistelmät

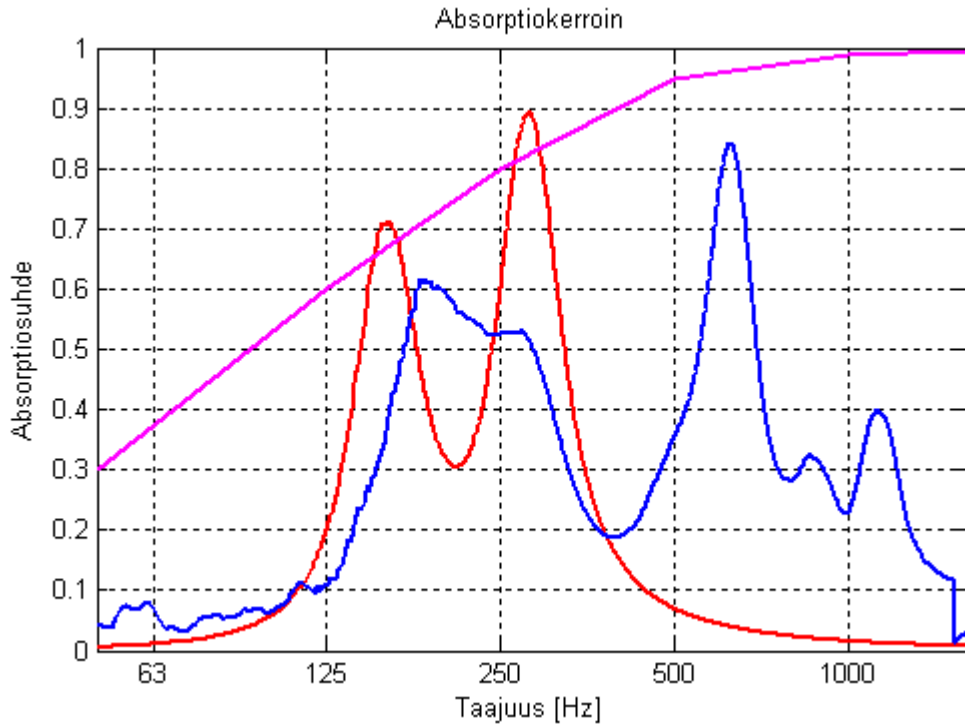
Diplomityön ja ”Akustokuitukomposiitti”-projektin kannalta sekä absorbenttien että reikäresonaattorien mittaustulosten vastaavuus teoreettisiin tuloksiin nähdessä tärkeintä. Näiden materiaalien erilliset mittaukset osoittivat, kuinka teoria ja mittaustulokset pitivät paikkansa, joten hyviä tuloksia on odotettavissa myös rakennemittauksista.

Ennen mittauksia projektissa oli päätetty käyttää kahta erilaista rakennetta, joista toinen olisi mahdollisimman laajakaistainen vaimentaen siten myös suuria taajuuksia, ja toinen optimoitu puheäänien vaimennukseen eli n. 100 – 600 Hz:n alueelle. Molempien rakenteiden paksuuksien päätettiin olevan 100 mm. Laajakaistaista versiota suunniteltaessa huomioitiin myös projektin alussa asetettu tavoitekäyrä absorptiosuhteelle. Itse optimaalinen absorbenttielementtien rakenne oli selvä ja se on esitetty kuvassa 6.9.

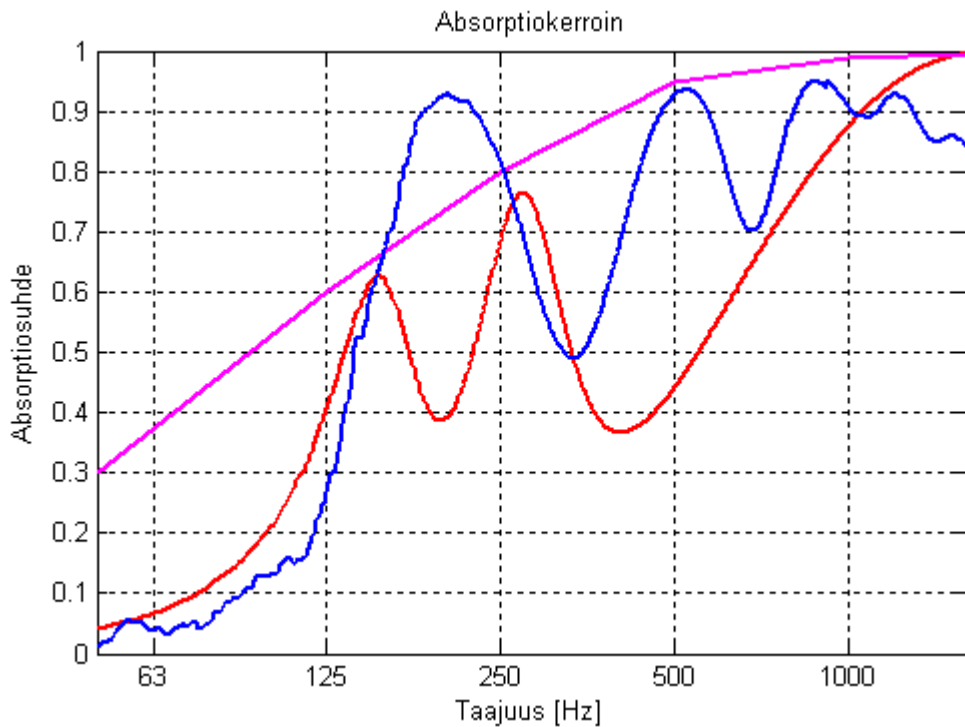


Kuva 6.9. Ylhäällä laajakaista-absorbentti ja alhaalla puhekaista-absorbentti kerrosrakente.

Koska laajakaista-absorbentti rakenteessa on kaksoisreikäresonaattori, mittaukset suoritettiin kahdessa osassa; erikseen päällimmäisen absorbentti kanssa ja ilman absorbenttia. Tämä siksi, että todennettaisiin mittausten ja teorian välinen vastaavuus. Kuvassa 6.10 on esitetty laajakaista-absorbentti mittaustulos ilman reikäresonaattorien päällä olevaa absorbenttikerrosta. Kuvassa 6.11 elementti on esitetty kokonaisuudessaan.

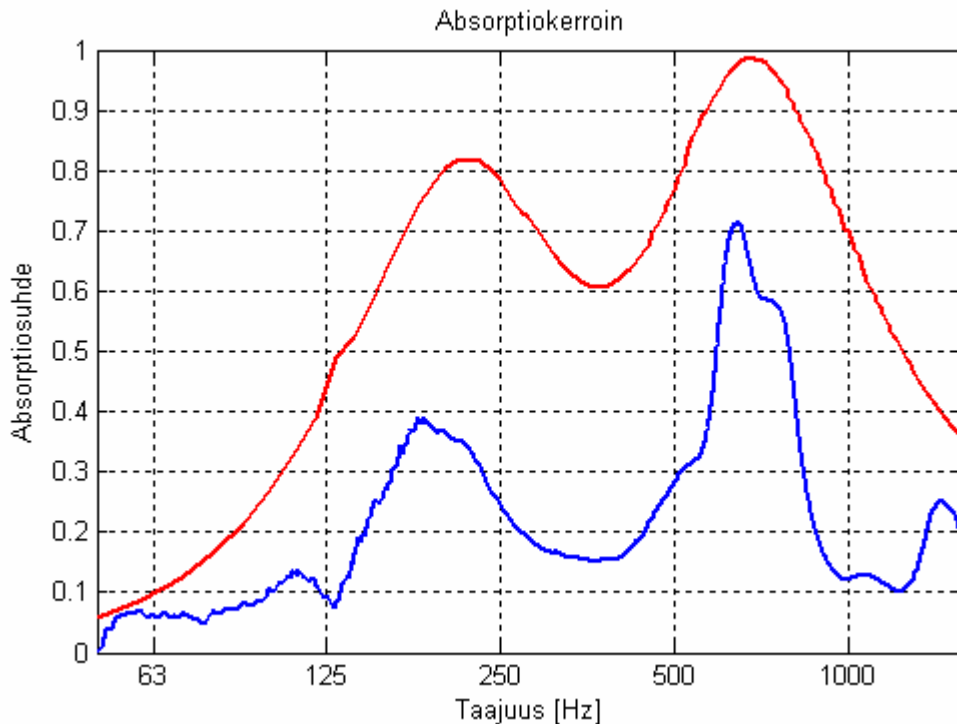


Kuva 6.10. Laajakaista-absorbenttielementin ilman päällistä absorbenttia laskettu absorptiokerroin punaisella ja mitattu sinisellä. Violetti viiva on projektissa asetettu laajakaistaelementin tavoiteabsorptiokerroin.



Kuva 6.11. Laajakaista-absorbenttielementin laskettu absorptiokerroin punaisella ja mitattu sinisellä. Violetti viiva on projektissa asetettu laajakaistaelementin tavoiteabsorptiokerroin.

Kuten kuvasta 6.9 nähdään, myös puhekaista-absorbentissa on kaksoisreikäresonaattori. Tämä koettiin tarpeelliseksi, sillä ainoastaan yksi reikäresonaattori 100 mm ilmatilalla ei ole riittävä hyvän absorptiokertoimen saavuttamiseksi taajuusalueella 100 – 400 Hz. Sekä teoreettiset että mittaustulokset on esitetty kuvassa 6.12.

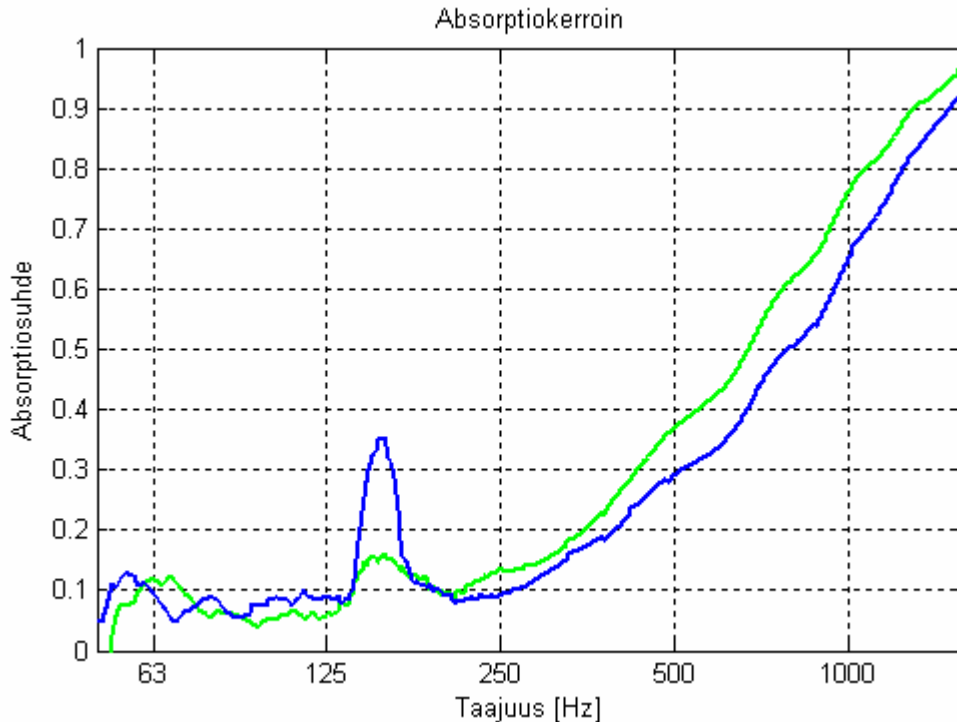


Kuva 6.12. Puhekaista-absorbenttielementin laskettu absorptiokerroin punaisella ja mitattu sinisellä.

6.5. Kommentteja tehdyistä mittauksista

Putkimittaukset TKK:n akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa olivat suoraviivaisia, ja aika kului suurelta osin mittausräätöiden asentamisesta impedanssiputkeen. Näytteen asentamisessa sai olla erityisen huolellinen, sillä resonaattorien ja impedanssiputken reunojen väliin ei saanut jäädä ilmapäliä. Mikäli resonaattorien ja impedanssiputken reunojen väliin jää ilmaa, resonaattorin takana oleva tila ei toimi massana, koska ilma pääsee vuotamaan reunoilta. Tämä aiheuttaa muutoksia resonaattorin toimintaperiaatteessa ja huonontaa mittaustuloksia. Asia ratkaistiin asentamalla resonaattorilevyt sinitarralla, jolloin asennuksesta tuli jäykkä ja ilmatiivis.

Kaiken kaikkiaan mittaustulosten luotettavuutta voidaan pitää hyvänä. Mittauskertoja impedanssiputkimittauksille tuli yhteensä viisi kappaletta, joissa ensimmäisessä kahdessa mitattiin sama puukuitunäyte mittaustulosten yhtenevyyden tarkistamiseksi. Kuvaajasta 6.13 nähdään, että mittaustulokset korreloivat hyvin keskenään.



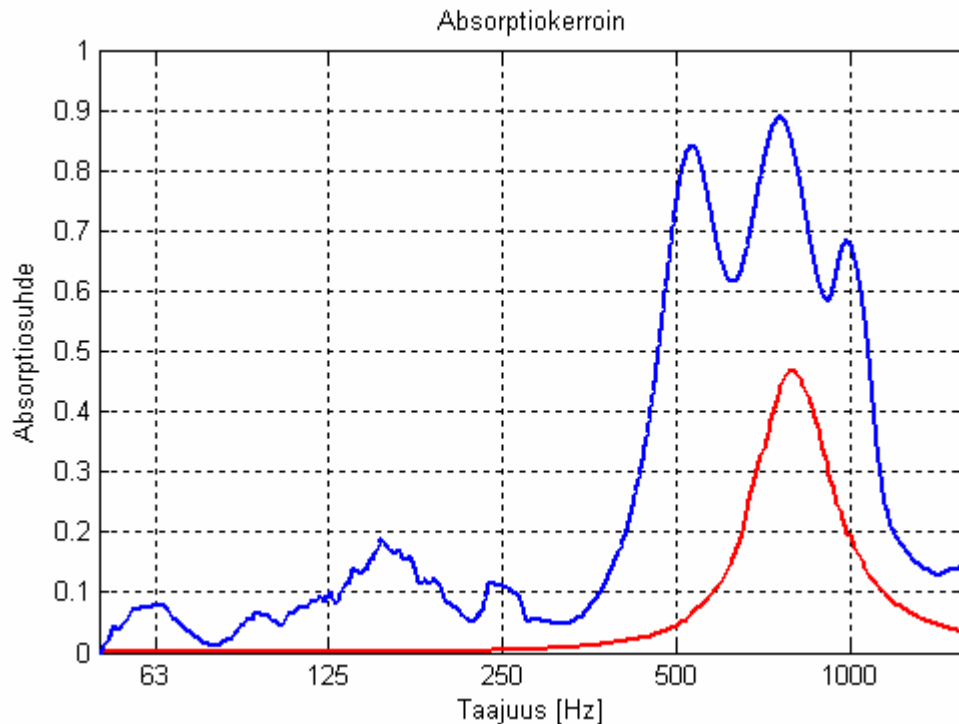
Kuva 6.13. 30 mm pellavanäytteen 20.10.2004 mitattu absorptiokerroin vihreällä ja 12.11.2004 mitattu absorptiokerroin sinisellä.

Eräs rajoite näytteiden suunnittelun kannalta oli impedanssiputken halkaisija. Pienille taajuuksille suunnitellussa reikäresonaattorissa perforaatioaste on hyvin pieni. Tämän toteuttaminen 99 mm halkaisijaltaan olevaa impedanssiputkea varten on vaikeaa, sillä pinta-alaltaan näin pieneen näytteeseen tulisi siten vain muutama reikä. Tämä tarkoittaa sitä, että kun reikien lukumäärä on pieni, perforaatioasteen vaihtoehdot ovat hyvin rajoitetut, sillä jo yksi reikä lisää näytteeseen kasvattaa perforaatioastetta merkittävästi.

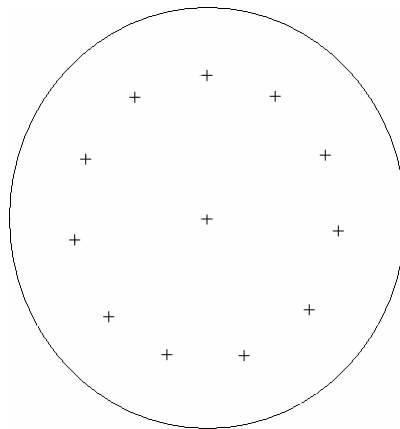
Esimerkiksi 100 Hz keskivaimennustaajuuteen optimoitu reikäresonaattori saa optimointiohjelmalla parametreikseen levyn paksuudeksi $l = 0.2$ mm, reiän säteeksi $r = 0.8$ mm ja perforaatioasteeksi $P = 0.00052854$ ilma- ja syvyyden D ollessa 100 mm. Näillä parametreilla on kuitenkin hankala valmistaa reikäresonaattoria, joten ohjelmaan syötetään alarajoiksi etulevyn paksuudelle 2 mm ja reiän säteelle 1 mm. Näillä parametreilla optimaaliset arvot ovat $l = 2$ mm, reiän säde $r = 1$ mm ja perforaatioaste $P = 0.001395$ ilma- ja syvyyden D ollessa 100 mm. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseisellä perforaatioasteella impedanssiputken sisähalkaisijan kokoiselle näytteelle tulisi 3.42 reikää. Näin ollen reikien lukumäärän on oltava joko 3 tai 4, mutta tämä taas muuttaa perforaatioastetta ja sen kautta myös keskivaimennustaajuutta. Tämä on optimointiohjelman kannalta ristiriitainen tilanne, sillä sen antamat optimaaliset parametrit harvoin sopivat suoraan impedanssiputken kokoiseen näytteeseen.

Lisäksi huomiota vaatii reikien sijoittaminen mitattavassa näytteessä. Reikien on oltava samalla etäisyydellä toisistaan, muuten perforaatioasteita tulee useampi riippuen eri etäisyyksien lukumäärästä. Kuvassa 6.14 on mitattu absorptiokerroin reikäresonaattorirakenteesta, jossa on 12 kappaletta reikiä

säteen ollessa 2 mm. Reiät on porattu levyyn kuvan 6.15 mukaisesti.



Kuva 6.14. 800 Hz:n taajuudelle mitoitettun reikäresonaattorin laskettu absorptiokerroin punaisella ja mitattu sinisellä.



Kuva 6.15. 800 Hz:n taajuudelle mitoitettun reikäresonaattorin reikälevy.

Kuten kuvasta 6.15 voi nähdä, levyn keskellä olevan reiän perforaatioaste on pienempi, sillä etäisyys toisiin reikiin on suurempi kuin uloimpien reikien etäisyys toisiinsa tai levyn ulkoreunaan. Tästä syystä kuvaajassa 6.14 on kaksi resonanssia taajuuksilla 530 Hz ja 750 Hz levyn oman 990 Hz:n ominaistaajuuden lisäksi.

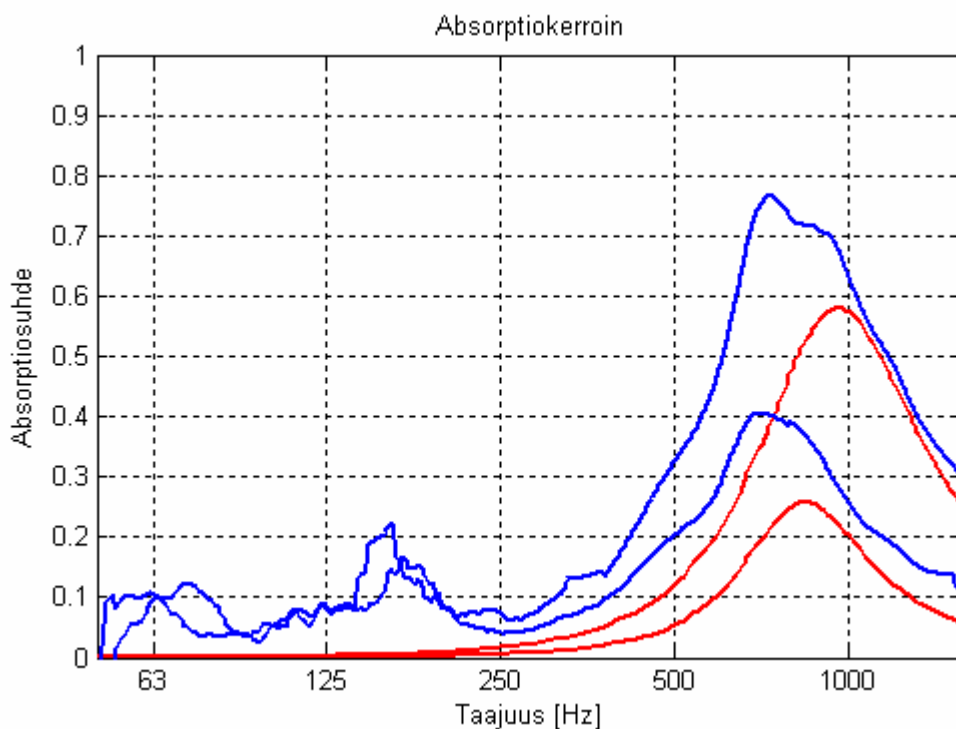
MATLAB-SIMULOINNIN JA MITTAUSTEN VASTAAVUUS

7.1. Johdanto

Eräs "Akustokuitukomposiitti"-projektin kannalta tärkeimpiä asioita on absorpenttielementtien suunnitteluun tarkoitettujen Matlab-ohjelmien laskennallisten tulosten vertailu mittaustuloksiin. Näin on mahdollista analysoida kirjoitettujen ohjelmien kyky estimoida absorbenteista ja reikäresonaattoreista koostuvien elementtien akustiset ominaisuudet. Tässä kappaleessa on pohdittu mittaustulosten vastaavuutta laskennallisiin tuloksiin. Samalla on esitetty ohjelmien parannusehdotuksia.

7.2. Reikäresonaattorirakenne, jossa ei ole absorpenttia ilmvälissä

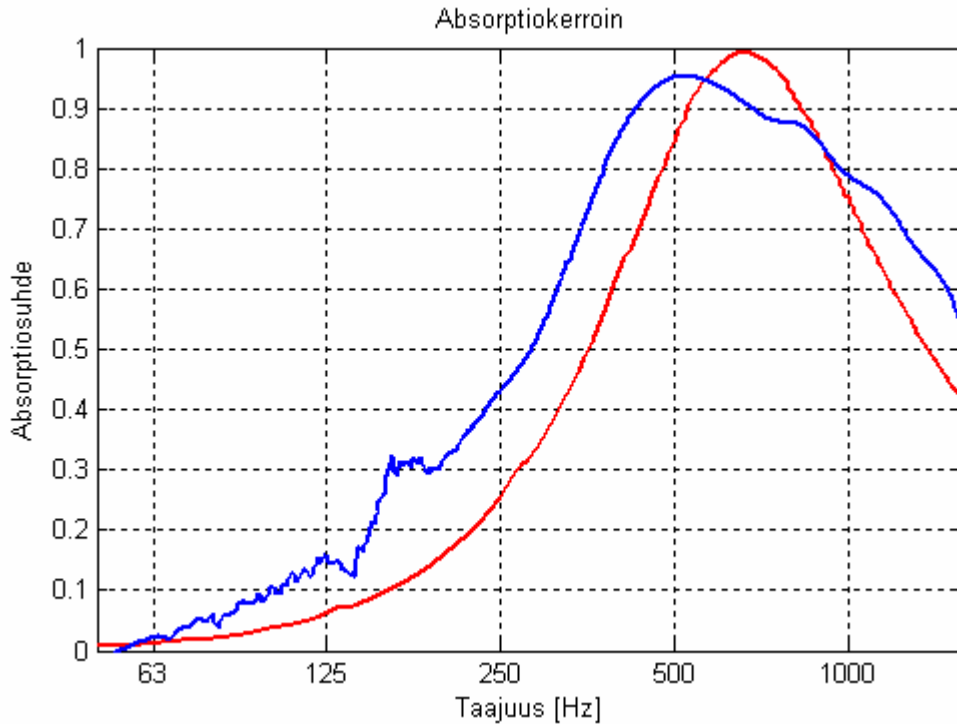
Matlab-simulointien ja mittausten vastaavuuden todentamiseksi allekirjoittanut suunnitteli optimointiohjelmaa käyttäen reikäresonaattoreita kahtena versiona. Toinen oli absorptiosuhteeltaan optimoitu ja toinen absorptiosuhteeltaan merkittävästi huonompi. Mittaamalla nämä rakenteet selvitettiin, onko optimointiohjelman tarjoama reikäresonaattorin paras vaihtoehto merkittävästi parempi kuin tavallinen rakenne. Koska reikien koko vaikuttaa eniten absorptiokertoimeen, pidettiin levyn paksuus ja ilmaraon syvyys kummallakin resonaattorilla samana. Kuvassa 6.16 on esitetty tällaisen koejärjestelyn laskenta- ja mittaustulokset. Sekä laskenta että mittaustuloksista nähdään, että optimaalisen ero tavanomaiseen verrattuna on merkittävä. Optimointiohjelman antama tulos suhteessa tavanomaiseen tulokseen on siten merkittävästi parempi.



Kuva 6.16. 900 Hz:n taajuudelle mitoitettujen reikäresonaattorien lasketut sekä mitatut absorptiokertoimet. Ylin punainen käyrä on laskettu ja ylempi sininen käyrä mitattu reikäresonaattorin absorptiokerroin, jonka reikien halkaisija on 1 mm. Alin punainen käyrä puolestaan on laskettu ja ylempi sininen käyrä mitattu reikäresonaattorin absorptiokerroin, jonka reikien halkaisija on 4 mm.

7.3. Reikäresonaattorirakenne, jossa on absorpenttia ilmvälissä

Toisessa mittausjärjestelyssä vertailtiin laskenta- ja mittaustulosta reikäresonaattorirakenteelle, jossa on ilmvälissä absorpenttia. Kuvassa 6.17 on tällaisen rakenteen laskettu sekä mitattu absorptiokerroin. Huomion arvoinen ilmiö on, että reiän koko vaikuttaa vaimennettavan kaistan leveyteen ja huippuvaimennukseen hyvin vähän. Tämä on erikoista, sillä reikäresonaattorirakenne on hyvin riippuvainen reiän koosta, jos sen ilmatilassa ei ole absorpenttia. Tämän voi nähdä myös kuvasta 6.16. Ilmiö voimistuu 500 Hz:n alemmilla taajuuksilla, jolloin optimaalinen lopputulos saadaan optimointiohjelman mukaan aina mahdollisimman suurella reiän koolla.

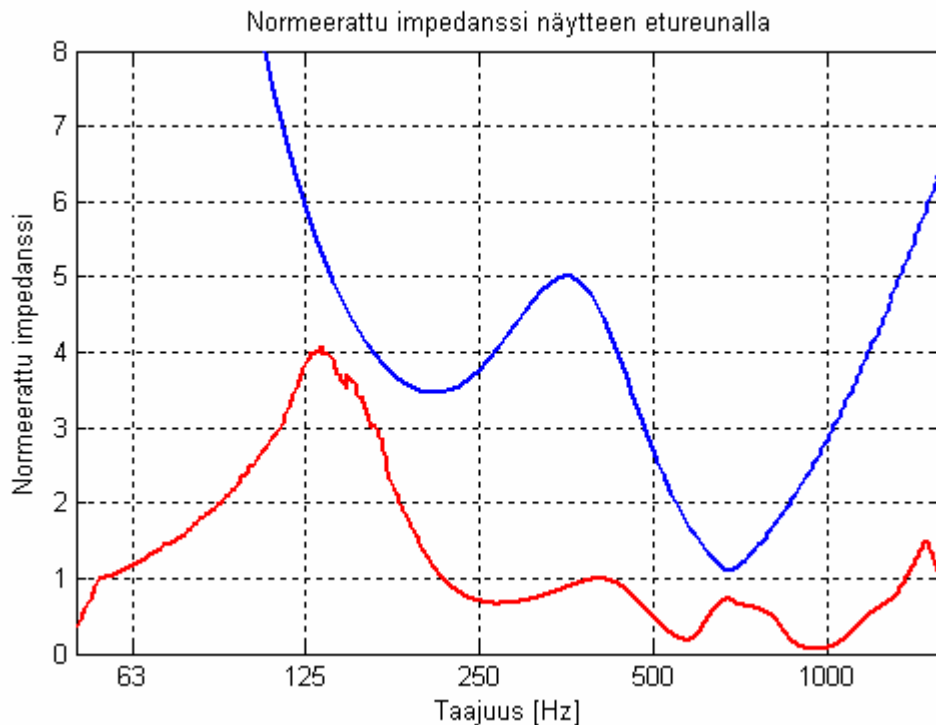


Kuva 6.17. 800 Hz:n taajuudelle mitoitetun reikäresonaattorin laskettu absorptiokerroin punaisella ja mitattu sinisellä. Resonaattorin reikien säde on 2 mm ja 48 mm syvässä ilmapälissä on 40 mm absorbenttia.

7.4. Laaja- ja puhekaista-absorbentit

Kuvassa 6.11 esitetystä laajakaista-absorbentin laskenta- ja mittaustuloksesta nähdään myös reikäresonaattorien etulevyjen edessä olevien absorbenttien vaikutus voimakkaana absorptiokertoimen huippuna n. 200 Hz:n taajuudella. Suunniteltaessa ko. rakennetta absorptiokertoimen ei oletettu kasvavan näin paljon. Ilmiötä olisi voinut hyödyntää suunnittelemalla reikäresonaattorit siten, että niiden maksimivaimennus on pieni, mutta vaimennettava taajuuskaista hyvin suuri. Tällöin pieniä taajuuksia olisi voitu vaimentaa tehokkaammin.

Puhekaista-absorbentin mittaustulos poikkeaa selvästi laskennallisesta tuloksesta, kuten kuvasta 6.12 voi nähdä. Tämän johtuu todennäköisesti osittain siitä, ettei Seppo Uosukaisen ohjelmassa oteta reikien keskinäisvaikutusta riittävän hyvin huomioon. Resonaattorin toimintaa voi myös tarkastella normeeratusta impedanssista näytteen etureunalla. Normeeratun impedanssin poiketessa arvosta 1 ei absorptiokerroin voi olla enintään 1, kun ääni saapuu resonaattoriin suoralla tulokulmalla resonaattoriin nähden. Puhekaista-absorbentin normeerattu impedanssi on esitetty kuvassa 6.18. Tästä nähdään, että laskennallinen tulos poikkeaa selvästi teoreettisesta. Tästä huolimatta puhekaista-absorbentin tulisi toimia paremmin kuin mittauksista saaduissa tuloksissa, sillä sen mitattu normeerattu impedanssi on 1 taajuuksilla 210 Hz ja 400 Hz.



Kuva 6.18. Puhekaista-absorbenttiin laskettu normeerattu impedanssi näytteen etureunalla punaisella ja mitattu sinisellä.

7.5. Pohdinnat

Seppo Uosukaisen kirjoittama Matlab-ohjelma on arvokas työkalu materiaalien akustisen käyttäytymisen teoreettiseen mallinnukseen. Sen antamat laskentatulokset korreloivat taajuuden suhteen mittaustulosten kanssa useissa tapauksissa, kuten kuvista 6.8, 6.12, 6.14, 6.16 ja 6.17 käy ilmi.

Mittaustulokset eivät korreloi absoluuttisesti laskentatulosten kanssa taajuuden suhteen kovin hyvin, koska allekirjoittaneen optimointiohjelmassa käytetään perforaatioasteen laskennassa kaavaa 5.1, joka puolestaan on muokattu kaavasta 3.4. Tämä kaava on kuitenkin vain likiarvokaava, jossa ilmavälin oletetaan olevan puhtaasti kapasitiivinen. Tämä pätee kuitenkin vain tapauksissa, joissa ilmavälin syvyys on pieni saapuvan äänen aallonpituuteen nähden. Suurilla taajuuksilla näin ei kuitenkaan ole, vaan tällöin ilmaväli toimii jopa induktiivisesti [37]. Asian voi korjata korvaamalla optimointiohjelmassa kaava 5.1 kaavalla 3.9, mutta koska kyseessä on transkendenttinen yhtälö, Matlab ei kykene ratkaisemaan sitä analyttisesti. Halutun juuren voi kuitenkin ratkaista numeerisesti Matlab-komentojen avulla.

Syy, miksi Seppo Uosukaisen laskentaohjelma antaa lähes poikkeuksetta liian pienen absorptiokertoimen, on allekirjoittaneelle tuntematon. Toisaalta absorptiokertoimen taajuusinformaatio on olennaisempi tieto, joten resonaattorirakenteiden suunnittelun kannalta tämä ei ole merkittävä ongelma.

Jos tarkastellaan levy- sekä absorbenttioptimointiohjelmiä niiden tehokkuus- ja joustavuusnäkökulmasta, niissä ilmenee osittain puutteita. Levy- ja

absorbenttiooptimien tehokkuus ei ole optimissaan, sillä laskennassa käytetään lineaarista taajuusresoluutiota logaritmisen taajuusresoluution sijaan.

Kun suurin laskettava taajuus on 2000 Hz tai suurempi, laskentateho heikkenee huomattavasti, mikä johtuu laskentataajuuksien suuresta määrästä. Esimerkiksi 10 Hz:n taajuusresoluutiolla suurimman taajuuden ollessa 8000 Hz laskettavia taajuuksia tulee 800. Logaritmisen taajuuskaalan käytöllä saadaan laskettavien taajuuksien määräksi vain 63, mikä tarkoittaa n. 12 kertaista tehokkuuden kasvua. Ilmiö kasvaa eksponentiaalisesti suurempia taajuuksia käytettäessä ja esimerkiksi suurimman taajuuden ollessa 20000 Hz tehoero on jo n. 27-kertainen.

Myös ohjelmien joustavuutta voisi parantaa yhdistämällä molemmat optimointiohjelmat yhdeksi kokonaisuudeksi, joka laskee koko elementin optimaalisen absorptiokertoimen. Lisäksi levyresonaattorin optimointiohjelma laskee ainoastaan 100 eri vaihtoehtoa annettujen minimidimensioiden pohjalta, ja tämä ei välttämättä aina riitä optimaalisen parametrien löytämiseksi. Ohjelma olisi hyvä muuttaa optimoimaan myös kaksoisresonaattorirakenteita, mutta tämä edellyttäisi uusien kaavojen käyttöä laskennassa. Kaavat kaksoisresonaattorien absorptiokertoimen laskemiseksi löytyvät lähteestä [21].

Osa edellä mainituista parannusehdotuksista on projektin edetessä lisätty ohjelmiin. Levyresonaattori- ja absorptio-optimointiohjelmat on yhdistetty, ja optimointiohjelma optimoi nyt koko rakenteen yhdellä kertaa. Lisäksi taajuusresoluutio on muutettu lineaarisesta logaritmiseksi mikä tehostaa ohjelmaa merkittävästi. Määritettävien parametrien alarajojen lisäksi myös ylärajat ovat lisätty ohjelmaan, jolloin optimointialgoritmi laskee kaikki vaihtoehdot halutulla parametrivälillä.

YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä suunnittelussa laajakaista-absorbentissa on lähdetty liikkeelle absorbenttien dimensioista ja materiaalivalinnoista käsin. Paksuudeltaan 100 mm laajakaista-absorbentin resonaattoriksi on tehokkainta valita reikäresonaattori. Tällöin laajakaista-absorbentin rakenne koostuu 50 mm paksusta kaksoisreikäresonaattorista ja sen päällä olevasta 50 mm kerroksesta absorbenttia. Absorbenttien akustisesti tärkeimmät ominaisuudet ovat ominaisvirtausvastus sekä kuitujen monimutkainen rakenne.

Reikäresonaattorissa reikien koko ja ilmvälin syvyys ovat tärkeimmät parametrit. Näytteet valmistettiin VTT:llä ja niiden akustiset parametrit mitattiin TKK:n akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion impedanssiputkella heidän tiloissaan. Absorbenttien ominaisvirtausvastukset mitattiin VTT:n tutkimushalli 1:ssä ja mittaukset suoritti teknikko Mikko Myllymäki.

Allekirjoittaneen absorbenttien ja reikäresonaattorien Matlabilla tehty optimointiohjelma perustuu tohtori Seppo Uosukaisen kehittämään laskentaohjelmaan, joka mallintaa absorbenttielementtien akustista käyttäytymistä. Optimointiohjelmaan syötetään optimoitavan rakenteen elementit sekä parametrit joiden pohjalta ohjelma laskee parhaan mahdollisen vaihtoehdon absorptiotehokkuuden näkökulmasta. Koska absorbenttielementtien optimoiminen teoreettisten kaavojen kautta on varsin hankalaa ja työlästä, optimointiohjelma on oiva työkalu absorbenttirakenteita suunniteltaessa.

Seppo Uosukaisen sekä allekirjoittaneen ohjelmien teoreettiset tulokset todennettiin mittaustuloksien kanssa mittaamalla näytteiden akustisia arvoja impedanssiputkella. Impedanssiputkella mitattiin huokoisia materiaaleja, reikäresonaattoreita sekä optimointiohjelmalla suunnitellut laajakaista- ja puhekaista-absorbentit. Mittaukset osoittivat, että huokoisten materiaalien akustiset arvot ovat yhteneviä Seppo Uosukaisen ohjelman antamien teoreettisten tulosten kanssa. Reikäresonaattorien tapauksessa ohjelma mallintaa taajuuskäyttäytymistä hyvin, mutta absorptiokertoimen amplitudi jää useissa tapauksissa pienemmäksi kuin mittaustuloksissa. Toisaalta tapauksessa, jossa reikäresonaattorin ilmvälissä on absorbenttia, tilanne on päinvastainen. Impedanssiputkella saatuja mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina.

Optimointiohjelmalla suunniteltujen laajakaista- sekä puhekaista-absorbenttien mittaustulokset olivat yllättäviä. Laajakaista-absorbentin absorptiokäyrä oli laskettua parempi, sillä reikäresonaattorien absorptiotehokkuus oli huomattavasti teoriaa parempi. Tämä on etu projektin kannalta, sillä esimerkiksi laajakaista-absorbentin tapauksessa vaimennettavaa taajuuskaistaa saadaan

ulotettua pienemmille taajuuksille suunnittelemalla reikäresonaattorirakenne, jonka huippuvaimennus on pienempi mutta vaimennettava taajuuskaista on suuri. Puhekaistaresonaattorin mittaustulokset eivät vastanneet laskentatuloksia, sillä rakenne ei toiminut impedanssiputkessa. Tämä voi johtua impedanssiputken dimensioiden tuomista rajoituksista perforaatioasteeseen, tai pieniperforaatioasteisen reikälevyn puutteellisesta teoreettisesta mallinnuksesta.

”Akustokuitukomposiitti”-projektin pian siirtyessä toiseen vaiheeseen on syytä pohtia suunniteltujen absorbenttielementtien potentiaalisia käyttökohteita. Laajakaista-absorbentille tällaisia voisivat olla tehtaasäälitilat, joissa melun kokonaistaso on suuri. Puhekaista-absorbentille sopivia käyttökohteita olisivat opetus- ja kokoustilat sekä avokonttorit. Myös suunniteltujen absorbenttien integrointi huonekaluihin voi olla potentiaalinen mahdollisuus. Näin saadaan vaimennettua ylimääräisiä heijastuksia puhetaajuuksilla, jolloin puheen ymmärrettävyys tilassa kasvaa.

Optimoitua reikäresonaattoria itsessään voisi käyttää tiloissa, joissa vaaditaan tehokasta äänenvaimennusta selektiivisillä taajuuskaistoilla. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi tehtaassa, jossa moottori säteilee voimakkaasti ääntä kapealla taajuuskaistalla.

Absorbenttien ja resonaattorien tutkimus- sekä kehitystyö osoittavat, että käytännöllisillä rakennepaksuuksilla on mahdollisuus päästä laajakaistavaimennukseen ja selektiivisillä kaistoilla toimivaan vaimennukseen. Eri tarkoitukseen soveltuvien rakenteiden akustista toimivuutta voidaan siis potentiaalisesti optimoida. Optimointiohjelma on tehokas työkalu resonaattorirakenteiden optimoinnissa, joskin on tarpeellista kehittää ohjelmaa tehokkaammaksi ja joustavammaksi.

LÄHTEET

- [1] Berhault, J.P. 2001. Noise control materials – issues, global situation and trends. Eu-noise 2001, proceedings. Patras. pp. 56-559.
- [2] Ohjelma laskee annetun absorbentista, ilmavälistä tai reikäresonaattorista koostuvasta elementistä sen akustiset ominaisuudet käyttämällä laskennassaan siirtojohtoteoriaa. Äänen tulokulma voi olla mielivaltainen ja se voi olla myös diffuusi.
- [3] Beranek, L., Istvan, L. 1992. Noise and Vibrational Control Engineering – principles and applications. John Wiley & Sons Inc, pp. 204 – 206, 232 – 236.
- [4] Shulz, V. 2004. Modeling of effective material properties for non-wovens: Application in acoustics and two-phase flow. Fraunhofer Institut.
- [5] Ackermann, U., Fuchs, H. V., Rambauser, N. 1988. Sound absorbers of a novel mem-brane construction. Appl. Ac. Vol. 25, pp. 197–215.
- [6] Ackermann, U., Fuchs, H. V. 1989. Noise reduction in an exhaust stack of a papermill. Noise Control Eng. J. Vol. 33, no. 2, pp. 57–60.
- [7] Fuchs, H. V. 2001. Alternative fiberless absorbers – new tools and materials for noise control and acoustic comfort. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 87, pp. 414–422.
- [8] <http://www.pia-alfa.de/en/produkte.htm>
- [9] Chen, W.-H., Lee, F.-C., Chiang, D.-M. 2000. On the acoustic absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates. J. Sound Vib. Vol. 237, no. 2, pp. 337–355.
- [10] Shoshani, Y. Yakubov, Y. 2001. Use of nonwovens of variable porosity as noise control elements. INJ winter 2001. pp. 23 – 28.
- [11] Morse, P. 1948. Vibration and sound. New York: McGraw-Hill. pp.358
- [12] Wassilieff, C. 1996. Sound absorption of Wood-Based materials. Appl. Ac. Vol. 48, No. 4, pp. 339-356.
- [13] Khedari, J. Charoenvai, J. H. 2003. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. Building and Environment 38. pp. 435 – 441.
- [14] Khedari, J. Nankongnab, N. Hirunlabh, J. Teekasap, S. 2004. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian and cononut coir. Building and Environment 39. pp. 59 – 65.
- [15] Nor, M. J., Jamalidin, N., Tamiri, M. T. 2004. A premilinary study of sound absorption using multi-layer coconut coir fibers. University of Kebansaan. Malaysia.

- [16] Fusheng, H. Seiffert, G., Yuyuan, Z., Gibbs, B. 2003. Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam. *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 63, pp. 294-302.
- [17] Neithalath, N. Weiss, J. Olek, C. Acoustic absorption behaviour of fiber reinforced enhanced porosity concrete. Purdue University.
- [18] <http://wiki.ham.fi/Q-arvo>
- [19] Bedout, J. M., Franchek, M. A., Bernhard, R. J., Mongeau, L. 1997. Adaptive-passive noise control with self-tuning Helmholtz resonators. *J. Sound Vib.* Vol. 202, no. 1, pp. 109–123.
- [20] Brouard, B., Allard, J.-F., Bruneau, H., Lauriks, W., Verhaegen, C. 1993. Acoustical impedance and absorption coefficients of porous layers covered by a facing perforated by parallel slits. *Noise Control Eng. J.* Vol. 41, no. 1, pp. 289–297.
- [21] Maa, D.-Y. 1987. Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Eng. J.* Vol. 29, no. 3, pp. 77–84.
- [22] Davern, W. A. 1977. Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers – an experimental study. *Applied acoustics*, Vol. 10, no. 2, pp. 85–112.
- [23] Byrne, K. P. 1980. Calculation of the specific normal impedance of perforated facing - porous backing constructions. *Appl. Ac.* Vol. 13, no. 1, pp. 43–55.
- [24] Fuchs, H. V., Zha, X., Pommerer, M. 2000. Qualifying freefield and reverberation rooms for frequencies below 100 Hz. *Appl. Ac.* Vol. 59, pp. 303–322.
- [25] Uosukainen, S. 2004. Ilmanvaihdon uusia äänenvaimenninratkaisuja ja materiaaleja. VTT rakennusakustiikka–raportit.
- [26] Lahti, T. 1995. Akustinen mittaustekniikka. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelyn laboratorio. Raportti 38.
- [27] Kreyszig, E. 1993. *Advanced engineering mathematics*, 7th ed. Wiley. pp. 286–288.
- [28] Brüel & Kjær. Impedance Tube Kit Model 4206 data sheet. <http://www.bksv.com/pdf/Bp1039.pdf>
- [29] Garai, M. 1992. Measurement of the sound-absorption coefficient *in situ*: the reflection method using periodic pseudorandom sequences of maximum length. *Appl. Ac.* Vol. 39, p. 119 – 139.
- [30] Schroeder, M. R. 1970. Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation. *IEEE Transactions of information theory*. pp. 85 – 89.
- [31] Antsallo P. 1999. Koteloidun kaiuttimen vibroakustiset mittaukset. Diplomityö, TKK. pp. 18 – 19.
- [32] MLSSA – Maximum-Length Sequence System Analyzer, reference

manual, versio 10WI-4. DRA Laboratories. www.mlssa.com.

- [33] Farina, A. 2000. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with swept-sine technique. 108th AES Convention.
- [34] Time selective measurements with a logarithmically swept sine
- [35] Quicksig on TKK Akustiikka laboratorion Matti Karjalaisen, Paavo Alun, ja Tuomas Aaltosaaren CLOS–kielellä kirjoittama oliopohjainen ohjelma.
- [36] Nousiainen, E. Tanttari, J. Monikerrosmateriaalin suurimman absorptiosuhteen hakeminen. VTT julkaisut.
- [37] Perustuu Seppo Uosukaisen kanssa käytyyn keskusteluun

Liite 1

MATLAB-OHJELMA: ABSORPTIOSUHDE

```
% Absorptiosuhteen, heijastussuhteen, normeeratun impedanssin ja
% taajuusvasteen määrittäminen impedanssiputken avulla kaksikanavamenetelmällä.
%
% Lähtötiedot:
% ans = tietue, joka sisältää mittausdatan:
% - ans.signal(N) = N kanavan impulssivaste
% - ans.srate = näytteenottotaajuus [Hz]
% - abs.beg = impulssivasteen aloitusajankohta (viive) [näytettä]
%
% Denis Siponen 10.10.2004

%nollataan muuttujat ja tyhjennetään komentokenttä
%
clear;
clc;

%avataan mittausdata
%
open empty.mat;

%impedanssiputken takaseinälevyn etäisyyslukema [mm]
%
r = 110;

%mitattavan rakenteen paksuus [mm]
%
t = 0;

%mikrofonien välinen etäisyys d [m]
%
d = 0.05;

%mittausdatan luenta
%
h = ans.signal; %luetaan data, tässä muuttujassa on 2 siirtofunktiota
fs = ans.srate; %näytteenottotaajuus
%mittausohjelman lisäämä viive impulssivasteeseen, joka on poistettava signaalinkäsittelystä
%
delay = -ans.beg;
%ala- ja ylärajataajuudet herätesignaalista [Hz].
%
signal_min = 20;
signal_max = 5000;

%ala- ja ylärajataajuudet [Hz]. Nämä määräytyvät impedanssiputken
%spekseistä (tässä tapauksessa B&K 4206)
%
fmin = 50;
fmax = 1600;

%syöttötietojen manipulointia: Adjustoidaan takaseinän etäisyyslukema
```

```

%vastaamaan todellista etäisyyttä mikrofonista 1 näytteen etureunaan.
%
r = (450+r-t)/1000;

%ilmakehän parametrejä:
%
% (Input: lämpötila (C), ilmanpaine (atm))
% c = äänen nopeus
% roo = tiheys
% gamma = adiabaattivakio
% Q = puristuvuus
% Z00 = karakteristinen impedanssi
%
[c,roo,gamma,Q,Z00] = airconstants(20,1);

%FFT, jonka pituus on näytteenottotaajuus. Näin saamme 1Hz taajuusresoluution
%
H1 = (fft(h((delay:length(h)),1),fs));
H2 = (fft(h((delay:length(h)),2),fs));

%mikrofonin 1 ja 2 välinen taajuusvaste
%
H12 = H1./H2;

%kompleksinen heijastuskertoimen ratkaisu mikrofonin 1 kohdalla
%
for A = signal_min:(length(H12)/2)
    k = 2*pi*(A)/c;
    R(A) = (H12(A)-exp(-j*k*d))/(exp(j*k*d)-H12(A));
end

%siirretään heijastuserrointa laskennallisest Smithin karttaa
%hyväksikäyttäen etäisyydelle r
%
for A = signal_min:(length(H12)/2)
    k = 2*pi*(A)/c;
    R2(A) = R(A)*exp(2*j*k*r);
end

%Impedanssi etäisyydellä r (joka on siis impedanssi materiaalin etureunassa
%eli pinnalla). Samalla muutetaan kaikki tulostusskaalan ulkopuolella
%olevat arvot nolaksi, ettei ne sotke automaattista skaalausta kuvaajaa
%tulostettaessa.
%
Z = (1+R2)./(1-R2);
Z(fmax:(length(H12)/2)) = 0;
Z(1:fmin) = 0;

%Lasketaan absorptiokerroin heijastuskertoimesta
%
Y = 1-(abs(R2).^2);

%Lasketaan vaihekerroin
%
theta = angle(R2).*180/pi;

%Ennen absorptiokertoimen keskiarvoistusta poistetaan funktiosta
%negatiiviset arvot, sillä ne sotkevat keskiarvoisuuden.
%
Y(fmin)=0;
for s = (fmin):(fmax-1)

```

```

    if (Y(s+1) < 0)
        Y(s+1) = Y(s);
    end
end

% Keskiarvoistetaan absorptiokerroin
%
Y2 = frequencyaveraging(Y,fmin,fmax,0.93);

% Keskiarvoistetaan heijastuskerroin
%
R2 = frequencyaveraging(abs(R),fmin,fmax,0.93);

% Keskiarvoistetaan impedanssi
%
Z2 = frequencyaveraging(abs(Z),fmin,fmax,0.93);

% Keskiarvoistetun absorptiokertoimen piirtäminen
%
figure(1);
%subplot(2,2,1);
semilogx (Y2,'Color','b','LineWidth',2);
hold on;
grid;
set(gca,'XTick',[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000]);
set(gca,'XMinorTick','off');
set(gca,'XMinorGrid','off');
axis ([fmin fmax 0 1]);
title('Absorptiokerroin');
xlabel('Taajuus [Hz]');
ylabel('Absorptiosuhde');

%Absorptiokertoimen tavoitefunktion piirtäminen
%
hold on;
tavoitefunktio = [0.3 0.85 1 1 1 0.95];
x = [125, 250, 500, 1000, 2000, 4000];
%semilogx(x, tavoitefunktio,'r','LineWidth',2);
hold off;

%Keskiarvoistetun heijastuskertoimen piirtäminen
%
figure(2);
%subplot(2,2,2);
semilogx (R2,'LineWidth',2);
grid;
set(gca,'XTick',[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000]);
set(gca,'XMinorTick','off');
set(gca,'XMinorGrid','off');
axis ([fmin fmax 0 1]);
title('Heijastuskerroin');
xlabel('Taajuus [Hz]');
ylabel('Absorptiosuhde');

%Keskiarvoistetun normeeratun impedanssin piirtäminen
%
figure(3);
%subplot(2,2,3);
semilogx (Z2,'Color','b','LineWidth',2);
grid;
set(gca,'XTick',[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000])

```

```

set(gca,'XMinorTick','off');
set(gca,'XMinorGrid','off');
axis ([fmin fmax 0 1.1*max(abs(Z2))]);
title('Normeerattu impedanssi näytteen etureunalla');
xlabel('Taajuus [Hz]');
ylabel('Normeerattu impedanssi');

%Vaihevasteen piirtäminen
%
figure(4);
%subplot(2,2,4);
semilogx(theta,'LineWidth',2);
grid;
set(gca,'XTick',[31.5 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000 16000])
set(gca,'XMinorTick','off');
set(gca,'XMinorGrid','off');
axis ([fmin fmax -180 180]);
title('Vaihevaste');
xlabel('Taajuus [Hz]');
ylabel('Vaihekulma');

```


Liite 2

MATLAB-OHJELMA - KESKIARVOISTUSFUNKTIO

```
function [average_Y] = frequencyaveraging(Y,fmin,fmax,p);
% Logaritmisen taajuuskaistan keskiarvoistus halutulla arvolla
%
% Lähtötiedot:
% Y = keskiarvoistettava funktio
% fmin = alarajataajuus, josta keskiarvoistus aloitetaan
% fmax = ylärajataajuus, josta keskiarvoistus aloitetaan
% p = keskiarvoistusprosentti (suhteellinen taajuuskaista)
%
% Tulokset:
% average_Y = logaritmisesti keskiarvoistettu funktio
%
% Denis Siponen 10.1.2005

%Alustetaan keskiarvoistettu funktio
%
pituus = length(Y);
average_Y(pituus) = 0;

%Keskiarvoistetaan spektri
%
for s = 1:pituus
    kaistamin = fix(s*p);
    kaistamax = fix(s/p);
    kaista = (kaistamax-kaistamin);
    for t = 0:kaista
        if ((kaistamin+t) < 1)
            average_Y(s)= average_Y(s) + Y(1);
            t = t + 1;
        elseif ((kaistamin+t) > pituus)
            average_Y(s)= average_Y(s) + Y(pituus);
            t = t + 1;
        else
            average_Y(s)= average_Y(s) + Y(kaistamin+t);
            t = t + 1;
        end
    end
    average_Y(s) = average_Y(s)/(kaista+1);
    s = s + 1;
end
```

Liite 3

MATLAB-OHJELMA: REIKÄRESONAATTORIOPTIMOINTI

```
% REIKÄRESONAATTORIOPTIMOINTI
%
% Reikäresonaattorin optimaalisten parametrien laskenta, kun
% resonanssitaajuus tunnetaan
%
%% Denis Siponen 24.9.2004

%nollataan muuttujat ja tyhjennetään komentokenttä
%
clc;
clear;

%Tarvittavat muuttujat
%
% r = reiän säde [m]
% p = perforaatioaste
% d = ilmaraon syvyys [m]
% dp = paneelin paksuus [m]
%
%Muuttuja tiedot(X,X,X,X):
%ensimmäinen sarake rivissä sisältää ilmaraon syvyyden d
%toinen sarake rivissä sisältää reiän säteen r
%kolmas sarake rivissä sisältää paneelin paksuuden dp
%neljäs sarake rivissä sisältää perforaatioasteen p
%viides sarake rivissä sisältää integraalin
%
d = 0.1; % ilmaraon syvyys [m]
r = 0.0005; % reiän säde [m]
dp = 0.002; % paneelin paksuus [m]

%Haluttu resonanssitaajuus f [Hz].
%
f_res = 200;

% Taajuustiedot
%
deltaf = 10; % Taajuusresoluutio [Hz]
fmax = f_res*3.5; % Suurin taajuus [Hz]

% Kuormitusimpedanssi
%
Rk = 0; % Reaaliosa [Pas/m]
Mk = inf; % Inertiaosa [kg/m2]
Ck = 0; % Jousto-osa [m/Pa]

% Äänen tulokulmat (astetta) normaaliin nähden
% 'diffuusi' ('diff') = diffuusi kenttä
% Diffuusin kentän kanssa ei muita määriteltyjä suuntia
%
theta = [0];
```

```

% Rakenne alimmasta alkaen
%   i = ilmaväli
%   a = absorbentti
%   r = reikälevy
%   esim. ['iaar']
%
constr = ['ir'];

%ilmakehän paramterejä:
%
% (Input: lämpötila (C), ilmanpaine (atm))
% c = äänen nopeus
% roo = tiheys
% gamma = adiabaattivakio
% Q = puristuvuus
% Z00 = karakteristinen impedanssi
%
[c,roo,gamma,Q,Z00] = airconstants(20,1);

%syöttötietojen manipulointia:
%
n = round(fmax/deltaf) + 1;
fmaxn = (n - 1)*deltaf;
f = linspace(0,fmaxn,n); % Taajuudet lineaarisella taajuusasteikolla
w = 2*pi*f; % Kulmataajuudet

% Kuormitusimpedanssi
%
if (Rk == inf) | (Mk == inf) | (Ck == 0)
    Zk = ones(1,n)*inf;
else
    Zk = Rk*ones(1,n-1) + j*(w(2:n).*Mk - 1./(w(2:n).*Ck));
    if Ck == inf
        Zk = [Rk Zk];
    else
        Zk = [inf Zk];
    end;
end;
if theta(1) ~= 'd'
    Zk = ones(length(theta),1)*Zk;
end;

%reikäresonaattorin optimiparametrien laskenta annetulla
%resonanssitaajuudella f_res
%
A = 1;
for J = 1:10
    for K = 1:10
        p = ((f_res/50.8)^2)*d*(dp*K + (1.6*r*J));
        tiedot(A,1) = d; tiedot(A,2) = J*r; tiedot(A,3) = K*dp; tiedot(A,4) = p;
        [absc,R,Za] =
abscoeff(constr,tiedot(A,1),[],30000,tiedot(A,3),tiedot(A,2),tiedot(A,4),f,Zk,theta);
        integraali = 0;
        for L = 2:n %Taajuus- sekä vaimennuspainotettu integraali
            integraali = integraali + absc(L)*((-log(L)+log(n))/log(n));
        end
        tiedot(A,5) = integraali;
        A = A + 1;
    end
end
end

```

```

%taajuus- sekä vaimennuspainoitettun suurimman ja pienimmän pinta-alan etsiminen
muuttujasta tiedot
%
temp_max = 0;
max_a = 0;

for A = 1:length(tiedot)
    if tiedot(A,5) > temp_max;
        temp_max = tiedot(A,5);
        max_a = A;
    end
end

%taajuus- sekä vaimennuspainotettun "parhaimman" integraalin omaavan
absorbenttiyhdistelmän
%funktion tulostus
%
[absc,R,Za] =
abscoeff(constr,tiedot(max_a,1),[],[],tiedot(max_a,3),tiedot(max_a,2),tiedot(max_a,4),f,Zk,theta);
%
figure(1);
semilogx(f,absc,'b');
axis([deltaf,fmax,0,1]);
grid on;
xlabel('taajuus (Hz)');
ylabel('absorptiokerroin');
title('Huonoimman (punainen) ja parhaimman (sininen) absorptiokertoimen omaavat
yhdistelmät');

```

MATLAB-OHJELMA: ABSORBENTTIOPTIMOINTI

```
% ABSORBENTTIOPTIMOINTI
% Optimaalisen absorbenttiyhdistelmän löytäminen kaikkien mahdollisten
% absorbenttikombinaatioiden joukosta
%
%% Denis Siponen 24.9.2004

%nollataan muuttujat ja tyhjennetään komentokenttä
%
clc;
clear;

% Rakenne alimmasta alkaen
%   i = ilmaväli
%   a = absorbentti
%   r = reikälevy
%   esim. ['iaar']
%
constr = ['aaa'];

% Ilmavälien syvyydet
%
Di = []; %[m]

% Absorbentit
%
r0_min = 0; % Ominaisvirtausvastuksen alaraja
r0_max = 100000; % Ominaisvirtausvastuksen yläraja
r0_step = 10000; % Ominaisvirtausvastuksen muutoksen intervalli (HUOM!, suositus on 10000.
Arvon pienentäminen pidentää laskentaa)

% absorbenttien paksuudet
%
d = [0.03 0.03 0.03]; %[m]

% Reikälevyjen parametrit
%
t = []; % Paksuudet [m]
rp = []; % Reikien säteet [m]
p = []; % Reikä-pinta-alasuhteet

% Taajuustiedot
%
deltaf = 10; % Taajuusresoluutio [Hz]
fmax = 4000; % Suurin taajuus [Hz]

% Äänen tulokulmat normaaliin nähden [astetta]
% 'diffuusi' ('diff') = diffuusi kenttä
% diffuusin kentän kanssa ei muita määriteltyjä suuntia
%
theta = [0];
```

```

% Kuormitusimpedanssi
%
Rk = 0; % Reaaliosa [Pas/m]
Mk = inf; % Inertiaosa [kg/m2]
Ck = 0; % Jousto-osa [m/Pa]

%ilmakehän paramterejä:
%
% (Input: lämpötila [C], ilmanpaine [atm])
% c = äänen nopeus
% roo = tiheys
% gamma = adiabaattivakio
% Q = puristuvuus
% Z00 = karakteristinen impedanssi
%
[c,roo,gamma,Q,Z00] = airconstants(20,1);

%syöttötietojen manipulointia:
%
n = round(fmax/deltaf) + 1;
fmaxn = (n - 1)*deltaf;
f = linspace(0,fmaxn,n); % Taajuudet lineaarisella taajuusasteikolla
w = 2*pi*f; % Kulmataajuudet

% Kuormitusimpedanssi
%
if (Rk == inf) | (Mk == inf) | (Ck == 0)
    Zk = ones(1,n)*inf;
else
    Zk = Rk*ones(1,n-1) + j*(w(2:n).*Mk - 1./(w(2:n).*Ck));
    if Ck == inf
        Zk = [Rk Zk];
    else
        Zk = [inf Zk];
    end;
end;
if theta(1) ~= 'd'
    Zk = ones(length(theta),1)*Zk;
end;

%kaikkien mahdollisten absorbenttikombinaatioiden laskenta
%
for l = 1:floor((r0_max - r0_min)/r0_step)
    r0(l) = r0_min + r0_step*(l-1);
end

%elementtirakenteen absorbenttikerroksien lukumäärän laskeminen
%
absorbent_count = 0;
for l = 1:length(constr)
    if constr(l) == 'a'
        absorbent_count = absorbent_count + 1;
    end
end

%absorbenttiyhdistelmämatriisin luonti
%
tiedot = variations(r0,absorbent_count);

%itse absorptiokertoimien laskenta
%
```

```

for l = 1:length(tiedot)
    [absc,R,Za] = abscoeff(constr,Di,tiedot(l,:),d,t,rp,p,f,Zk,theta);
    integraali = 0;
    for Z = 2:(n) %Taajuus- sekä neliöllisesti vaimennuspainotettu integraali
        integraali = integraali + absc(Z)*absc(Z)*((-log(Z)+log(n))/log(n));
    end
    tiedot(l,absorbent_count+1) = integraali;
end

%suurimman pinta-alan etsintä muuttujasta "tiedot"
%
temp_max = 0;
max_a = 0;
for A = 1:length(tiedot)
    if tiedot(A,absorbent_count+1) > temp_max;
        temp_max = tiedot(A,absorbent_count+1);
        max_a = A;
    end
end

% "Parhaimman" taajuuspainotetun integraalin omaavan absorbenttiyhdistelmän
% funktion tulostus
%
r0_best = 0;
for l = 1:absorbent_count
    r0_best(1,l) = tiedot(max_a,l);
end
%
[absc,R,Za] = abscoeff(constr,Di,r0_best,d,t,rp,p,f,Zk,theta);
%
semilogx(f,absc,'b');
grid;
axis([0,fmax,0,1]);
xlabel('taajuus (Hz)');
ylabel('absorptiokerroin');
title('Optimaalinen absorptioyhdistelmä');

```

MATLAB-OHJELMA: VARIATIONS

```
function [variations] = variations(r0,absorbent_count,n)
% Kaikkien mahdollisten absorbenttikombinaatioiden laskeminen ja tallennus
% taulukkoon.
%
% Lähtötiedot:
% r0 = ne ominaisvirtausvastusarvot, mitä absorbentti voi saada
% absorbent_count = absorbenttien kokonaislukumäärä rakenteessa
% n = niiden muiden parametrien kombinaatioiden määrä, joita on yhdessä
% absorbenttiyhdistelmässä (reikiä eri koot * levyä eri paksuudet)
%
% Denis Siponen 24.1.2005

%apumuuttujia
%
A = 1;
B = 1;
C = 1;
D = 1;
J = 1;
E = 0;

%algoritmi kaikkien mahdollisten absorbenttikombinaatioiden laskemiseen.
%siinä edetään sarake kerrallaan tallentaen rivitietoihin kulloisen
%absorbenttin ominaisvirtausvastus. jos esim absorbentteja on 2kpl, pienin
%ominaisvirtausvastus 0 Nm/s^4, ominaisvirtausvastuksen muutoksen intervalli 1 Nm/s^4
%ja suurin ominaisvirtausvastus 2 Nm/s^4 on taulukko seuraavanlainen:
%
% 0 0
% 0 1
% 0 2
% 1 0
% 1 1
% 1 2
% 2 0
% 2 1
% 2 2
%
for I = 1:n*absorbent_count*length(r0)^(absorbent_count)
    E = E + 1;
    variations(E,J)=r0(A);

    if ((B == n*length(r0)^(absorbent_count-D)) && (A==length(r0)))
        A = 1;
        B = 0;
    else
        if (B == n*length(r0)^(absorbent_count-D))
            A = A + 1;
            B = 0;
        end
    end

end

end
```



```
B = B + 1;

if (C == n*length(r0)^absorbent_count)
    J = J + 1;
    C = 0;
    A = 1;
    E = 0;
    D = D + 1;
end

C = C + 1;

end
```