

Pallomaisen mikrofoniatriisin suunnittelu, rakentaminen ja kalibrointi

Heta Orava
Pro gradu -tutkielma
Sovelletun fysiikan koulutusohjelma
Itä-Suomen yliopisto, Sovelletun fysiikan laitos
3. huhtikuuta 2019

ITÄ-SUOMEN YLIOPISTO, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta
Sovelletun fysiikan koulutusohjelma, laskennallinen fysiikka
Heta Orava: Pallomaisen mikrofonimatriisin suunnittelu, rakentaminen ja kalibrointi
Pro gradu -tutkielma, 44 sivua, 1 liite (11 sivua)
Tutkielman ohjaajat: Tuomo Savolainen, Timo Lähivaara, Tomi Huttunen (30.8.2018
asti)
Huhtikuu 2019

Avainsanat: 3D, ambisoniikka, kalibrointi, mikrofoni, palloharmoninen hajotelma,
pallomainen mikrofonimatriisi, taajuusvaste, äänentallennus, äänimittaus

Tiivistelmä

Kolmiulotteisen (3D) äänen tallentamisella ja toistamisella on lukuisia sovel-
luskohteita teollisuudesta viihteeseen. Kolmiulotteisen äänentallennuksen avul-
la voidaan esimerkiksi havainnoida ja kontrolloida melua sekä paikallistaa ääni-
lähteitä. Kolmiulotteista ääntä voidaan hyödyntää esimerkiksi elokuvamusiikin
tallentamisessa, videoneuvotteluissa tai virtuaalitodellisuuden sovelluksissa.

3D-ääntä voidaan tallentaa mikrofonimatriiseilla, jotka koostuvat useista
mikrofoneista. Mikrofonimatriiseilla äänikentästä saadaan yksityiskohtaisem-
paa tietoa yksittäisiin mikrofoneihin verrattuna, ja mikrofonit voidaan asettaa
esimerkiksi tasoon tai pallon pinnalle. Kun mikrofonit asetetaan pallon pin-
nalle, kolmiulotteinen äänikenttä on mahdollista tallentaa tehokkaasti ja sen
käsittelyssä voidaan hyödyntää palloharmonista hajotelmaa. Pallomaisen mik-
rofonimatriisin ominaisuuksiin vaikuttaa esimerkiksi mikrofonien määrä, niiden
asettelugeometria ja pallon koko.

Tutkielmassa suunniteltiin ja toteutettiin pallomainen mikrofonimatriisi ja
kalibroidiin mikrofonimatriisin mikrofonit. Tutkielmassa rakennettiin pallomai-
nen mikrofonimatriisi, joka koostuu 32 mikrofonista ja muovisesta 3D-tulos-
tetusta pallorungosta. Mikrofonit toteutettiin elektreettimikrofonikapsuleista.
Mikrofonit kalibroidiin vertailumenetelmällä referenssimikrofonin avulla ja edel-
leen niiden taajuusvasteet laskettiin. Taajuusvasteista laskettiin mikrofonien
amplitudi- ja vaihevasteet. Rakennettujen mikrofonien amplitudivaste oli noin
-5 dB referenssimikrofoniin verrattuna lähes kaikille mikrofoneille. Mikrofoneil-
le suoritettiin myös toistettavuus- ja taustakohinamittauksia. Mittausten pe-
rusteella toistettavuus oli varsin hyvä. Kalibroidut mikrofonit asennettiin pal-
lorunkoon liimaamalla ne rungossa olleisiin reikiin ja pallomaisella mikrofonim-
atriisilla suoritettiin vastaavia mittauksia kuin yksittäisillä mikrofoneilla. Eri
puolilta palloa valittiin mikrofoneja, joiden signaaleja verrattiin kyseisten mik-
rofonien kalibroituhiin signaaleihin ja samassa paikassa sijaitsevan referenssi-
mikrofonin signaaliin. Mittausten avulla voitiin havaita äänikentässä sijaitse-
van pallorungon vaikutus mikrofonien signaaleihin.

Abstract

Three-dimensional (3D) sound recording and reproducing have several applications. For instance, 3D sound recording can be applied to noise control and to locate sound sources. Three-dimensional sound can be utilized in recording of movie soundtracks, teleconferences or virtual reality applications.

Three-dimensional sound can be recorded with microphone arrays which consist of several microphones. Compared to individual microphones, microphone arrays provide more detailed information. Microphones can be arranged in different kinds of configurations such as spherical or planar configuration. With the spherical configuration, the 3D sound field can be recorded efficiently and spherical harmonic decomposition can be utilized in the processing of the sound field.

In this thesis, a spherical microphone array was designed and built. The array consists of 32 microphones and a 3D printed plastic body. In the microphones, electret microphone capsules were used. Microphones were calibrated by comparing them to a reference microphone and their frequency responses were calculated. Moreover, amplitude and phase responses were calculated from the frequency responses. The amplitude responses of the built microphones were -5 dB compared to the reference microphone for almost all microphones. Additionally, repeatability and noise measurements were carried out. From the measurements, it can be seen that the repeatability was good. Calibrated microphones were attached to the plastic body by glueing them to the holes in the body shell. Similar measurements were carried out with the microphone array as with the single microphones. Responses of the attached microphones were compared to the corresponding calibrated free-space signals and to the reference microphone in the same location. The effect of the spherical array body on the sound signals can be detected from the measurements.

Symbolit

b	mikrofonin herkkyys
$B_{mn}(\theta, \phi)$	akustisen paineen ortogonaaliprojektion komponentti palloharmoniassa
c	äänen nopeus
f	taajuus
$H(f)$	siirtofunktio eli taajuusvaste
Im	imaginääriosa
$j_m(kr)$	pallobesseli
k	aaltoluku
m	palloharmonisen funktion kertaluku
n	palloharmonisen funktion aste
$p(kr, \theta, \phi)$	äänenpaine
r	säde
$R_{\text{amp}}(f)$	amplitudivaste
$R_{\theta}(f)$	vaihevaste
Re	reaaliosa
$S_{\text{FFT}}(f)$	signaalin Fourier-muunnos
$S_{\text{dB}}(f)$	desibeliarvoinen signaali
$S_{\text{Pa}}(t)$	painearvoinen signaali
$S_{\text{V}}(t)$	jännitearvoinen signaali
$Y_{mn}(\theta, \phi)$	palloharmoninen kantafunktio
θ	korkeuskulma
ϕ	atsimuuttikulma
∇^2	Laplace-operaattori

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Pallomaisen mikrofonimatriisin teoria	9
2.1	Ambisoniikka	9
2.2	Palloharmoninen hajotelma	11
2.3	Mikrofonien kalibrointi	12
2.3.1	Mikrofonin taajuusvaste	13
3	Pallomaisen mikrofonimatriisin rakentaminen	14
3.1	Mikrofonit	14
3.2	Pallomaisen mikrofonimatriisin runko	15
3.3	Muu laitteisto	17
3.4	Mikrofonien kiinnittäminen runkoon	17
4	Mittaukset	23
4.1	Mikrofonien kalibrointi	24
4.1.1	Toistettavuusmittaukset	24
4.1.2	Taustakohina	25
4.2	Mikrofonit pallon pinnalla	25
5	Tulokset	27
5.1	Mikrofonien kalibrointi	27
5.1.1	Toistettavuusmittaukset	27
5.1.2	Taustakohina	27
5.2	Mikrofonit pallon pinnalla	27
6	Pohdinta	39
7	Yhteenveto	41
	Viitteet	42
A	Mikrofonien kalibrointikäyrät	45

1 Johdanto

Kolmiulotteinen ääni eli 3D-ääni tarkoittaa ääntä, josta on havaittavissa äänilähteiden suunta sekä vertikaalisesti että horisontaalisesti. Aivot määrittävät kuullusta äänestä paljon erilaisia asioita, kuten erilaisten äänten voimakkuuden ja suunnan sekä ympäristön ominaisuuksia. Monissa tilanteissa olisi hyödyllistä pystyä tallentamaan ja toisintamaan ääntä samoin kuin ihminen sen kuulee [27]. Kolmiulotteisten audiojärjestelmien tavoitteena onkin luoda kuuntelijalle vaikutelma realistisesta ääniympäristöstä [1].

Kolmiulotteisella äänentallennuksella on lukuisia sovelluskohteita [7]. 3D-äänentallennusta käytetään äänikentän spatiaaliseen analyysiin ja sillä voidaan esimerkiksi analysoida äänikenttiä ja paikallistaa äänilähteitä [8]. 3D-äänentallennusta voidaan hyödyntää esimerkiksi musiikitapahtuman äänityksissä, elokuvamusiikin tallennuksessa, radiolähetyksissä ja virtuaalitodellisuuden sovelluksissa [7]. Myös esiintymislavojen akustiikkaa voidaan mitata ja suunnitella 3D-äänen avulla [18].

Eräs merkittävä sovelluskohde on videoneuvottelut, joissa ääntä voitaisiin tallentaa ja toistaa siten, että tietyt äänet kuuluisivat tietyistä suunnista [7]. Muita sovelluskohteita ovat esimerkiksi melun kontrollointi ja akustinen holografia [29]. Kolmiulotteista äänentallennusta voidaan hyödyntää myös esimerkiksi aeroakustiikassa melua tuottavien lähteiden havainnoimiseen [4].

3D-äänestä voidaan laskea akustinen intensiteetti eri suuntiin ja siitä voidaan luoda kuva [25]. Kun tähän yhdistetään optinen kamera, saadaan akustinen kamera, jolla on laajasti sovelluksia teollisuudessa [8]. Tällöin tallennettu ääni antaa tietoa lähteen sijainnista ja kameroiden avulla saadaan tietoa tilan geometriasta ja esimerkiksi ihmisten sijainneista ja liikkeistä [26].

Kolmiulotteista äänentallennusta voidaan käyttää myös keilanmuodostukseen [8]. Keilanmuodostuksessa huomioidaan kunkin äänisignaalin viive ja vaihemuutos, jonka avulla voidaan selvittää, missä suunnassa äänilähde sijaitsee [21]. Sen avulla voidaan myös arvioida huoneen akustiikkaa ja äänen kulkeutumista seinien ja lattian läpi [13]. Keilanmuodostuksen avulla äänestä voi vahvistaa tiettyjä äänilähteitä, kuten puhetta, ja vaimentaa toisia, kuten taustamelua [4, 7]. Näin myös esimerkiksi kaikumista voidaan vähentää [20].

Akustiset mittaukset vaativat usein useiden mikrofoniin käyttöä samanaikaisesti [33]. Koska ääni etenee koko rajatussa tilassa ja tuottaa kolmiulotteisen äänikentän, mikrofonit ryhmitellään usein kolmiulotteisesti, jotta äänikenttiä saataisiin tehokkaasti mitattua ja käsiteltyä [29]. Useiden mikrofonielementtien muodostamaa ryhmiteltyä kokonaisuutta kutsutaan mikrofonimatriisiksi [10].

Mikrofonimatriiseilla saadaan yksityiskohtaisempaa tietoa yksittäisiin mikrofoneihin verrattuna [4]. Mikrofonimatriiseilla on mahdollista toistaa äänikenttä tietyllä

alueella siten, että yksittäisen pisteen sijaan äänikenttä voidaan rekonstruoida koko alueessa [32]. Matriisitekniikat vaativat useita mikrofoneja spatiaalisen resoluution ja taajuusresoluution optimoimiseksi [4]. Mikrofonien signaaleja käsitellään yksittäin ja signaalit summataan yhteen [10].

Kolmiulotteisia äänimittauksia voidaan tehdä pallomaisella mikrofonimatriisilla, joka koostuu nimensä mukaisesti mikrofoneista, jotka on asetettu pallopinnalle. Mikrofonimatriisin akustiset ominaisuudet riippuvat mikrofonien määrästä ja geometriasta, jonka mukaan mikrofonit on asetettu pallopinnalle. Pallomainen mikrofonimatriisi voi olla avoin tai suljettu: avoimessa mikrofonimatriisissa mikrofonit ovat kuvitteellisella akustisesti läpinäkyvällä pallopinnalla ja suljetussa mikrofonit ovat kiinteällä, ääntä heijastavalla pallopinnalla [8].

Mikrofonimatriisi voi olla muodoltaan myös esimerkiksi tasomatriisi, jossa mikrofonit ovat rivissä, suorakulmion muotoisesti tai ympyrän kehällä. Kuitenkin pallomaisella mikrofonimatriisilla on lukuisia etuja verrattuna tasomatriiseihin. Pallo on pyörähdyssymmetrinen kaikkiin suuntiin, mikä helpottaa spatiaalista suodatusta ja keilanmuodostusta [29]. Suljetussa pallossa aallon siroamista pallostä voidaan hyödyntää suuntaavuuden parantamiseksi [27]. Lisäksi mikrofonimatriisin käsittely voidaan muotoilla palloharmonisessa alueessa [29].

Kolmiulotteisen äänen toisintamismenetelmät perustuvat alkuperäisen äänikentän tallentamiseen ja toisintamiseen [7]. Jotkin äänikenttien rekonstruointimenetelmät kuten ambisoniikka perustuvat äänikentän esittämiseen palloharmonisena hajotelmana [1]. Pallomaisella mikrofonimatriisilla mitattu äänikenttä on mahdollista esittää palloharmonisena hajotelmana [22]. Palloharmonista analyysiä voidaan hyödyntää niin korkeamman asteen pallomaisten mikrofonimatriisien teoriassa ja suunnittelussa kuin niihin liittyvässä signaalinkäsittelyssä [1].

Tässä tutkielmassa esitellään rakennettu pallomainen mikrofonimatriisi, joka koostuu 32 mikrofonista. Mikrofonit rakennetaan elektreettimikrofonikapsulien ympärille ja pallorunko 3D-suunnitellaan ja -tulostetaan. Kaikille mikrofoneille tehdään kalibrointimittaukset ja lisäksi valituille mikrofoneille toistettavuus- ja taustakohinamittauksia. Tämän jälkeen mikrofonit asetetaan pallorunkoon. Pallomaisella mikrofonimatriisilla tehdään mittauksia, joilla valittuja pallomaisen mikrofonimatriisin signaaleja verrataan kyseisten mikrofonien kalibroituihin signaaleihin ja referenssimikrofonin signaaleihin. Näin voidaan tutkia, millainen vaikutus äänikentässä olevalla pallorungolla on signaaleihin.

Luvussa 2 on esitelty ambisoniikan perusteet ja palloharmoninen hajotelma, johon pallomaisen mikrofonimatriisin signaalinkäsittely perustuu. Lisäksi luvussa on esitetty mikrofonien kalibrointitapoja. Luvussa 3 on esitetty, kuinka pallomaisen mikrofonimatriisin mikrofonit ja runko rakennetaan. Luvussa 4 on esitetty tutkielman mit-

tausasetelma ja suoritettavat kalibrointi-, toistettavuus- ja taustakohinamittaukset yksittäisille mikrofoneille ja pallomaisen mikrofonimatriisiin mittaukset. Luvussa 5 on esitetty mittaustulokset ja luvussa 6 tulosten pohdinta sekä luvussa 7 tutkielman yhteenveto. Lisäksi liitteessä A on esitetty kaikkien mikrofonien kalibrointikäyrät.

2 Pallomaisen mikrofoniatriisin teoria

2.1 Ambisoniikka

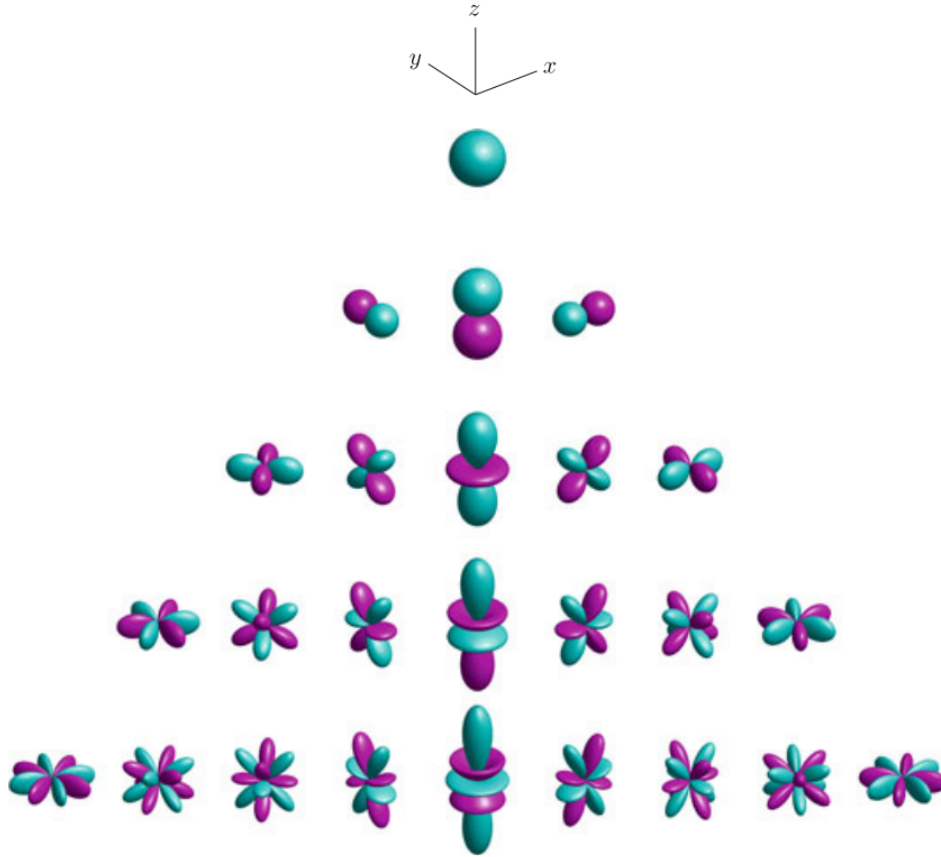
Äänikenttiä voidaan toisintaa kolmiulotteisesti erilaisilla tekniikoilla joko toisintamalla luonnollinen äänikenttä tai käyttämällä virtuaalisia lähteitä [5]. Eräs kolmiulotteinen äänentallennus- ja toistomenetelmä on ambisoniikka, joka perustuu äänikentän esittämiseen ortogonaalisten kantafunktioiden avulla [11]. Perinteisissä monikanavaisissa äänentoistomenetelmissä (esim. stereomenetelmä, 5.1- ja 7.1-tiläänimenetelmä) kukin kanava sisältää sitä vastaavan kaiuttimen signaalin, mutta ambisoniikassa kanavat sisältävät tietoa akustisen kentän fysikaalisista ominaisuuksista, kuten paineesta tai akustisesta nopeudesta [2].

Michael Gerzon alkoi kehittää ambisoniikkaa 1970-luvulla [12, 24]. Ambisoniikka voidaan jakaa ensimmäisen asteen ambisoniikkaan (*engl.* First Order Ambisonics, FOA) ja korkeamman asteen ambisoniikkaan (*engl.* Higher Order Ambisonics, HOA) [11]. Ensimmäisen asteen ambisoniikassa äänikenttää mitataan neljällä mikrofonilla, jotka on asetettu tetraedrin muotoon. Mikrofonien tallentamia neljää signaalia kutsutaan yhdessä A-formaatiksi. Edelleen A-formaatti voidaan prosessoida B-formaatiksi, joka sisältää neljä eri kanavaa: painetiedon ja kolme karteesisen koordinaatiston suuntaista nopeussignaalia [21]. B-formaatin painekomponenttia kutsutaan W-kanavaksi ja X-, Y- ja Z-kanavat vastaavat akustista nopeutta x -, y - ja z -akseleilla [2]. Ensimmäisen asteen ambisoniikan spatiaalinen resoluutio on kuitenkin melko matala, mikä rajoittaa äänikentän rekonstruoimisen pienelle kuuntelualueelle [24].

Korkeamman asteen ambisoniikka laajentaa B-formaatin korkeampaan resoluutioon äänikentän palloharmonisen hajotelman avulla [24]. Mitä enemmän komponentteja äänikentän tallentamiseen käytetään, sitä tarkempi on spatiaalinen resoluutio [5, 7]. Korkeamman asteen ambisoniikan etuina ovat muun muassa äänikentän manipulaatiot kuten kiertäminen [5].

Kolmiulotteisessa tapauksessa ambisoniikan kantafunktioita kutsutaan palloharmonisiksi kantafunktioiksi [11]. Kuvassa 1 on esitetty palloharmonisia funktioita $Y_{mn}(\theta, \phi)$ niiden imaginääri- ja reaalisien $\text{Im}\{Y_{mn}(\theta, \phi)\}$ ja $\text{Re}\{Y_{mn}(\theta, \phi)\}$ avulla. Kuvan rivit kuvaavat palloharmonisten funktioiden astetta $m = 0, \dots, 4$ ylhäältä alas ja sarakkeet funktioiden kerrointa $n = -m, \dots, m$ vasemmalta oikealle. Keskimäisessä sarakkeessa on $Y_{m0}(\theta, \phi)$ -funktio, sen vasemmalla puolella imaginääriosat $\text{Im}\{Y_{mn}(\theta, \phi)\}$, joille $n < 0$ ja oikealla puolella reaalisat $\text{Re}\{Y_{mn}(\theta, \phi)\}$, joille $n > 0$ [29]. Palloharmonian aste m määrittää samalla ambisoniikan asteen [2]. Ensimmäisen asteen ambisoninen tekniikka vastaa siis äänikentän hajottamista palloharmonian nollannen ja ensimmäisen asteen komponentteihin [21]. Jokaisella HOA:n asteella on

$2m + 1$ kanavaa ja yhteensä m :nnen asteen HOA:ssa on $(m + 1)^2$ kanavaa [2].



Kuva 1: Palloharmonisia kantafunktioita $Y_{mn}(\theta, \phi)$, kun $m = 0, \dots, 4$ ja $n = -m, \dots, m$ [29].

Ambisoniikka on luonnostaan rajoittunut äänikentän palloharmonisten komponenttien äänitystavan takia. Ambisoninen teoria vaatii, että äänikenttä tallennetaan samanaikaisesti määrätyissä pisteissä. Käytännössä mikrofonit voidaan asettaa määrättyihin pisteisiin asettamalla ne säännöllisen geometriseen asetelmaan ja palloharmoniset komponentit saadaan mikrofonisignaalien lineaarikombinaatioina. Korkeamman asteen mikrofonimatriisien suunnittelu on vaikeaa, sillä säännöllisiä monitahokkaita on vain harvoja [7].

Säännöllisen geometrisen muodostelman vaatimus voidaan myös kiertää käyttämällä teoreettista jatkuvaa pallomaista mikrofonimatriisia, joka voisi tallentaa äänen missä tahansa pallon pinnalla, ja hyödyntää sitä palloharmonisten komponenttien muodostamisessa signaalinkäsittelyn avulla. Tämä lähestymistapa ei vaadi erityistä geometrista asetelmaa vaan jatkuvan pallomaisen mikrofonimatriisin diskreetin approksimaation [7].

Ambisoniikassa tallennus ja toisto ovat eroteltuna toisistaan, mikä tekee äänen- tuotosta joustavaa. Ambisoniikan avulla ääni voidaan purkaa toistettavaksi kaiutti-

milla, kuulokkeilla tai tallentaa toistoa varten mille tahansa äänentoistojärjestelmälle [11]. Äänen spatiaalinen purkaminen perustuu siihen, että palloharmonisen hajotelman avulla muodostetaan äänisignaalit tiettyihin sijainteihin [24]. Äänen purkamiseen voidaan käyttää purkumatriiseja [11]. Purkamiseen on olemassa erilaisia matriiseja erilaisiin kuunteluolosuhteisiin riippuen esimerkiksi äänentoistoon käytettävistä välineistä [9].

2.2 Palloharmoninen hajotelma

Aaltoyhtälön spatiaalista ratkaisua kuvaa yhtälö [7]

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0, \quad (1)$$

missä ∇^2 on Laplace-operaattori, p on äänenpaine ja k on vakio [7]. Vakiota k kutsutaan aaltoluvuksi ja $k = 2\pi f/c$, missä f on taajuus ja c äänen nopeus [23]. Yhtälöä (1) kutsutaan Helmholtz-yhtälöksi. Yhtälö voidaan ratkaista käyttämällä separointimenetelmää $p(kr, \theta, \phi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)$, missä r on etäisyys, θ on korkeuskulma ja ϕ atsimuuttikulma [7]. Helmholtz-yhtälö (1) ratkaistaan siis pallokoordinaatistossa erikseen säteen, korkeuskulman ja atsimuuttikulman suhteen ja yksittäisten muuttujien ratkaisut yhdistetään. Siten äänenpaine $p(kr, \theta, \phi)$ voidaan esittää pallokoordinaatistossa Fourier-Bessel -hajotelmana [5, 23]

$$p(kr, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{\infty} i^m j_m(kr) \sum_{n=-m}^m B_{mn} Y_{mn}(\theta, \phi), \quad (2)$$

missä $i = \sqrt{-1}$ ja Y_{mn} -komponentit kuvaavat palloharmonista kantaa [5]. Harmonista astetta kuvaa m ja $-m \leq n \leq m$. $j_m(kr)$ -funktiot ovat pallobesseleitä (*engl.* spherical Bessel function) [5]. Pallobesselit vastaavat Helmholtz-yhtälön ratkaisua säteen suhteen ja palloharmoniset Y_{mn} -komponentit ovat ortonormaaleja ja ne toteuttavat ortogonaalisuusehdon [7]. B_{mn} -komponentit vastaavat akustisen paineen ortogonaaliprojektioita palloharmonissa [5].

Pallomaista mikrofoniatriisia tarkasteltaessa oletetaan, että palloon osuvat aallot ovat tasoaaltoja [18]. Kun tasoaaltoista muodostuvaa äänikenttää tarkastellaan pallopinnalla, äänikenttä voidaan ilmaista palloharmonisen hajotelman avulla. Edelleen tasoaalton amplituditiheyden palloharmonisilla kertoimilla ja äänenpaineen palloharmonisilla kertoimilla on suora yhteys toisiinsa. Tämän vuoksi tarkastelemalla tasoaaltojen muodostamaa äänikenttää pallopinnalla saadaan tieto äänikentästä koko avaruudessa [29].

Fourier-Bessel -hajotelmassa harmonian aste on ääretön, ja käytännön tilanteissa hajotelma tyypistetään M :n asteen hajotelmaksi. Mitä korkeampi aste M on,

sitä hienojakoisempi palloharmoninen äänikenttä on. M :n asteen palloharmonian muodostamiseksi tarvitaan ambisoniikassa kuitenkin aina vähintään $(M + 1)^2$ mikrofonia palloharmonisten kantafunktioiden määrän vuoksi, mikä asettaa rajoitteita asteen valinnalle [5]. Jokainen tallennettu mikrofonisignaali sisältää osuuden spatiaalisista B_{mn} -komponenteista [23]. Esimerkiksi tässä tutkielmassa käytetyllä 32 mikrofonin mikrofonimatriisilla voidaan siis muodostaa 4. asteen palloharmonia.

2.3 Mikrofonien kalibrointi

Yksittäisten mikrofonien vasteet voivat vaihdella, mikä vaikuttaa mittaustuloksiin [18]. Mikrofonikapsulien taajuusvaste voi vaihdella esimerkiksi kapsulien valmistuksesta tai ympäristötekijöistä, kuten lämpötilasta, johtuen [33]. Siksi mikrofonimatriisissa käytettävät mikrofonit tulee kalibroida [18]. Käytettyjen mikrofonikapsulien summittainen herkkyys ja taajuusvaste tiedetään, mutta se ei ole yksittäiselle kapsulille tarkka vaan keskimääräinen. Lisäksi mikrofonikapsuliin lisätty vahvistin- ja virransyöttöpiiri muuttavat mikrofonikonaisuuden herkkyyttä ja taajuusvastetta [4].

Mikrofoneja voidaan kalibroida eri tavoin [3, 31]. Mikrofonit voidaan esimerkiksi kalibroida vertaamalla niitä referenssimikrofoniin tietynlaisessa ympäristössä, kuten akustisessa putkessa, seisovan aallon putkessa tai kaiuttomassa tilassa. Toinen kalibrointimenetelmä on käyttää tiedetyssä paikassa olevan kaiuttimen lähettämää kalibrointisignaalia (esim. puhe, siniaalto, valkoinen kohina tai äänipulssit). Kolmas menetelmätyyppi on itsekalibroituva menetelmä. Niissä mikrofonimatriisin parametrien oletetaan olevan oikeat ja etsitään äänilähteen saapumissuuntaa, käytetään saapumissuuntaa mikrofonimatriisin parametrien estimoinnissa ja iteroidaan, kunnes estimaatit suppenevat [31].

Edellä esiteltyjen menetelmien lisäksi mikrofonit voidaan kalibroida vertailumenetelmällä, jota käytettiin myös tässä tutkielmassa. Vertailumenetelmässä kalibroitavaa mikrofonia verrataan jollakin toisella menetelmällä aiemmin kalibroituun referenssimikrofoniin [3, 34]. Kalibroitava mikrofoni ja vertailukohtana toimiva referenssimikrofoni altistetaan samalle äänikentälle ja niiden lähtösignaalit mitataan. Mitattujen lähtösignaalien suhde on verrannollinen mikrofonien herkkyyksien suhteeseen, joten kalibroitavan mikrofonin herkkyys voidaan määrittää referenssimikrofonin tiedetyn herkkyyden avulla [3]. Referenssimikrofonin tulisi olla laadukas mikrofoni, jonka taajuusvaste on tasainen ja jonka dynaaminen ääniala on laaja [4].

Kalibroitava mikrofoni ja referenssimikrofoni voidaan altistaa äänilähteelle joko samanaikaisesti tai vuorotellen. Jos mikrofonit altistetaan vuorotellen, äänilähteen tulee olla stabiili ajan suhteen. Jos taas mikrofonit altistetaan samanaikaisesti, äänikentän tulee olla samanlainen kummankin mikrofonin sijainnissa [3]. Vertailumenetelmä perustuu siis siihen, että äänikentän, jolle kalibroitava mikrofoni ja referenssi-

mikrofoni altistetaan, oletetaan olevan sama kummallekin mikrofonille.

Kalibrointisignaalina voidaan käyttää esimerkiksi (logaritmista) chirp-signaalia. Chirp-signaali on sini-/kosiniaalto, jonka taajuus kasvaa ajan funktiona. Logaritmissa chirp-signaalissa taajuus kasvaa eksponentiaalisesti [6].

2.3.1 Mikrofonin taajuusvaste

Kun halutaan saada tietoa jonkin laitteen tai ympäristön audio-ominaisuuksista, tarvitaan taajuusvastemittauksia [6]. Jakamalla kalibroivan mikrofonin signaalin Fourier-muunnos $S_{\text{FFT,kalib}}(f)$ referenssimikrofonin signaalin Fourier-muunnoksella $S_{\text{FFT,ref}}(f)$ saadaan kalibroivan mikrofonin taajuusvaste eli siirtofunktio [6]

$$H(f) = \frac{S_{\text{FFT,kalib}}(f)}{S_{\text{FFT,ref}}(f)}. \quad (3)$$

Kompleksiarvoinen siirtofunktio sisältää tietoa sekä magnitudista että vaiheesta taajuuden funktiona. Taajuusvasteen magnitudia $|H(f)|$ kutsutaan amplitudivasteeksi ja imaginääriosan ja reaali-osan suhteen arkustangenttia vaihevasteeksi. Amplitudivaste esitetään usein desibeliarvoisena [19]. Desibeliarvoinen amplitudivaste $R_{\text{amp}}(f)$ voidaan siis laskea kaavalla

$$R_{\text{amp}}(f) = 20 \cdot \log_{10}(|H(f)|), \quad (4)$$

missä $H(f)$ on yhtälön (3) mukainen siirtofunktio ja vaihevaste $R_{\theta}(f)$ kaavalla

$$R_{\theta}(f) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(H(f))}{\text{Re}(H(f))} \right), \quad (5)$$

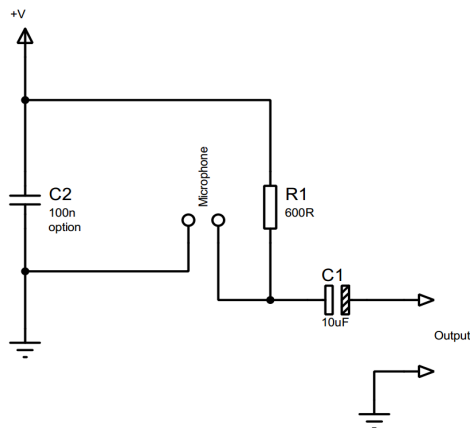
missä $\text{Im}(H(f))$ on siirtofunktion $H(f)$ imaginääriosa ja $\text{Re}(H(f))$ sen reaaliosa [19].

3 Pallomaisen mikrofonimatriisin rakentaminen

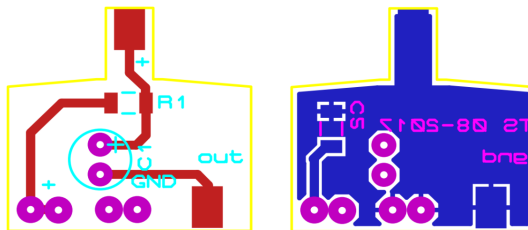
3.1 Mikrofonit

Mikrofonit rakennettiin Panasonicin pallokuvioisista WM-61A -elektreettimikrofonikapsuleista. Kyseisiä mikrofonikapsuleita on käytetty myös muissa vastaavissa mitausmikrofonien valmistusprojekteissa [4,14,15,27,35]. Mikrofonien kytkentä toteutettiin valmistajan kytkentäkaavion mukaisesti [28]. Piirilevyn kytkentäkaavio ja layout-kuvat on esitetty kuvissa 2 ja 3.

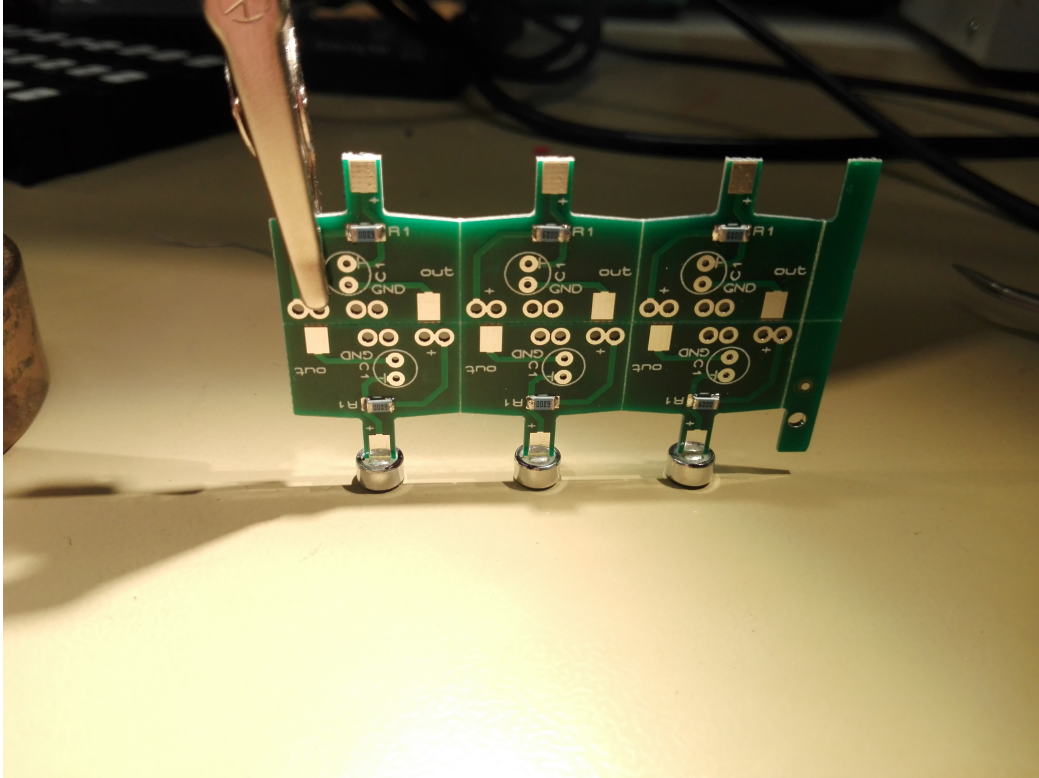
Mikrofonit rakennettiin juottamalla tarvittavat osat kiinni piirilevyihin. Piirilevyihin juotettiin $680\ \Omega$ vastukset sekä WM-61A -elektreettimikrofonikapsulit (kuva 4). Lisäksi piirilevyihin juotettiin kondensaattorit, virtajohdot ja signaalia varten koaksiaalikaapeli, jonka päähän asennettiin BNC-liitin. Osaan piirilevyistä juotettiin lisäksi toinen kondensaattori, joka suodattaa käyttöjännitejohtoihin kytkeytyvää häiriötä. Kuvassa 5 on esitetty mikrofonit, joissa on kaikki edellämäinitut osat koaksiaalikaapeleita lukuunottamatta.



Kuva 2: Piirilevyn kytkentäkaavio.



Kuva 3: Piirilevyn layout-kuvat.

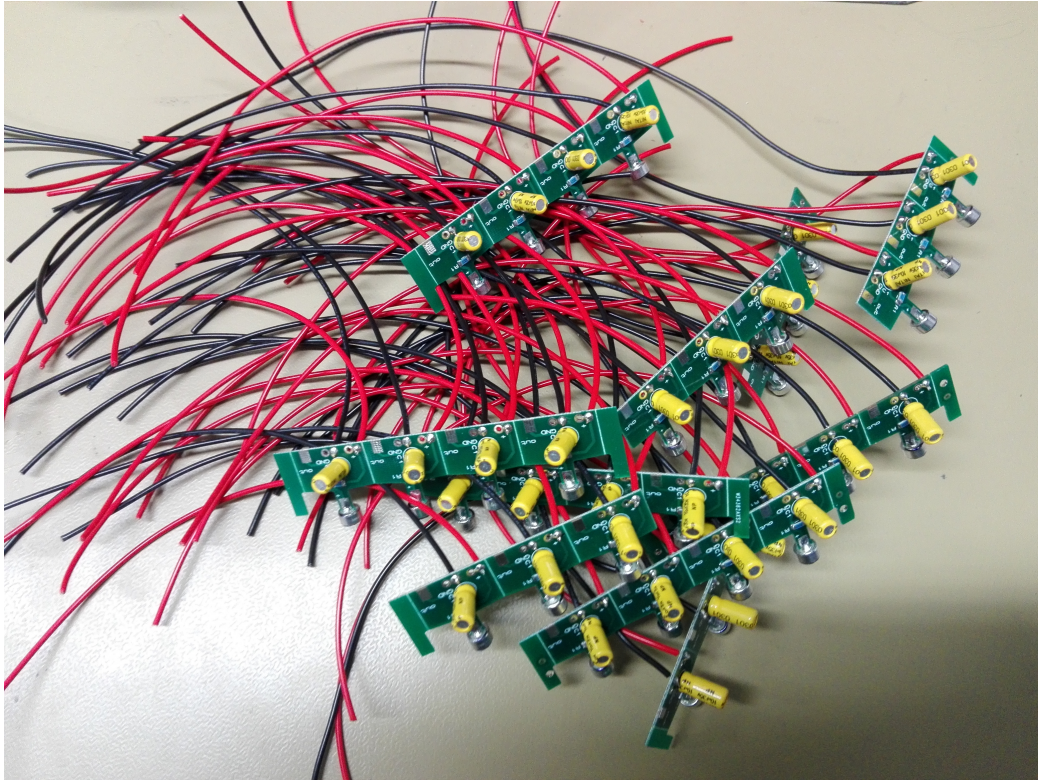


Kuva 4: Mikrofonikapsulien juottaminen piirilevyihin. Piirilevyn alle on asetettu mikrofonikapsulit kunkin piirilevyn ulokkeeseen juotettavaksi.

3.2 Pallomaisen mikrofonimatriisin runko

Pallomainen mikrofonimatriisi vastaa äänenpaineen spatiaalista näytteistystä pallopinnalla, ja mikrofonit kuvaavat näytepisteitä [29]. Mikrofonit voidaan asettaa pallopinnalle eri tavoin. Palloon voidaan valita yhtä monta atsimuutti- ja korkeuskulmaa tasaisin astevälein ja asettaa mikrofonit niiden leikkauskohtiin. Tähän kuitenkin tarvitaan paljon mikrofoneja, mikä nostaa mikrofonimatriisin hintaa [8]. Jos mikrofonien paikkojen valintaan käytetään tasavälistä näytteistystä, M :nnen asteen palloharmooniseen hajotelmaan tarvitaan $4(M + 1)^2$ mikrofonin signaalit. Mikrofonigeometrian voidaan toteuttaa gaussisen näytteistyksen mukaisesti, jolloin palloharmooniseen hajotelmaan tarvitaan $2(M + 1)^2$ mikrofonin signaalit [29].

Mikrofonien asettelussa voidaan käyttää jonkin säännöllisen monitahokkaan geometriaa [8]. Säännöllisiä monitahokkaita ovat viisi Platonin kappaletta: tetraedri, kuutio, oktaedri, dodekaedri ja ikosaedri. Mikrofonit asetetaan kappaleen kärkiin, joita voi olla maksimissaan 20 kappaletta (ikosaedri) [29]. Palloharmoonisen hajotelman tulee toteuttaa ortogonaalisuusehto ja siten dodekaedrin ja ikosaedrin geometrialla voidaan muodostaa vain toiseen asteen palloharmooninen hajotelma. Korkeamman asteen palloharmoonisia hajotelmia voidaan muodostaa lähes säännöllisten, konveksien monitahokkaiden avulla joiden tahkot muodostuvat kahdesta tai useammasta eri mo-



Kuva 5: Piirilevyjä, joihin on juotettu vastukset, mikrofonikapsulit, kondensaattorit ja virtajohdot.

nikulmiosta [24]. Tässä lähestymistavassa vierekkäisten mikrofonien tulee olla yhtä tai lähes yhtä kaukana toisistaan [8].

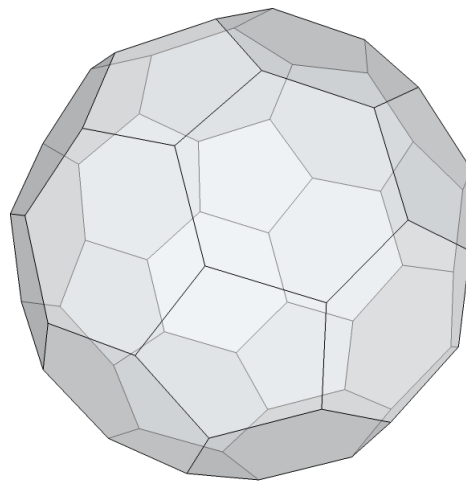
Pallorungoksi valittiin kiinteä pallo avoimen pallon sijaan. Kiinteän pallon aiheuttama siroaminen voidaan laskea tarkasti ja pallon aiheuttama diffraktio parantaa signaali-kohinasuhdetta matalilla taajuuksilla ja pallon suuntaavuuskuvion ansiosta mikrofonimatriisilla on mahdollista hyödyntää palloharmonisia kantafunktioita laajalla taajuusalueella [22].

Pallomaisen mikrofonimatriisin rungon suunnittelussa innoituksena toimi vastaava, Stanfordin yliopistossa valmistettu pallomainen mikrofonimatriisi [16,17]. Rungon 3D-malli on suunniteltu SketchUp-ohjelmalla [30]. Runko muodostuu kahdesta 3D-tulostetusta puolipallosta, joissa kussakin on 16 reikää mikrofoneja varten. Reiät on sijoitettu pallon pinnalle palloa vastaavan ty pistetyn ikosaedrin tahkojen keskipisteisiin. Ty pistetty ikosaedri (kuva 6) on 32-tahkoinen kappale, joka koostuu 12 viisikulmiosta ja 20 kuusikulmiosta. Ty pistetty ikosaedri on valittu mikrofonien geometriaksi, sillä se toteuttaa palloharmonisen hajotelman vaatiman ortogonaalisuusehdon neljännen asteen harmoniaan asti [22].

Mikrofonimatriisin rungon 3D-malli on esitetty kuvassa 7. Pallon ulkohalkaisija on 150 mm ja seinämien paksuus 10 mm. Mikrofonireikien halkaisija on 6,5 mm. Pallon halkaisija vaikuttaa taajuusalueeseen, jolla mikrofonimatriisi toimii luotettavasti [7].

Mitä suurempi halkaisija, sitä tarkempi pallo on alemmilla taajuuksilla, mutta toisaalta suuri halkaisija aiheuttaa korkeammilla taajuuksilla aliasoitumista [22]. Pallon puolikkaat on suunniteltu siten, että ne menevät sisäkkäin jotta pallo pysyy kasassa (kuva 7). Sisäkkäin meneviin osiin on myös tehty reiät kiinnitysruuveille, jotta pallon puolikkaat saadaan helposti asetettua oikeaan asentoon suhteessa toisiinsa. Pallon materiaali on polylaktidi (PLA). Tulostettu pallo on esitetty kuvissa 8 ja 9.

Runkoon kiinnitettiin kuumaliimalla ja ruuvilla 3D-tulostettu, SketchUp-ohjelmalla suunniteltu jalka (kuva 10). Jalassa olevan aukon kautta mikrofonien kaapelit saadaan tuotua ulos pallosta. Muovinen jalka kiinnitettiin metalliseen putkeen, joka voidaan edelleen kiinnittää samaan telineeseen kuin yksittäiset mikrofonit.



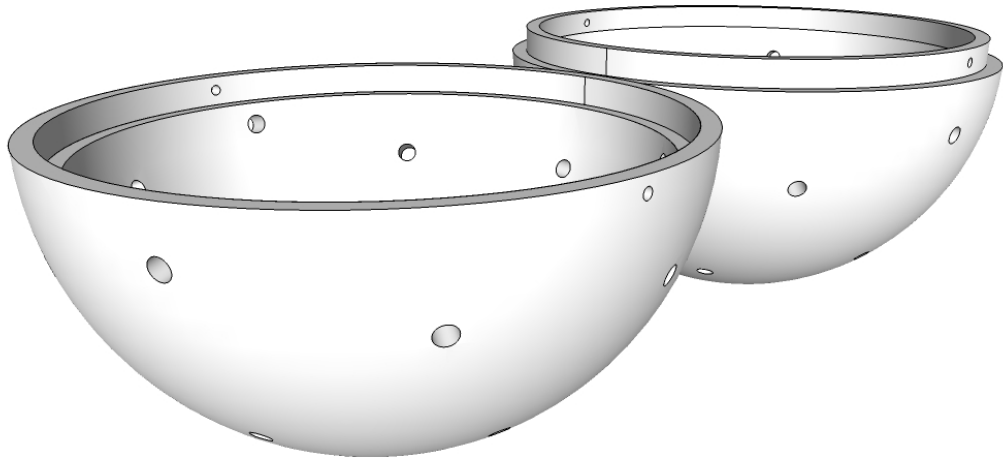
Kuva 6: Typistetty ikosaedri.

3.3 Muu laitteisto

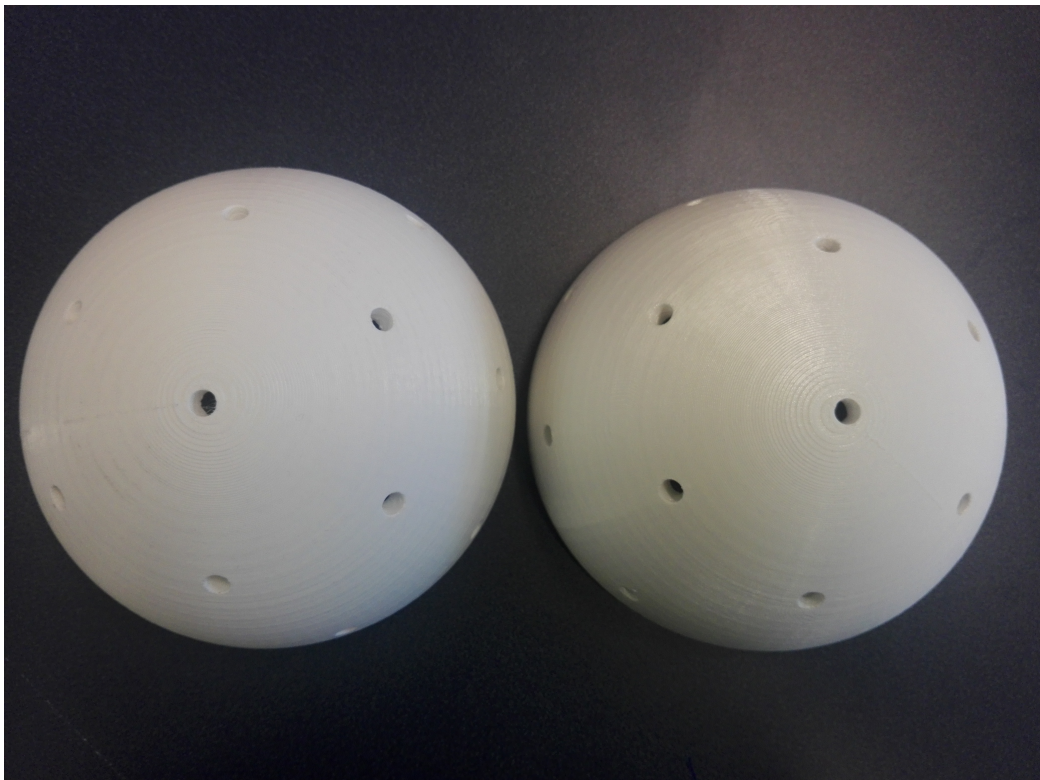
Pallomaisen mikrofonimatriisin lisäksi mittausten toteuttamiseksi tarvittiin virtalähde mikrofonimatriisille, mahdollisimman hiljainen ja vähäkaikuinen tila sekä äänilähde ja tietokone. Mittaustilaksi rakennettiin äänieristetty laatikko, jonka etuseinän saa avattua (kuva 11). Mikrofonimatriisin virtalähteenä käytettiin 3 x 1,5 V AA-paristoja, joihin kytkettiin regulaattori, joka tasaa paristojen jännitteen 3 volttiin. Näin saatiin minimoitua virtalähteen jännitteen vaihtelun vaikutus mittaustuloksiin.

3.4 Mikrofonien kiinnittäminen runkoon

Kun yksittäisten mikrofonien kalibrointimittaukset saatiin valmiiksi, 32 mikrofonia kytkettiin toisiinsa kiinni. Pallorunkoon tarvittiin 32 mikrofonia, mutta yhteensä mikrofoneja oli 36. Niinpä ”huonoimpia” mikrofoneja ei kiinnitetty palloon. Kalibrointikäyristä (liite A) havaittiin, että mikrofonit 4, 5 ja 35 erottuivat joukosta eniten, jo-



Kuva 7: Pallomaisen mikrofonimatriisin 3D-malli.

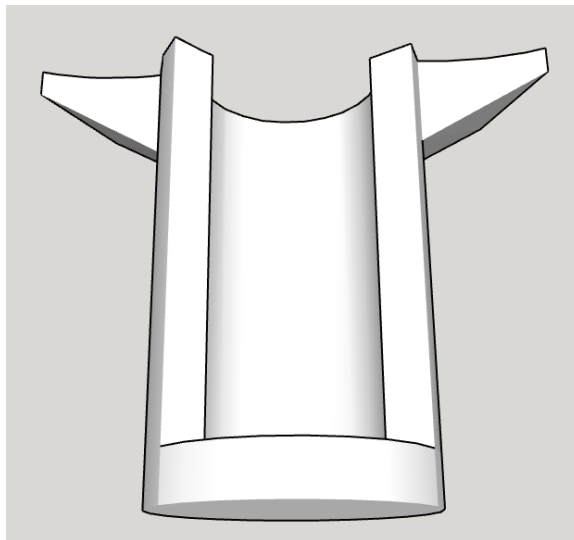


Kuva 8: 3D-tulostetun pallon puolikkaat.

ten ne jätettiin pois pallosta. Lisäksi kootussa pallossa mikrofoni 15 ei enää toiminut, joten se korvattiin mikrofonilla 31. Mikrofoneissa 1, 34, 36 ja 25 oli juotettu kondensaattori käyttöjännitejohtoihin kytkeytyvän häiriön suodattamiseksi, ja ne asetettiin tasaisesti muiden mikrofonien välille. Mikrofonit kytkettiin siis sarjaan järjestyksessä



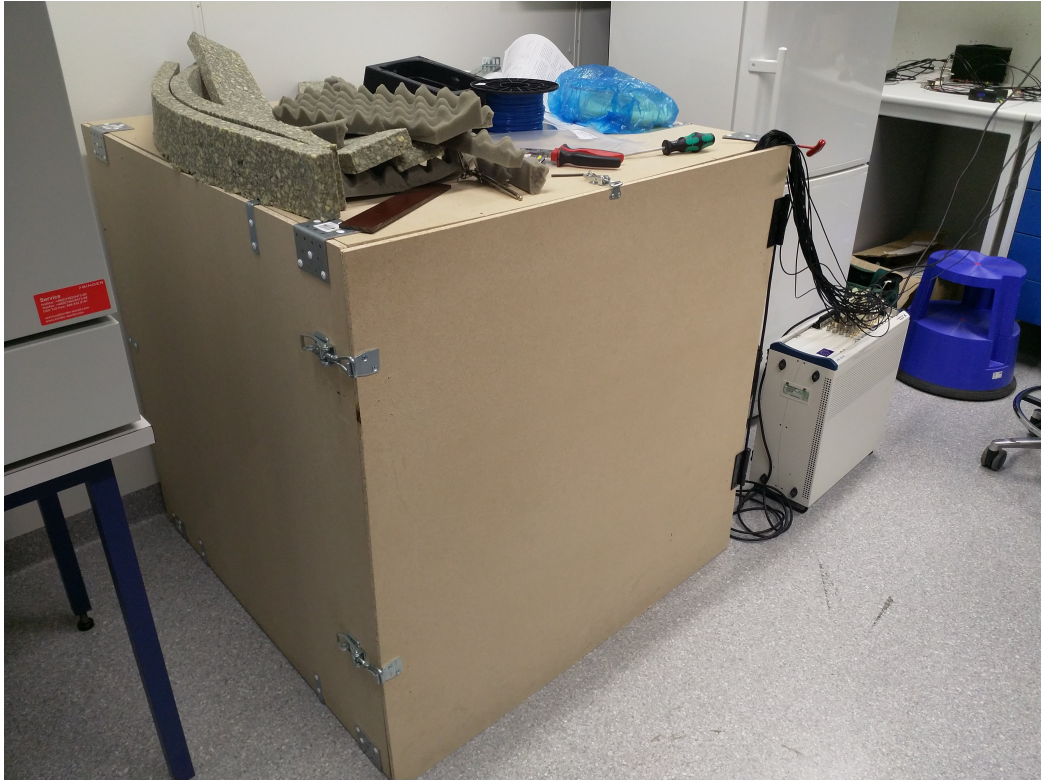
Kuva 9: 3D-tulostetun pallon puolikkaat.



Kuva 10: Kiinnitysjalan 3D-malli.

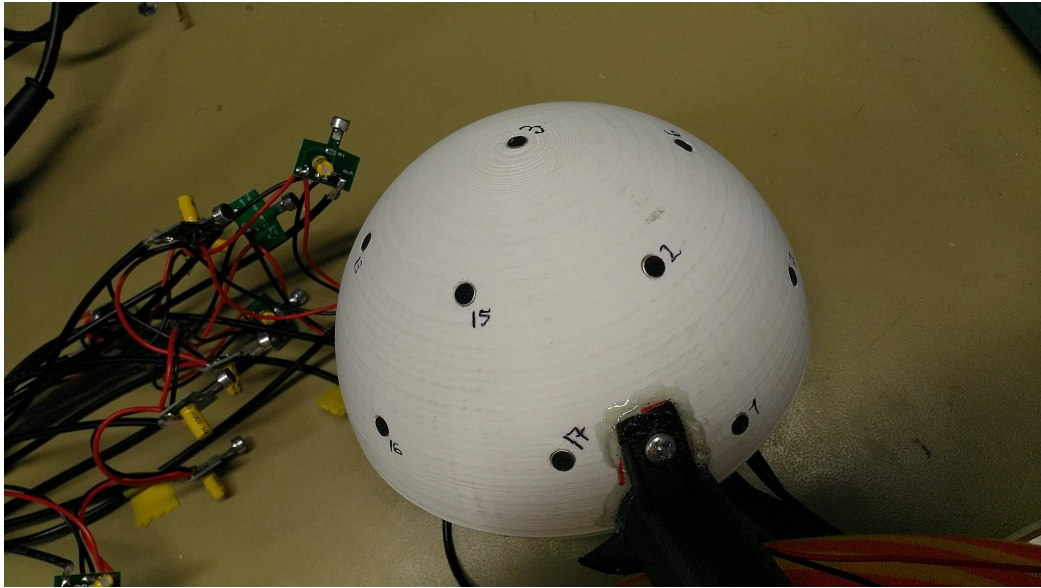
1–3, 6–10, 34, 11–14, 31, 16–17, 36, 18–30, 32–33.

Mikrofonit asetettiin rungon reikiin ja kuumaliimattiin paikalleen siten, että jokaisen mikrofonikapsulin yläpinta tuli pallon ulkopinnan tasalle. Mikrofonit pyrittiin asettelemaan siten, että kapsulit osoittaisivat mahdollisimman suoraan pallopinnan normaalin suuntaan. Mikrofonien signaalikaapelit ohjattiin ulos pallosta palloon poratun reiän ja jalan aukon kautta ja pallon puolikkaat ruuvattiin kiinni toisiinsa.

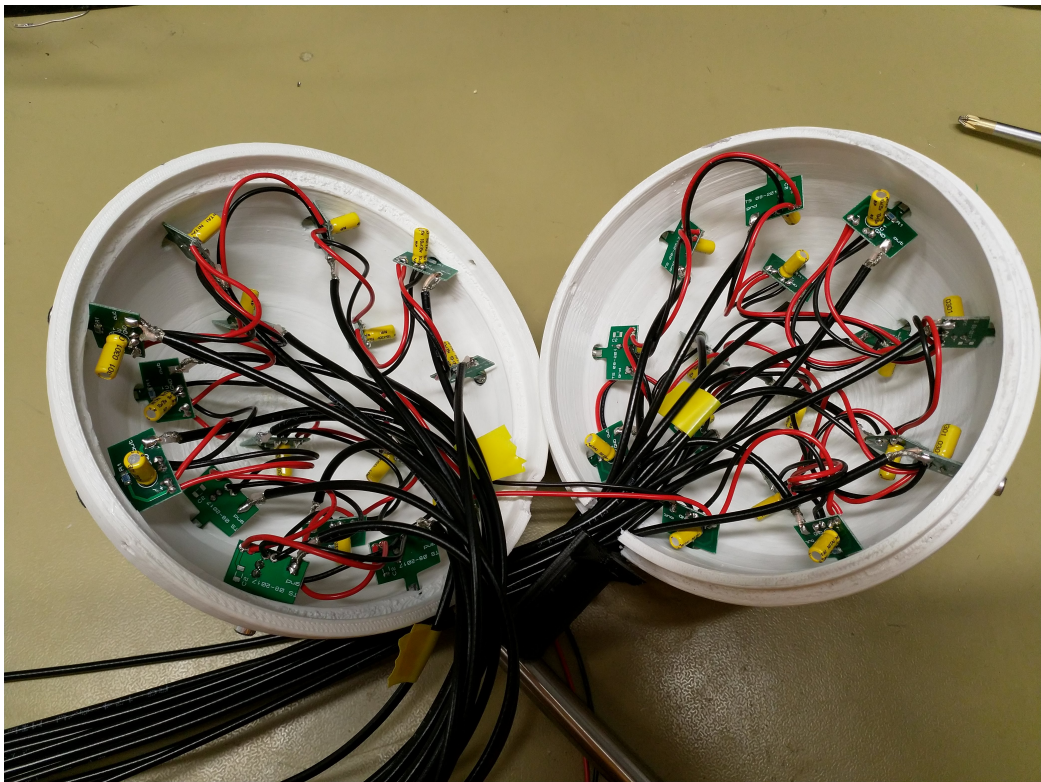


Kuva 11: Äänieristetty laatikko.

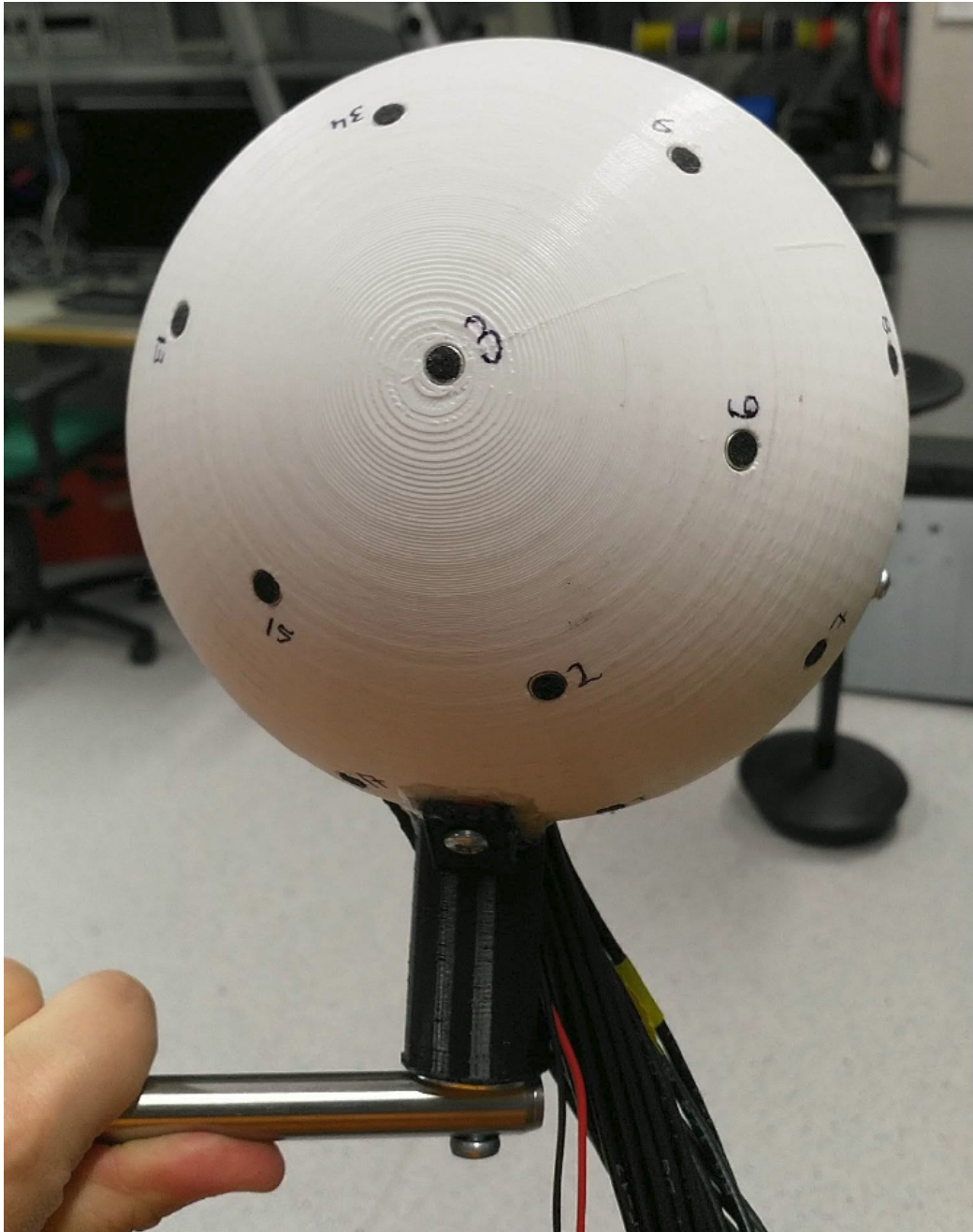
Koottu pallo on esitetty kuvassa 14.



Kuva 12: Mikrofonien kiinnittäminen runkoon: mikrofonikapsulit ovat pallon ulkopinnan tasalla ja osoittavat mahdollisimman suoraan pinnan normaalin suuntaan.



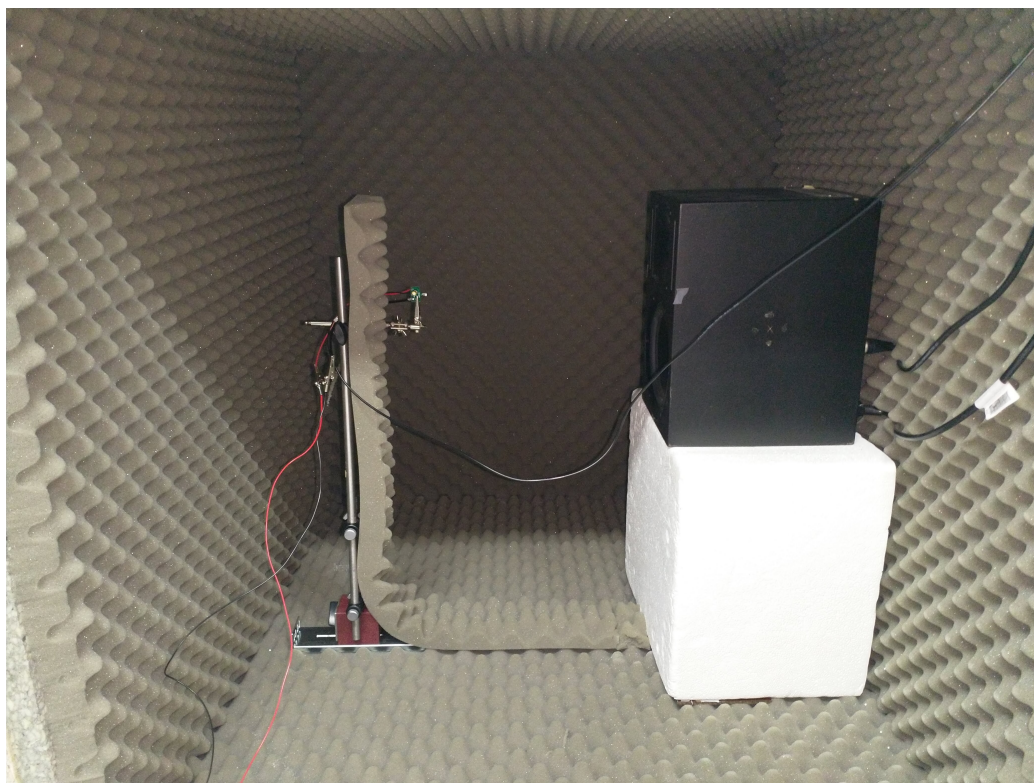
Kuva 13: Mikrofonien kiinnittäminen runkoon: mikrofonit pallon sisäpuolelta katsottuna.



Kuva 14: Koottu pallomainen mikrofonimatriisi. Mikrofonit on liimattu rungon reikiin ja pallon puolikkaat ruuvattu kiinni toisiinsa.

4 Mittaukset

Mittausympäristönä käytettiin äänieristettyä laatikkoa. Laatikon sisämitat ovat noin 90 x 90 x 90 cm. Laatikko pyrittiin rakentamaan siten, että sen rakenteet resonoisivat mahdollisimman vähän. Laatikon seinät tehtiin vanerilevyistä ja ne kiinnitettiin toisiinsa kulmarauodoilla. Laatikon seiniin asennettiin sisäpuolelle tiivistä vaahtomuovia ja sen päälle keilavaahtomuovia, jotta heijastuvaa ääntä saataisiin vaimennettua mahdollisimman hyvin eri taajuuksalueilla. Laatikon sisälle asetettiin äänilähteenä käytetty Genelec-kaiutin ja mikrofoniteline. Kaiutin asetettiin laatikon seinustan lähelle styroksilaatikon päälle, jotta se olisi pystysuunnassa keskellä laatikkoa. Mikrofoniteline kiinnitettiin kaiuttimen keskilinjaan asetettuun metallikiskoon. Kiskoon kiinnitettiin pystytanko ja pystytankoon edelleen vaakatangko. Vaakatangon päähän asennettiin hauenleuka mikrofonien kiinnitystä varten. Teline asetettiin laatikon vastakkaiselle seinustalle siten, että siihen kiinnitettävät mikrofonit ovat kaiuttimen akustisella akselilla. Yksittäiset mikrofonit kiinnitettiin telineeseen vaakatangon hauenleualla. Telineen kisko ja pystytanko päällystettiin kiilamuovilla, jotta niiden aiheuttamat heijastukset saataisiin minimoitua. Mittausasetelma yksittäiselle mikrofonille on esitetty kuvassa 15. Kaiutin ja mikrofoni kytkettiin laatikon ulkopuolella sijaitsevaan National Instrumentsin tietokoneeseen.



Kuva 15: Mittausasetelma. Vasemmalla mikrofoniteline ja siihen kiinnitetty mikrofoni virtajohtoineen ja signaalikaapeleineen, oikealla kaiutin.

4.1 Mikrofonien kalibrointi

Mikrofonit kalibroidiin vertailumenetelmällä. Referenssimikrofonina käytettiin Brüel & Kjaer 4190 -mikrofonikapsulia, joka yhdistettiin Brüel & Kjaer 2669 -esivahvistimeen. Referenssimikrofonin virtalähteenä käytettiin Brüel & Kjaer 2804 -virtalähdettä.

Kalibrointisignaalina käytettiin logaritmista chirp-signaalia. LabVIEW-ohjelman avulla kaiuttimeen syötettiin kolmen sekunnin mittainen logaritminen chirp-signaali, jonka taajuus kasvoi 40 hertsistä 20000 hertsiin. Samanaikaisesti ohjelman avulla mitattiin mikrofonin jännitettä ajan funktiona. Mitattu signaali tallennettiin .dat-tiedostoon. Tallennettuja signaaleja jälkikäsiteltiin MATLABilla, jolla laskettiin mikrofonien siirtofunktiot.

Siirtofunktion ja edelleen amplitudi- ja vaihevasteiden laskemiseksi signaalien tulee olla painearvoisia. LabVIEW-ohjelma tallensi signaalit kuitenkin jännitearvoisina. Koska käytetty kalibrointisignaali on nollakeskiarvoinen, alkuperäisestä jännitesignaalista on poistettu ensin signaalin keskiarvo. Jännitearvoiset signaalit voidaan muuttaa painearvoisiksi kaavalla

$$S_{Pa}(t) = \frac{S_V(t)}{b} \cdot 10^3, \quad (6)$$

missä $S_{Pa}(t)$ on painearvoinen signaali (Pa), $S_V(t)$ on jännitearvoinen signaali (V) ja b mikrofonin ilmoitettu herkkyys (mV/Pa). Referenssimikrofonille $b = 52$ mV/Pa ja muissa mikrofoneissa käytetyille Panasonicin mikrofonikapsuleille $b = 18$ mV/Pa.

Siirtofunktioyhtälön (3) sisältämät Fourier-muunnokset on laskettu MATLABin fft-funktiolla, joka laskee signaalin diskreetin Fourier-muunnoksen FFT-algoritmilla. Fourier-muunnetut signaalit on edelleen muutettu desibeliarvoisiksi kaavalla

$$S_{dB}(f) = 20 \cdot \log_{10}(|S_{FFT}(f)|), \quad (7)$$

missä $S_{dB}(f)$ on signaali taajuuden funktiona (dB) ja $S_{FFT}(f)$ painesignaalin Fourier-muunnos.

Kaikille mikrofoneille tehtiin yksittäin kalibrointimittaukset, jossa mikrofonilla tallennettiin kalibrointisignaali.

4.1.1 Toistettavuusmittaukset

Toistettavuusmittaukset suoritettiin referenssimikrofonilla ja mikrofonilla 2. Kummallekin mikrofonille tehtiin viisi erillistä mittausta siten, että mittausten välissä mikrofonien virta- ja signaalikaapelit irrotettiin virtalähteestä ja tietokoneesta ja mikrofoni irrotettiin mikrofonitelineestä.

Mikrofonin 2 toistettavuusmittauksille on laskettu siirtofunktiot $H(f)$ kaavalla (3) ja edelleen amplitudi- ja vaihevasteet kaavoilla (4) ja (5).

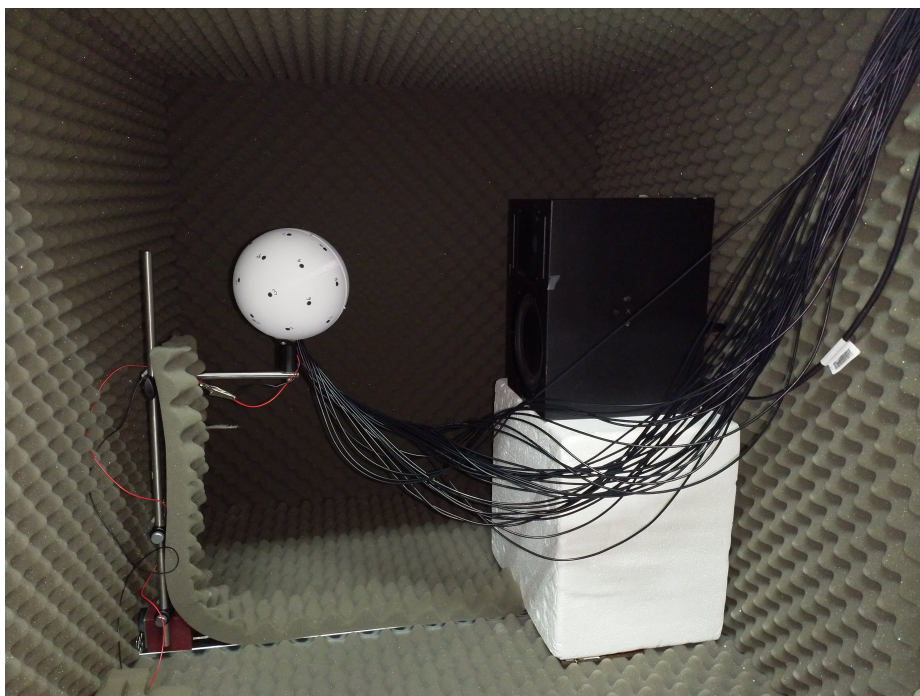
4.1.2 Taustakohina

Mittaustila ei ollut täysin hiljainen, sillä esimerkiksi tietokoneen tuuletin oli suhteellisen kovaääninen. Taustakohinan suuruus oli tarpeellista tietää, jotta kalibrointisignaalien suhteellinen kohinataso ei kasvaisi liian suureksi. Näin voisi käydä, jos kalibrointisignaali olisi hiljainen ja kohina suurta. Taustakohina mitattiin äänittämällä mikrofoneilla kolme sekunnin ajan ilman kalibrointisignaalia. Mitattuja signaaleja on muokattu samalla tavalla kuin toistettavuusmittauksissa. Vastaavat mittaukset tehtiin myös siten, että äänieristetyin laatikon ovi oli auki, ts. äänieristettä oli vain viidellä laatikon sivulla kuudesta.

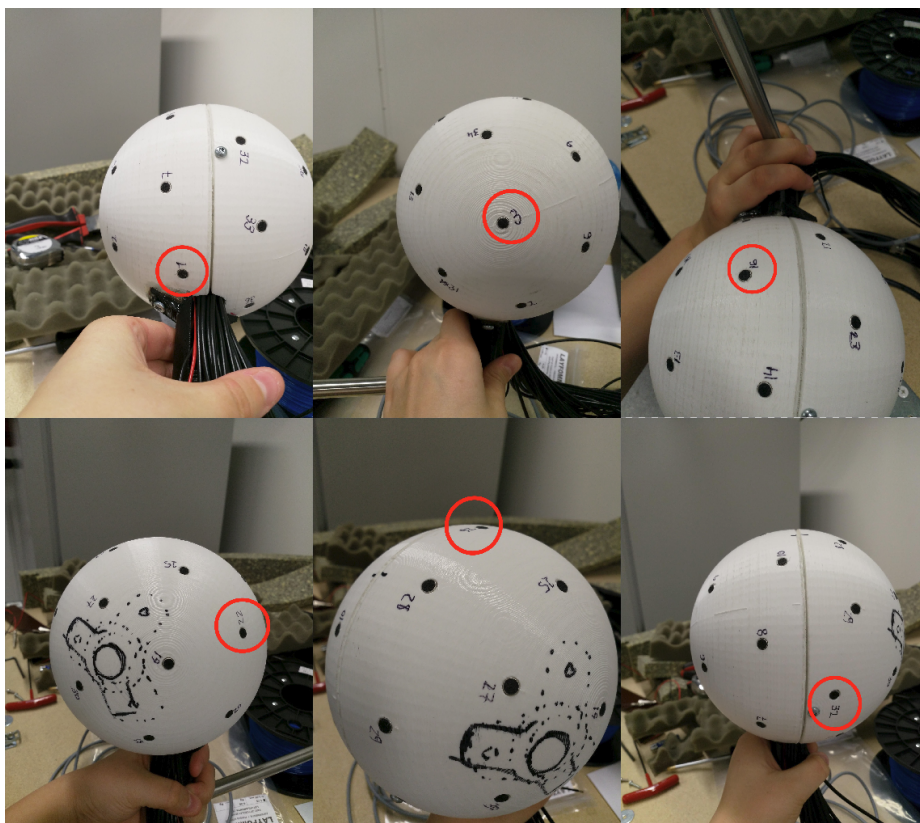
4.2 Mikrofonit pallon pinnalla

Mikrofonien kalibroimisen jälkeen mikrofonit asennettiin kiinni pallorunkoon. Pallomaisen mikrofonimatriisin toimintaa testattiin samanlaisella menettelyllä kuin yksittäisiä mikrofoneja. Mittausasetelma on esitetty kuvassa 16. Signaalina käytettiin samaa chirp-signaalia kuin aiemmissa mittauksissa.

Jotta pallorungon vaikutusta signaaleihin voitaisiin tutkia, pallosta valittiin joitakin mikrofoneja mahdollisimman eri puolilta palloa (mikrofonit 1, 3, 16, 22, 26 ja 32) ja mitattiin niiden sijainnit. Valitut mikrofonit ja niiden sijainnit pallomaisessa mikrofonimatriisissa on esitetty kuvassa 17. Mikrofonit 1 ja 3 sijaitsi pallorungon alaosassa sen jalan vieressä samalla puolella palloa kuin kautin. Mikrofonit 16 ja 22 sijaitsi korkeussuunnassa pallon keskiosassa noin 90 asteen kulmassa kaiuttimeen. Mikrofonit 3 ja 16 sijaitsi kaiuttimen suunnasta katsottuna pallon takana, korkeussuunnassa hieman keskiosan alapuolella. Mikrofonit 22 ja 26 sijaitsi korkeussuunnassa pallon keskiosassa noin 135 asteen kulmassa takaviistoon kaiuttimesta. Mikrofonit 26 ja 32 sijaitsi pallon yläpinnalla hieman pystyakselista takaviistoon. Mikrofonit 16 ja 32 sijaitsi keskellä kaiutinta kohden olevaa pallon puolta, korkeussuunnassa pallon keskiosassa. Mikrofonimatriisin mitausten jälkeen mikrofonimatriisin tilalle vaihdettiin referenssimikrofonit siten, että se olisi mahdollisimman tarkasti samassa kohdassa ja samassa kulmassa kuin valitut mikrofonimatriisin mikrofonit.



Kuva 16: Mittausasetelma. Vasemmalla mikrofoniteline ja siihen kiinnitetty pallomainen mikrofonimatriisi virtajohtoineen ja signaalikaapeleineen, oikealla kaiutin.



Kuva 17: Mikrofonien 1, 3, 16, 22, 26 ja 32 sijainnit pallomaisessa mikrofonimatriisissa. Kyseiset mikrofonit on merkitty punaisella ympyrällä.

5 Tulokset

5.1 Mikrofonien kalibrointi

Kuvassa 18 on esitetty referenssimikrofonin signaali sekä mikrofonien 7–12 signaalit $S_{\text{dB}}(f)$. Signaaleille on laskettu siirtofunktiot $H(f)$ kaavalla (3) ja amplitudi- ja vaihevasteet kaavoilla (4) ja (5). Kuvassa 19 on esitetty mikrofonien 7–12 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$ ja kuvassa 20 on esitetty mikrofonien 7–12 vaihevasteet $R_{\theta}(f)$. Vastaavat kalibrointikuvaajat kaikille mikrofoneille on esitetty liitteessä A.

5.1.1 Toistettavuusmittaukset

Kuvassa 21 on esitetty referenssimikrofonin signaalit $S_{\text{dB,ref}}(f)$ desibeleinä taajuuden funktiona ja kuvassa 22 vastaavat signaalit $S_{\text{dB},2}(f)$ mikrofonille 2. Mikrofonin 2 toistettavuusmittauksien amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$ on esitetty kuvassa 23 ja vaihevasteet $R_{\theta}(f)$ kuvassa 24.

5.1.2 Taustakohina

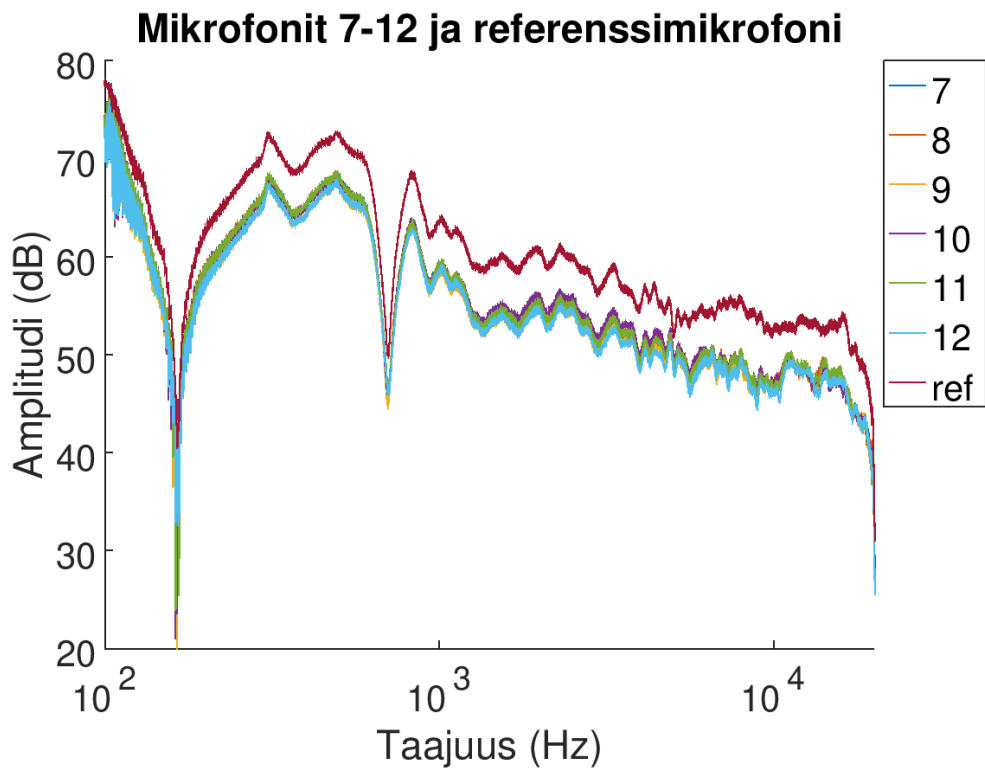
Taustakohinasignaalit $S_{\text{dB,kohina}}(f)$ referenssimikrofonille ja mikrofonille 10 äänieristetyssä laatikossa on esitetty kuvassa 25. Vastaavat taustakohinasignaalit laatikon oven ollessa auki $S_{\text{dB,kohina}}(f)$ referenssimikrofonille ja mikrofonille 10 on esitetty kuvassa 26.

5.2 Mikrofonit pallon pinnalla

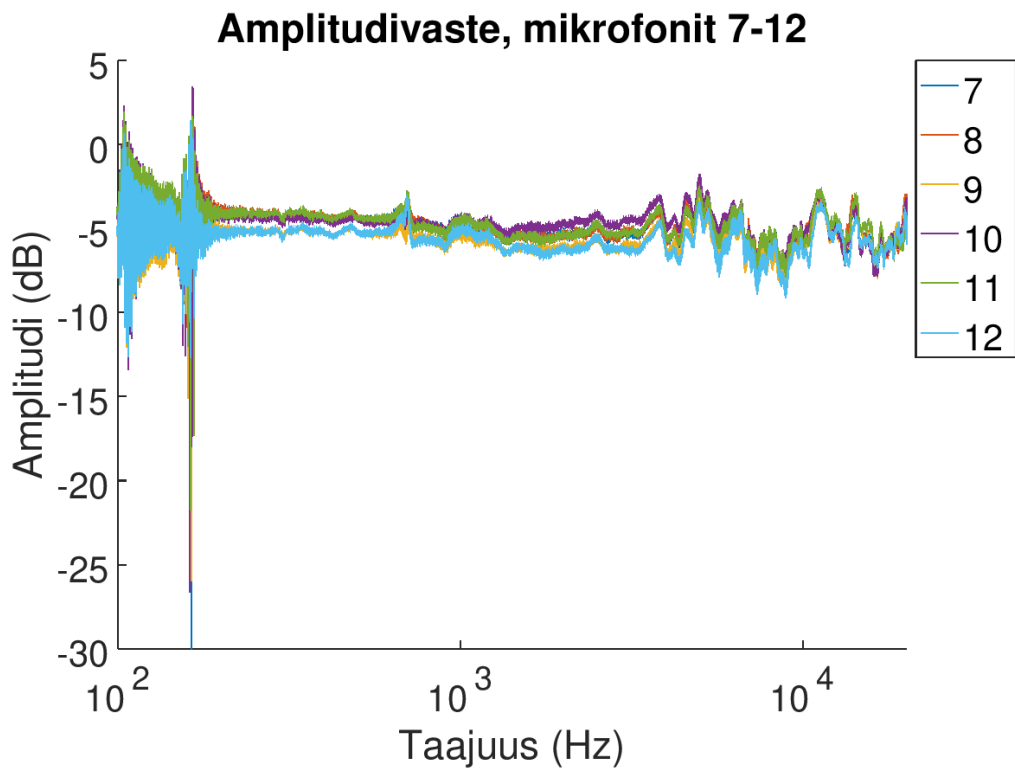
Kaikkien mikrofonien signaalit pallon pinnalla on esitetty kuvassa 27. Selkeyden vuoksi signaalit on esitetty lisäksi kuvissa 28–31 kahdeksalle mikrofonille kerrallaan.

Pallon pinnalla olevia mikrofoneja vertailtiin samaan paikkaan ja asentoon asetettuun referenssimikrofoniin. Kuvassa 32 on esitetty referenssimikrofonin signaali $S_{\text{dB,ref}}$, palloon kiinnitetyn mikrofonin 1 signaali $S_{\text{dB},1}$ ja mikrofonin 1 signaali, josta on vähennetty referenssimikrofonia vasten tehdyn kalibroinnin amplitudivaste $S_{\text{dB},1,\text{kalib}} = S_{\text{dB},1} - R_{\text{amp},1}$. Kuvissa 33–37 on esitetty vastaavat kuvaajat mikrofoneille 3, 16, 22, 26 ja 32.

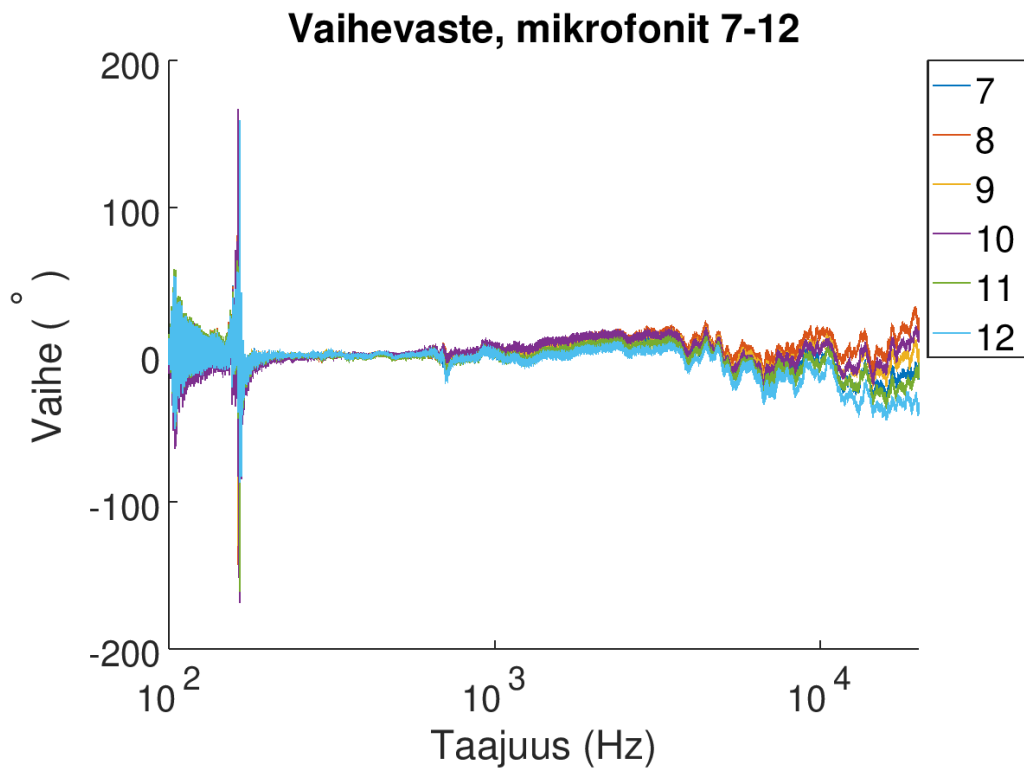
Kalibroiduille signaaleille on edelleen laskettu siirtofunktiot $H(f)$ vertaamalla niitä vastaaviin referenssimikrofonimittauksiin kaavalla (3) ja edelleen amplitudi- ja vaihevasteet kaavoilla (4) ja (5). Kuvassa 38 on esitetty mikrofonien 1, 3, 16, 22, 26 ja 32 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$ pallon pinnalla ja kuvassa 39 samojen mikrofonien vaihevasteet $R_{\theta}(f)$.



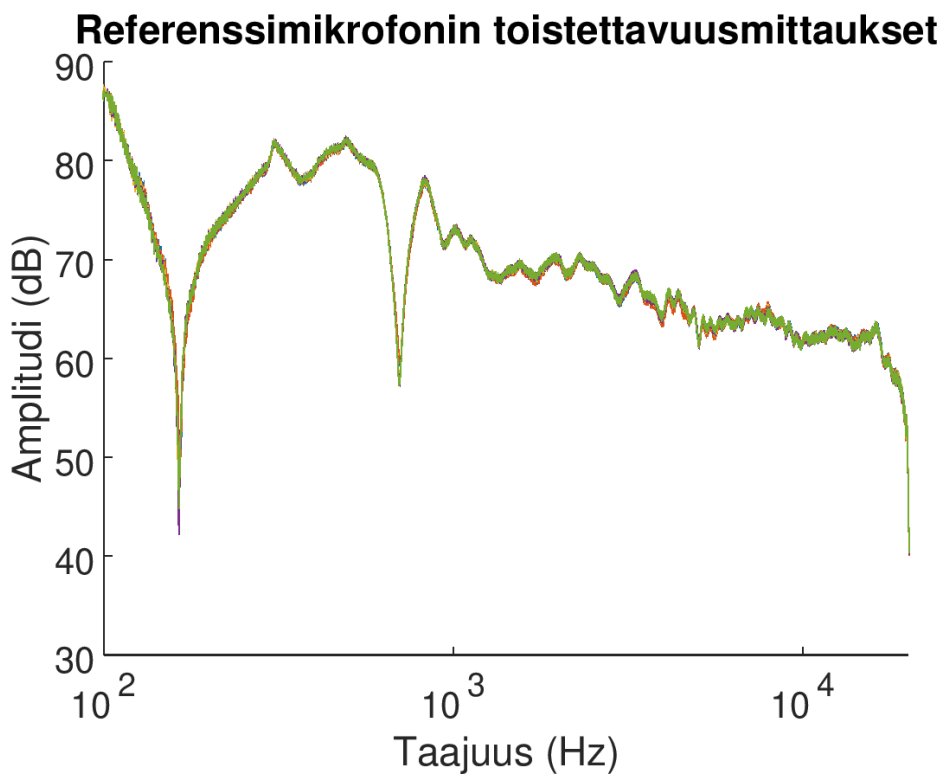
Kuva 18: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 7–12 signaalit $S_{dB}(f)$.



Kuva 19: Mikrofonien 7–12 amplitudivasteet $R_{amp}(f)$.

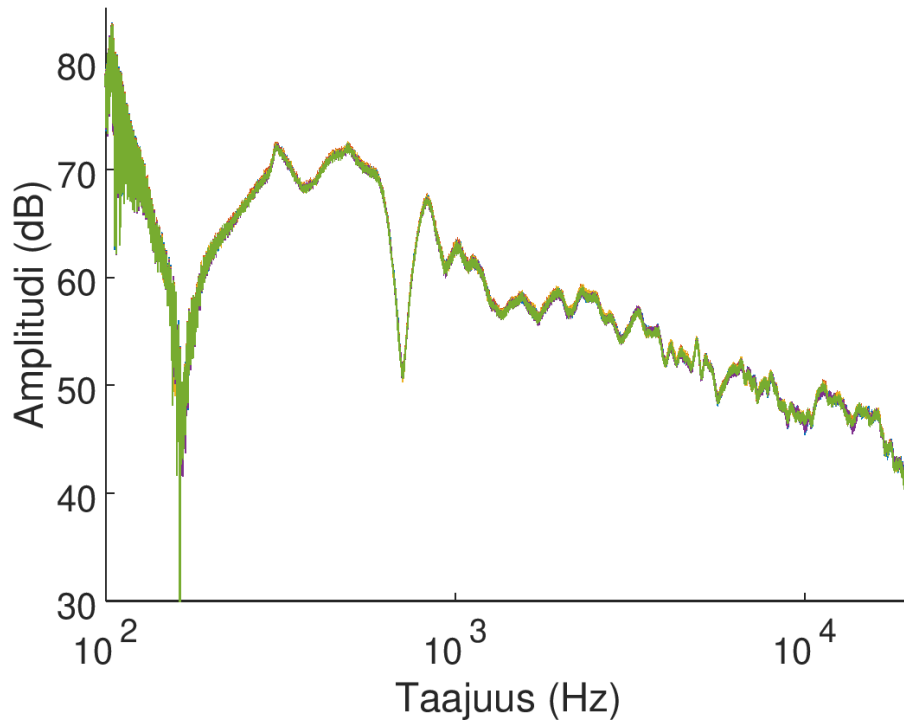


Kuva 20: Mikrofonien 7–12 vaihevasteet $R_\theta(f)$.



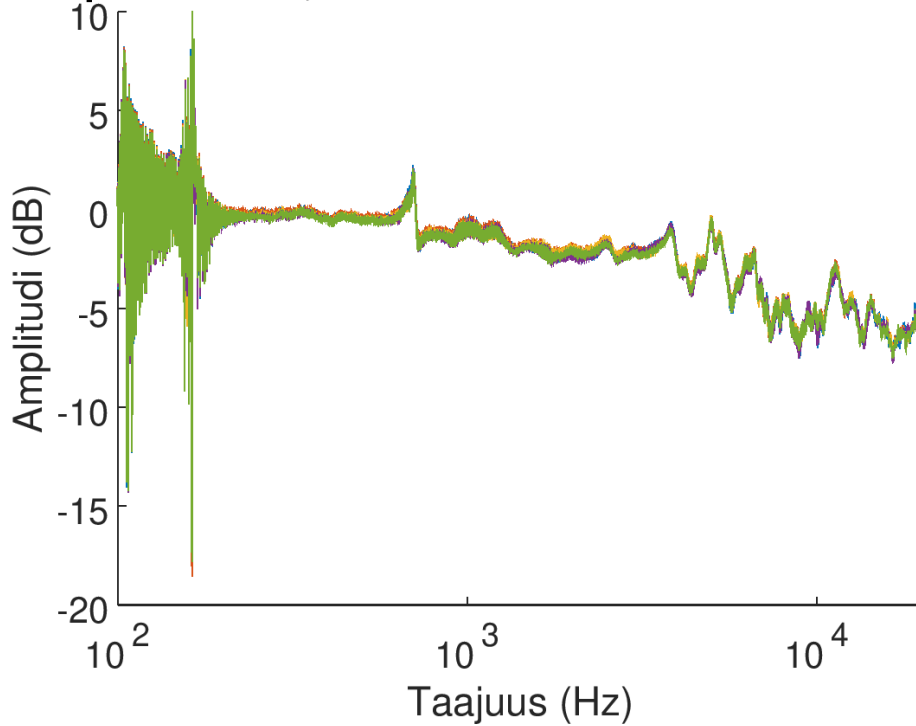
Kuva 21: Referenssimikrofonin signaalit $S_{\text{dB,ref}}(f)$.

Mikrofonin 2 toistettavuusmittaukset

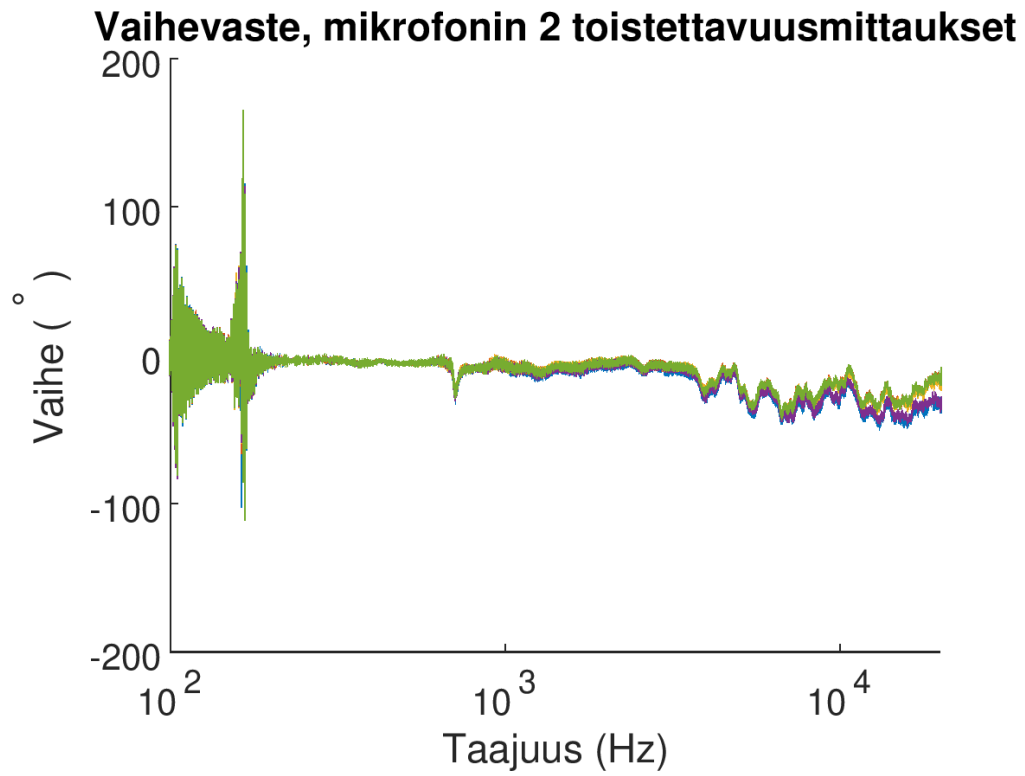


Kuva 22: Mikrofonin 2 signaalit $S_{dB,2}(f)$.

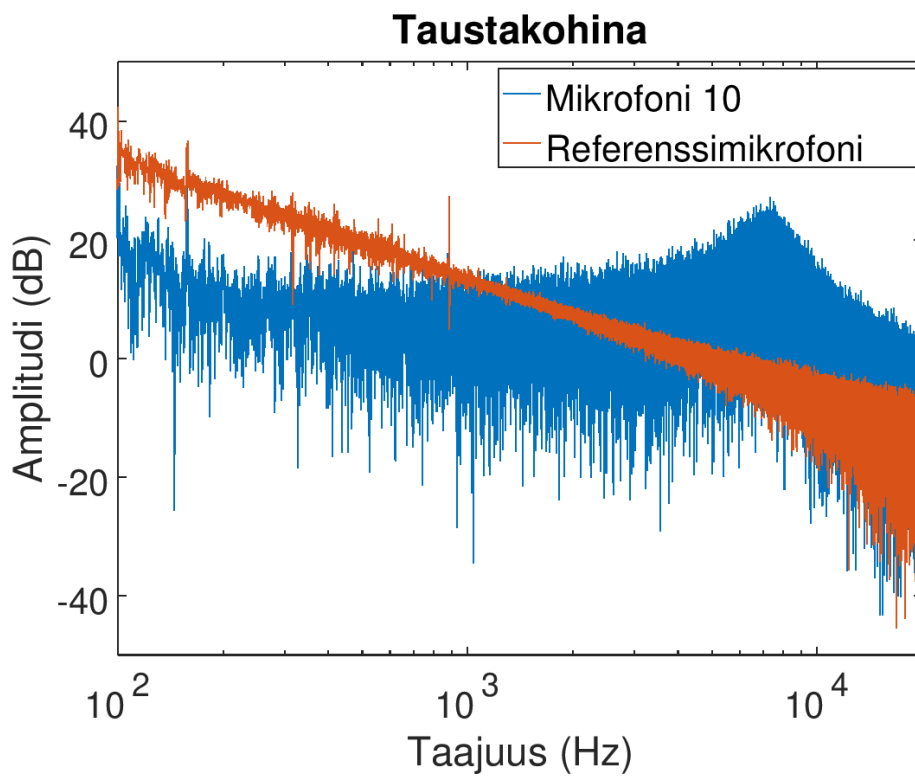
Amplitudivaste, mikrofonin 2 toistettavuusmittaukset



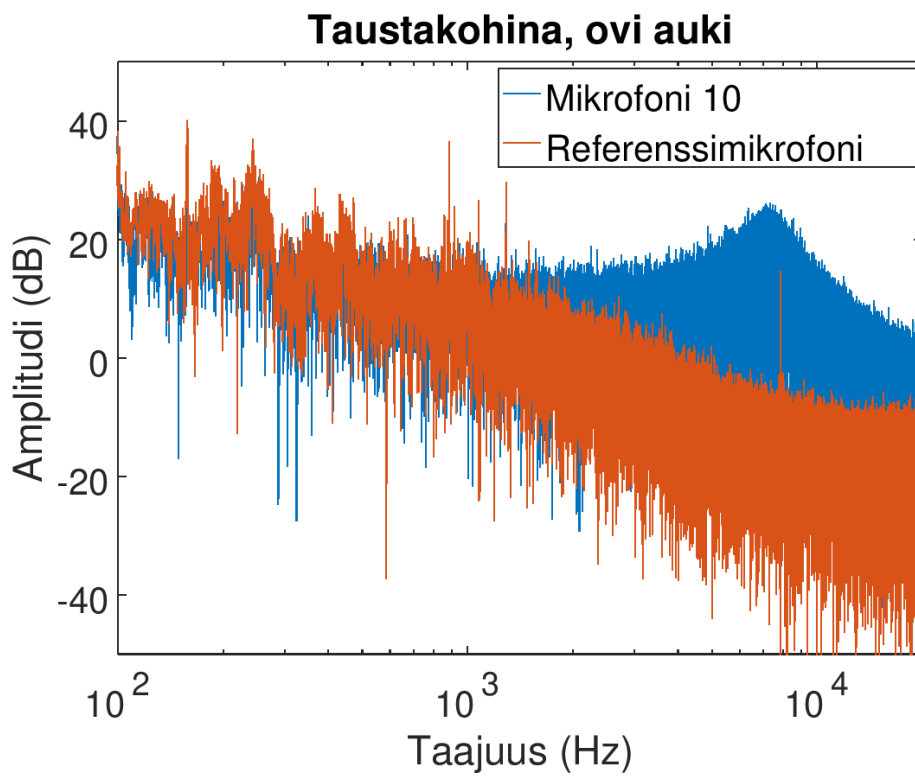
Kuva 23: Mikrofonin 2 toistettavuusmittausten amplitudivasteet $R_{amp}(f)$.



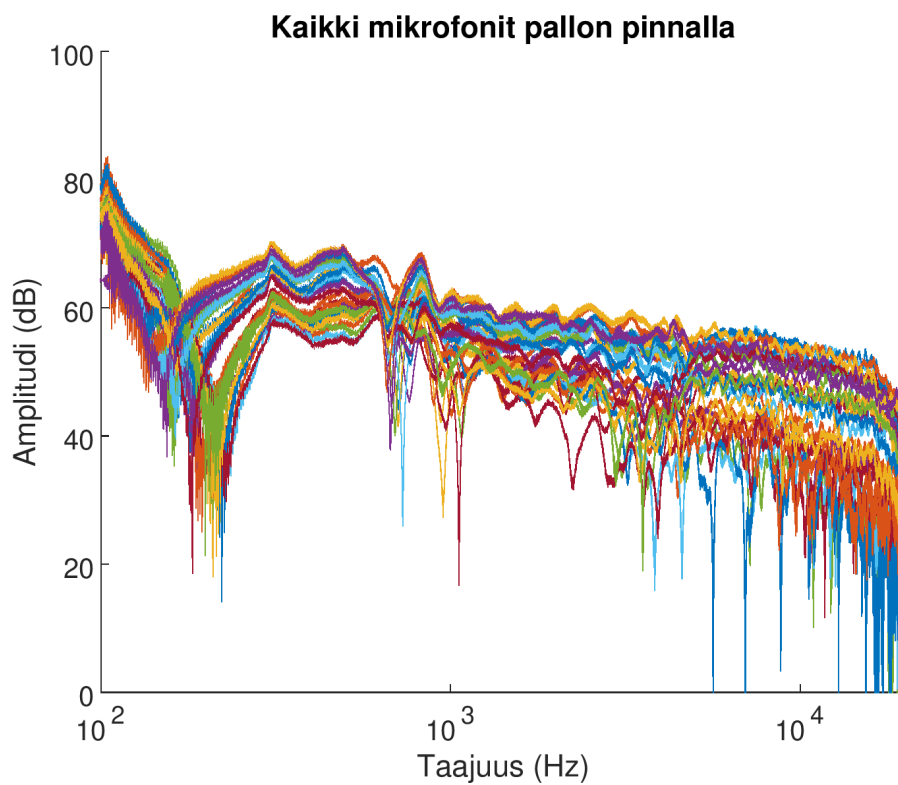
Kuva 24: Mikrofonin 2 toistettavuusmittausten vaihevasteet $R_\theta(f)$.



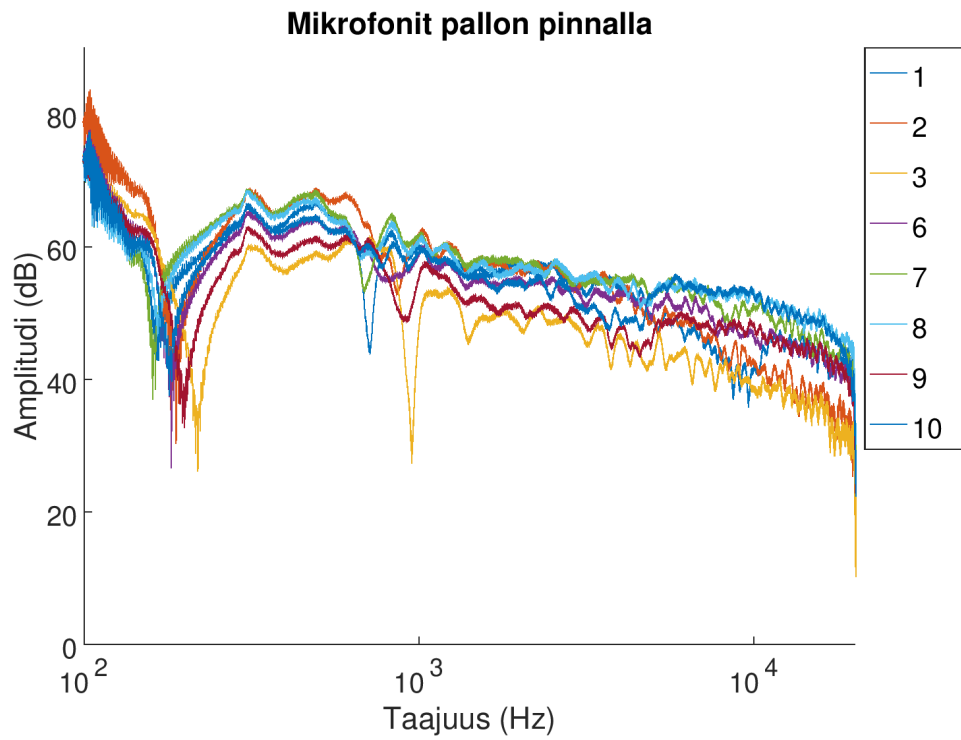
Kuva 25: Referenssimikrofonin ja mikrofonin 10 taustakohinasignaalit $S_{\text{dB,kohina}}(f)$.



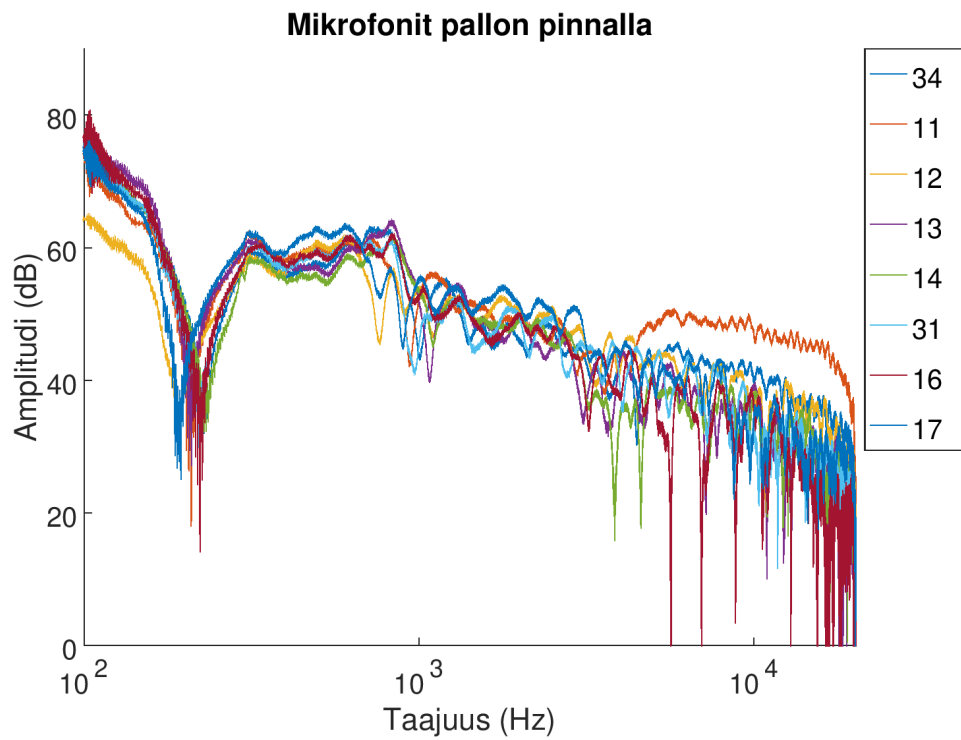
Kuva 26: Referenssimikrofonin ja mikrofonin 10 taustakohinasignaalit $S_{\text{dB,kohina}}(f)$, kun äänieristetyin laatikon ovi oli auki.



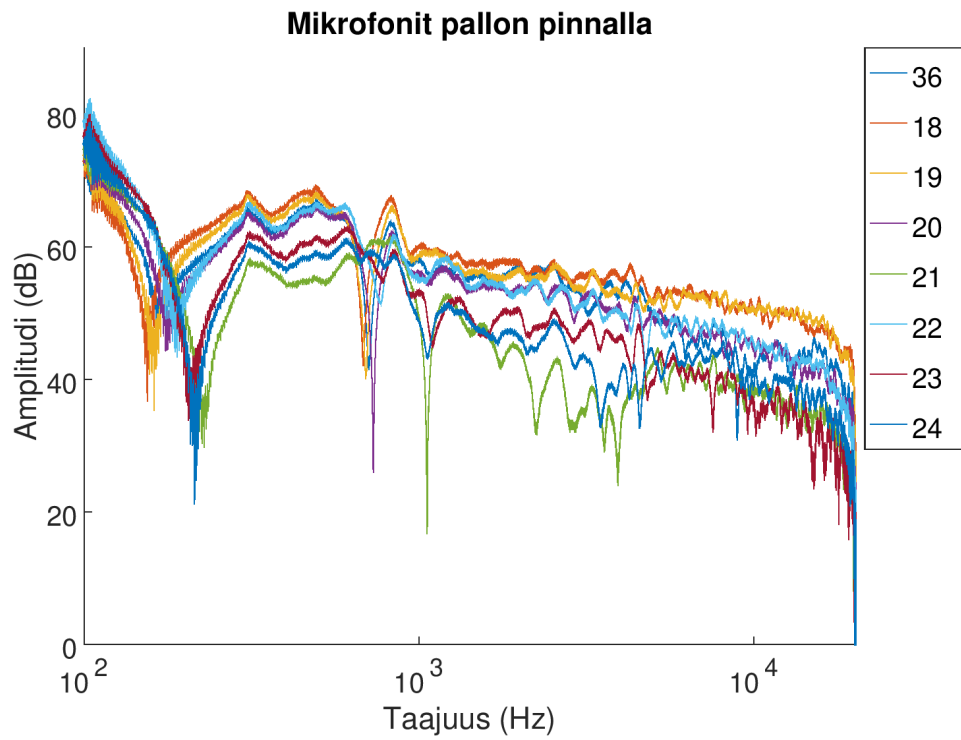
Kuva 27: Pallomaisen mikrofonimatriisin mikrofonien signaalit.



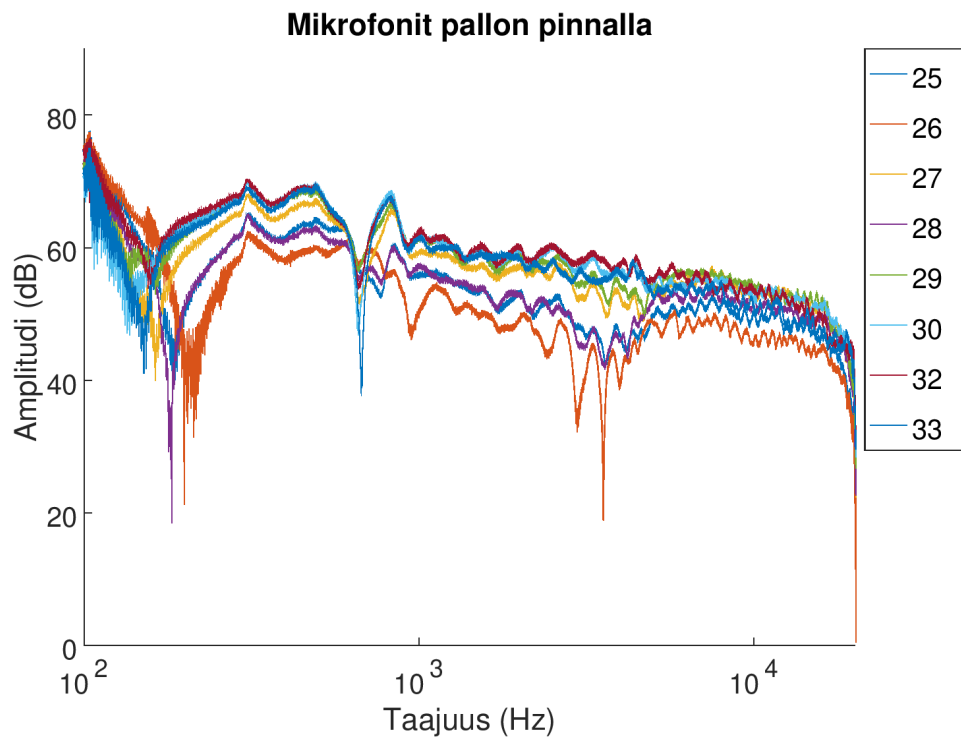
Kuva 28: Mikrofonien 1–3 ja 6–10 signaalit pallon pinnalla.



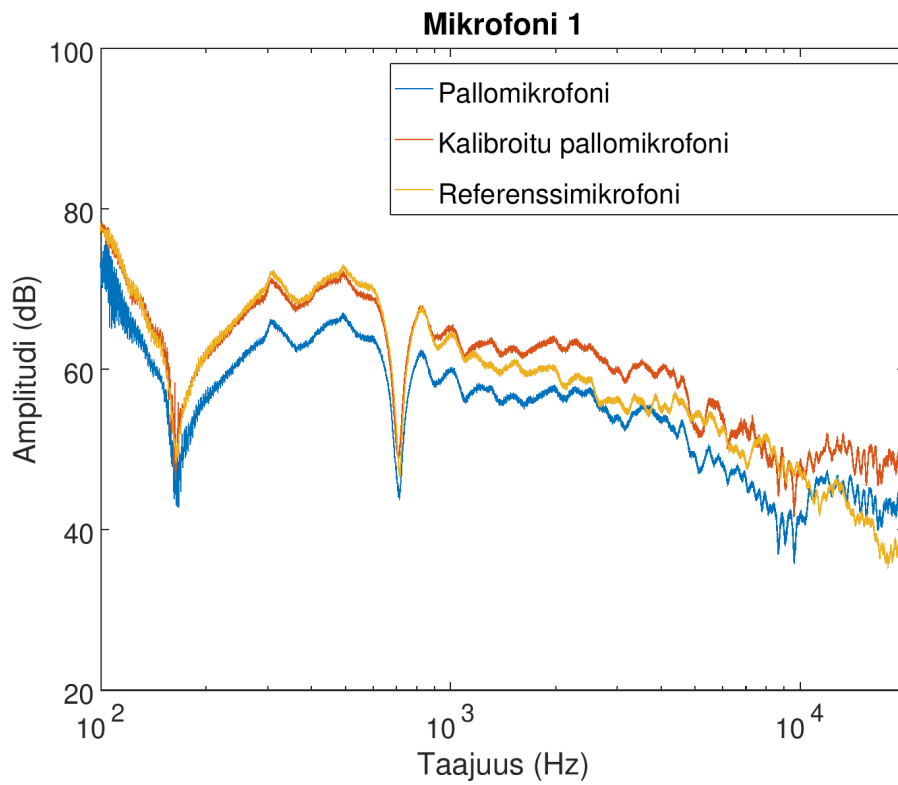
Kuva 29: Mikrofonien 34, 11–14, 31 ja 16–17 signaalit pallon pinnalla.



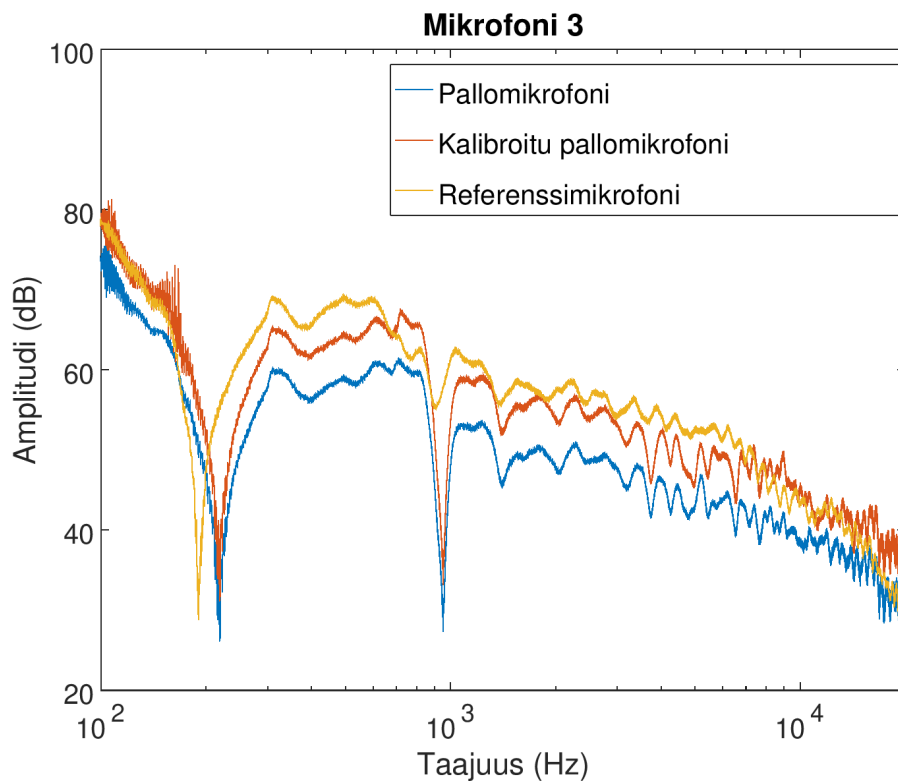
Kuva 30: Mikrofonien 36 ja 18–24 signaalit pallon pinnalla.



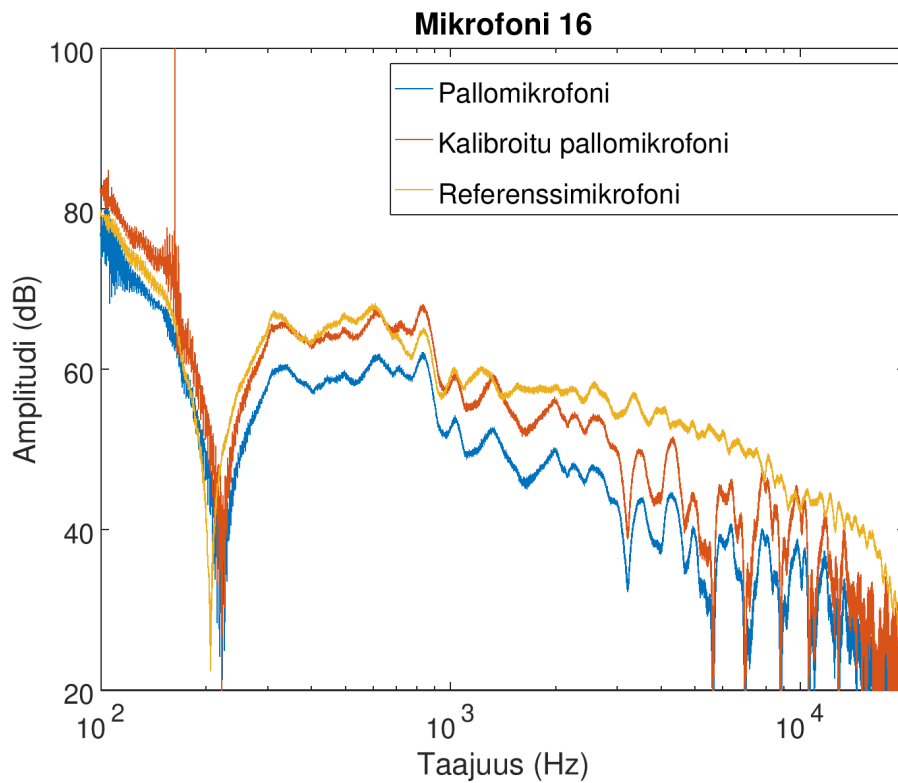
Kuva 31: Mikrofonien 25–30 ja 32–33 signaalit pallon pinnalla.



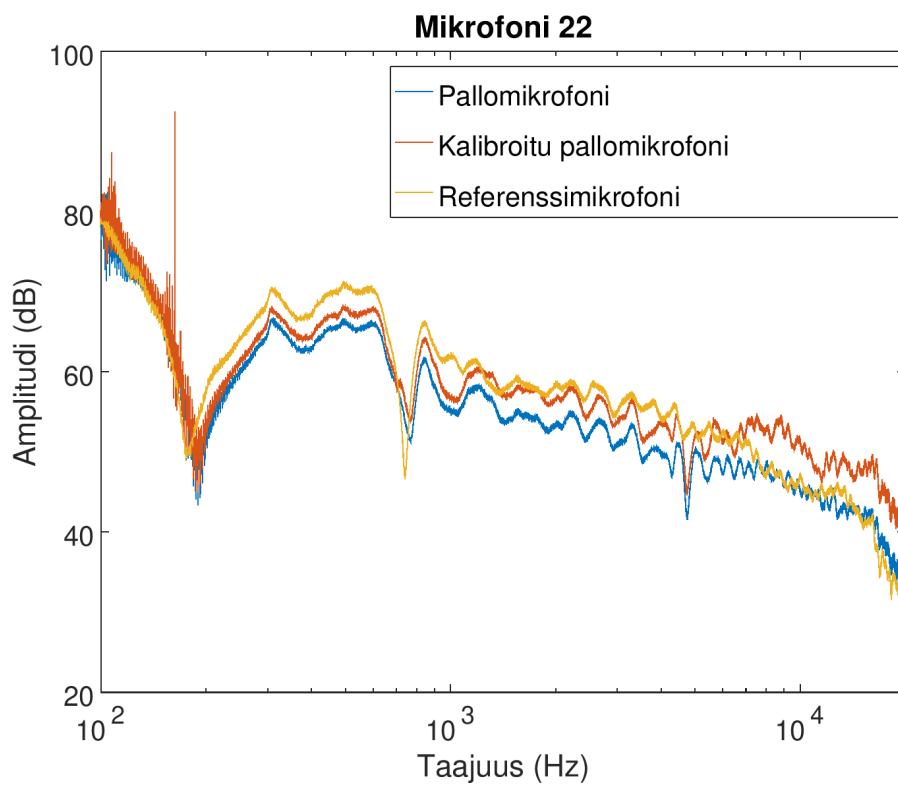
Kuva 32: Referenssimikrofonin signaali $S_{dB,ref}$, mikrofoniin 1 signaali $S_{dB,1}$ ja mikrofoniin 1 kalibroitu signaali $S_{dB,1,kalib}$.



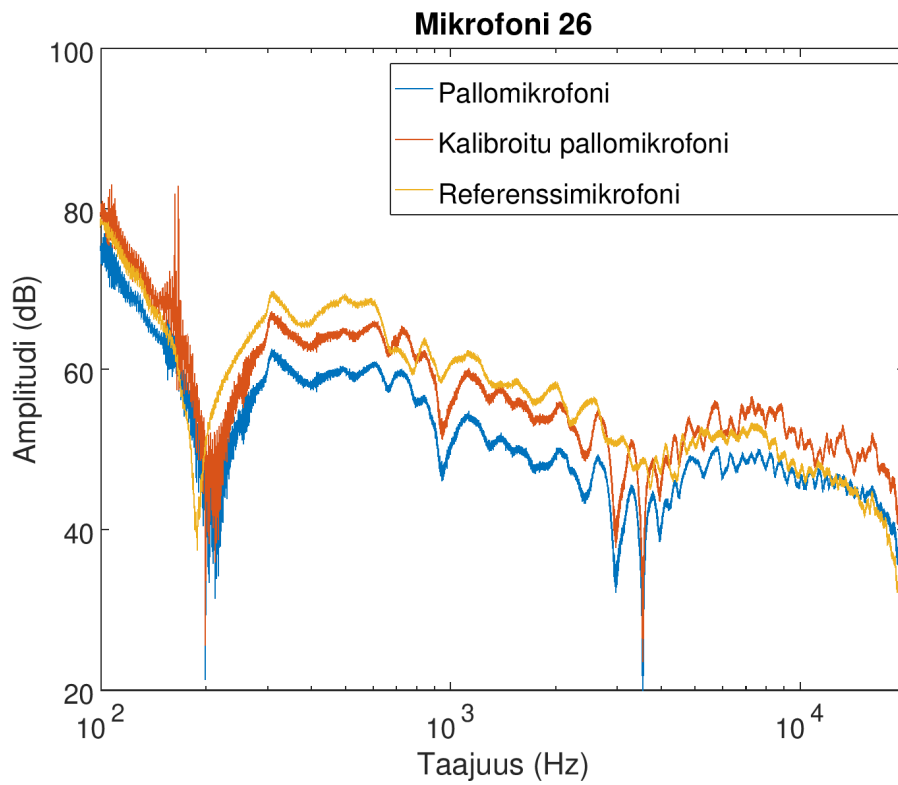
Kuva 33: Referenssimikrofonin signaali $S_{dB,ref}$, mikrofoniin 3 signaali $S_{dB,3}$ ja mikrofoniin 3 kalibroitu signaali $S_{dB,3,kalib}$.



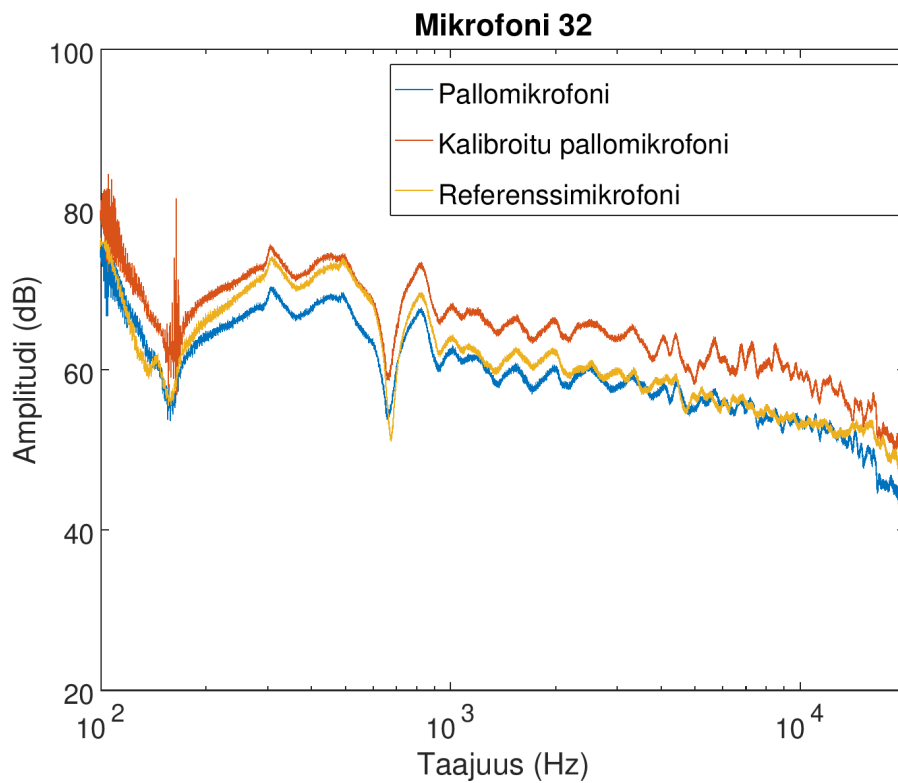
Kuva 34: Referenssimikrofonin signaali $S_{dB,ref}$, mikrofoniin 16 signaali $S_{dB,16}$ ja mikrofoniin 16 kalibroitu signaali $S_{dB,16,kalib}$.



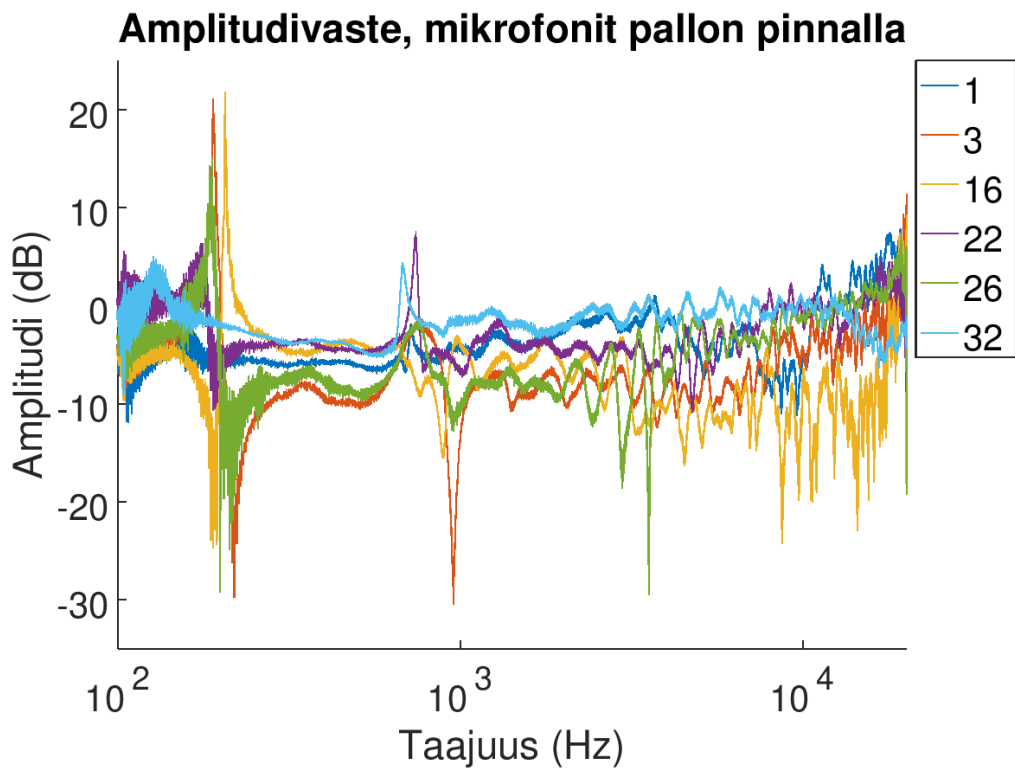
Kuva 35: Referenssimikrofonin signaali $S_{dB,ref}$, mikrofoniin 22 signaali $S_{dB,22}$ ja mikrofoniin 22 kalibroitu signaali $S_{dB,22,kalib}$.



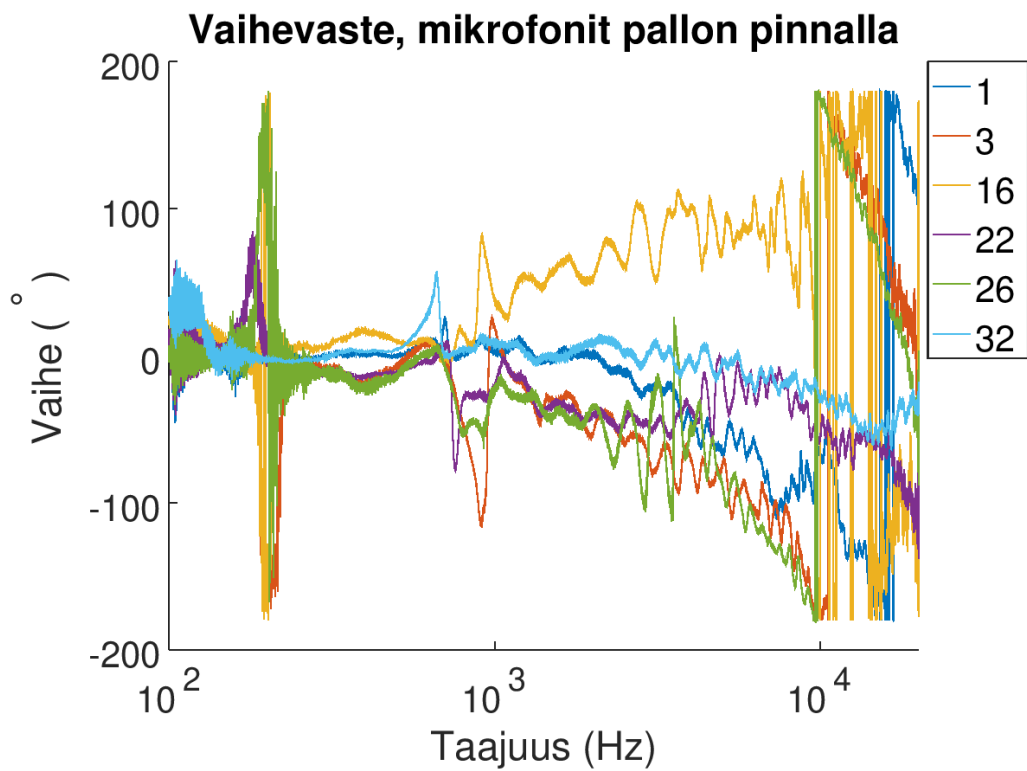
Kuva 36: Referenssimikrofonin signaali $S_{dB,ref}$, mikrofonin 26 signaali $S_{dB,26}$ ja mikrofonin 26 kalibroitu signaali $S_{dB,26,kalib}$.



Kuva 37: Referenssimikrofonin signaali $S_{dB,ref}$, mikrofonin 32 signaali $S_{dB,32}$ ja mikrofonin 32 kalibroitu signaali $S_{dB,32,kalib}$.



Kuva 38: Pallon pinnalla olevien kalibroittujen mikrofonien amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



Kuva 39: Pallon pinnalla olevien kalibroittujen mikrofonien vaihevasteet $R_{\theta}(f)$.

6 Pohdinta

Kuvasta 18 ja liitteen A kuvista 40–46 havaitaan, että mikrofonien signaalien amplitudeissa on merkittävä vaimenemispiikki noin 162 Hz:n kohdalla ja lisäksi pienempi piikki noin 700 Hz:n kohdalla. Nämä piikit johtunevat todennäköisesti kaiuttimen suuntakuviosta, sillä kaiutin oli melko lähellä mikrofoneja. Vastaavat piikit heijastuvat edelleen mikrofonien amplitudi- ja vaihevasteisiin (kuvat 19 ja 20 sekä 47–60). Mikrofonien amplitudivaste on valtaosalle mikrofoneista noin -5 dB referenssimikrofoniin verrattuna. Liitteen A kuvasta 53 nähdään, että mikrofonin 35 amplitudivaste on 100 ja 1000 hertsin välillä muita mikrofoneja parempi, mutta sitä korkeammilla taajuuksilla huonompi, joten mikrofonin 35 ei kiinnitetty mikrofonimatriisiin. Kuvista 20 ja 54–60 nähdään, että vaihevaste kääntyy nopeasti kaikilla mikrofoneilla noin 162 Hz:n kohdalla. Lisäksi kuvasta 55 havaitaan, että mikrofonien 4 ja 5 vaihevasteet eroavat korkeilla taajuuksilla muiden mikrofonien vaihevasteista. Samoin kuvasta 60 nähdään, että mikrofonin 35 vaihevaste eroaa muiden mikrofonien vaihevasteesta.

Mikrofonien toistettavuusmittauksien perusteella mittausten toistettavuus on varsin hyvä. Referenssimikrofonin toistettavuusmittauksille (kuva 21) havaitaan, että referenssimikrofonin signaalit ovat varsin samanlaisia toistettavuudeltaan. Myös mikrofonille 2 suoritettujen toistettavuusmittausten (kuva 22) perusteella toistettavuus on hyvä. Amplitudivasteeltaan mikrofonin 2 mittaukset (kuva 23) ovat samankaltaisia. Kuvassa 24 esitetyistä mikrofonin 2 vaihevasteista nähdään, että vaihevasteissa on vaihtelua etenkin yli 8500 Hz:n taajuuksilla. Mikrofonin 2 vaihevaste ei välttämättä ole saatu toistettavuusmittauksissa täysin samaan asentoon eri mittauskerroilla ja pienetkin asennon muutokset ovat vaikuttaneet vaihevasteeseen korkeammilla taajuuksilla.

Taustakohinasignaaleista kuvassa 25 havaitaan, että referenssimikrofonille äänieristetyin laatikon taustakohina on voimakkaampaa matalilla kuin korkeilla taajuuksilla ja voimakkuus laskee tasaisesti taajuuden kasvaessa. Sen sijaan mikrofonille 10 taustakohina on taajuuden funktiona suurinpiirtein yhtä voimakasta noin 5000 hertsiin asti, jonka jälkeen voimakkuus ensin kasvaa noin 7500 hertsiin asti ja sen jälkeen pienenee. Matalilla taajuuksilla referenssimikrofonin taustakohina vaikuttaisi olevan suurempaa kuin itse rakennetun mikrofonin. Tämä voi johtua siitä, että itse rakennetun mikrofonin herkkyys ei riitä tallentamaan vaimeaa äänieristetyin laatikon taustakohinaa ja taustakohinasignaalin havaitaan vain mikrofonin sisäinen kohina mitatun äänieristetyin laatikon taustakohinan sijaan.

Kun taustakohinaa mitattiin äänieristetyin laatikon oven ollessa auki (kuva 26), taustakohina oli suhteellisen samanlaista referenssimikrofonille ja mikrofonille 10 noin tuhanteen hertsiin asti. Sitä korkeammilla taajuuksilla referenssimikrofonin mittaama taustakohina pieneni edelleen ja mikrofonin 10 taustakohinassa nähdään samanlainen voimistuminen noin 5000 ja 7500 hertsin välillä kuin kuvan 25 taustakohinamittauk-

sisä.

Mikrofonimatriisimittauksissa (kuva 27) yksittäisten mikrofonien signaaleissa havaitaan odotettuja eroja. Mikrofonien amplitudeissa on suurempaa vaihtelua eri taajuuksilla kuin yksittäisten mikrofonien tilanteessa. Amplitudi-erot johtuvat siitä, että mikrofonit ovat eri sijainneissa ja asennoissa suhteessa kaiuttimeen. Lisäksi kuvasta havaitaan pallon vaikutus mikrofoneihin, sillä kiinteä pallo äänikentässä aiheuttaa amplitudin vaimenemispiikkejä eri taajuuksilla eri paikoissa oleville mikrofoneille.

Kuvasta 32 nähdään, että referenssimikrofonin signaali ja mikrofonin 1 kalibroitu signaali vastaavat hyvin toisiaan noin tuhanteen hertsiin asti, ja sitä korkeammilla taajuuksilla signaalit eroavat hieman toisistaan. Kuvasta 33 havaitaan, että referenssimikrofonin signaali ja mikrofonin 3 kalibroitu signaali eroavat toisistaan hieman, ja ensimmäinen vaimenemispiikki amplitudissa ilmenee mikrofoneille eri taajuuksilla. Tämä johtuu siitä, että mikrofoneja ei ole saatu asetettua keskenään täysin samaan paikkaan ja asentoon.

Mikrofonille 16 ja samassa paikassa olleelle referenssimikrofonille (kuva 34) pallorungon vaikutus signaalin amplitudiin havaitaan selkeästi: pallossa olevan mikrofonin amplitudissa esiintyy useita piikkejä korkeilla taajuuksilla, mutta referenssimikrofonilla näitä piikkejä ei esiinny. Mikrofonin 16 sijainti pallon vastakkaisella puolella kuin kaiutin, joten sille pallon aiheuttama vaikutus signaalin oli suurempi kuin muille mikrofoneille. Alle tuhannen hertsin taajuuksilla referenssimikrofonin signaali ja mikrofonin 16 kalibroitu signaali vastaavat hyvin toisiaan. Kuvan 33 tavoin myös kuvasta 34 nähdään, että mikrofoneja ei ole saatu asetettua täysin samaan paikkaan ja asentoon ja ensimmäinen piikki amplitudissa esiintyy hieman eri taajuuksilla. Myös kuvista 35 ja 36 voidaan havaita vastaava amplitudin vaimenemispiikin taajuusero.

Mikrofonin 22 kalibroitu signaali ja referenssimikrofonin signaali (kuva 35) vastaavat toisiaan kohtuullisen hyvin noin 7000 hertsiin asti, mutta sitä korkeammilla taajuuksilla signaaleissa on enemmän eroa. Kuvasta 36 nähdään jälleen pallorungon vaikutus signaaliin ja mikrofonin 26 signaalissa esiintyy vaimenemispiikki noin 3550 hertsin kohdalla. Mikrofonin 32 kalibroitu signaali ja referenssimikrofonin signaali (kuva 37) vastaavat melko hyvin toisiaan tuhanteen hertsiin asti, mutta taajuuden kasvaessa signaaleissa on enemmän eroa.

Mikrofonimatriisin eri puolilta poimittujen mikrofonien amplitudivasteet (kuva 38) ovat melko erilaisia keskenään. Mikrofonit ovat eri puolilla palloa ja eri asennoissa, joten mikrofonimatriisin pallorunko vaikuttaa amplitudivasteisiin eri tavoin eri mikrofoneille. Myös vaihevasteissa (kuva 39) havaitaan vaihtelua, mikä selittyy mikrofonien sijainneilla ja asennoilla.

7 Yhteenveto

Tutkielmassa suunniteltiin ja rakennettiin 3D-tulostetusta pallorungosta ja 32 mikrofonista koostuva pallomainen mikrofonimatriisi. Yksittäiset mikrofonit kalibroitiin äänieristetyssä laatikossa vertailumenetelmällä referenssimikrofonin avulla. Mikrofoneille laskettiin niiden taajuusvasteet sekä edelleen amplitudi- ja vaihevasteet. Lisäksi sekä itse rakennettujen mikrofonien että referenssimikrofonin taustakohina mitattiin ja niille tehtiin toistettavuusmittauksia. Kalibroidut mikrofonit asennettiin pallorunkoon ja pallorungon vaikutusta mikrofonien signaaleihin tutkittiin vertailemalla pallorungon eri puolilla sijaitsevien mikrofonien amplitudivastetta samassa paikassa sijaitsevaan referenssimikrofoniin.

Kalibrointisignaaleista laskettiin mikrofonien amplitudi- ja vaihevasteet. Amplitudivaste oli lähes kaikille mikrofoneille jokseenkin sama, noin -5 dB. Mikrofoneja, joiden amplitudi- tai vaihevaste ei vastannut muiden mikrofonien vasteita, ei käytetty mikrofonimatriisissa. Mittausten toistettavuus oli toistettavuusmittauksien perusteella varsin hyvä.

Mikrofonimatriisimittauksista pystyttiin havaitsemaan pallorungon vaikutus mittauksiin odotetulla tavalla. Mikrofonien amplitudisignaaleissa esiintyi vaimenemispiikkejä eri taajuuksilla riippuen mikrofonien paikoista ja asennoista. Vertailemalla mikrofonimatriisissa olevien mikrofonien signaaleja referenssimikrofonin signaaliin, havaittiin, että samassa paikassa olevien mikrofonien signaalit eroavat toisistaan ja äänikentässä olevan pallorungon vaikutus voidaan siten havaita signaaleista. Mikrofonien signaaleja verrattiin lisäksi myös kyseisten mikrofonien kalibroituihin signaaleihin. Havaittiin, että kalibroidut signaalit vastasivat kalibroimattomia signaaleja paremmin referenssimikrofonien signaaleja niillä taajuusalueilla, joilla pallorungon läsnäolo äänikentässä ei vaikuttanut amplitudeihin.

Viitteet

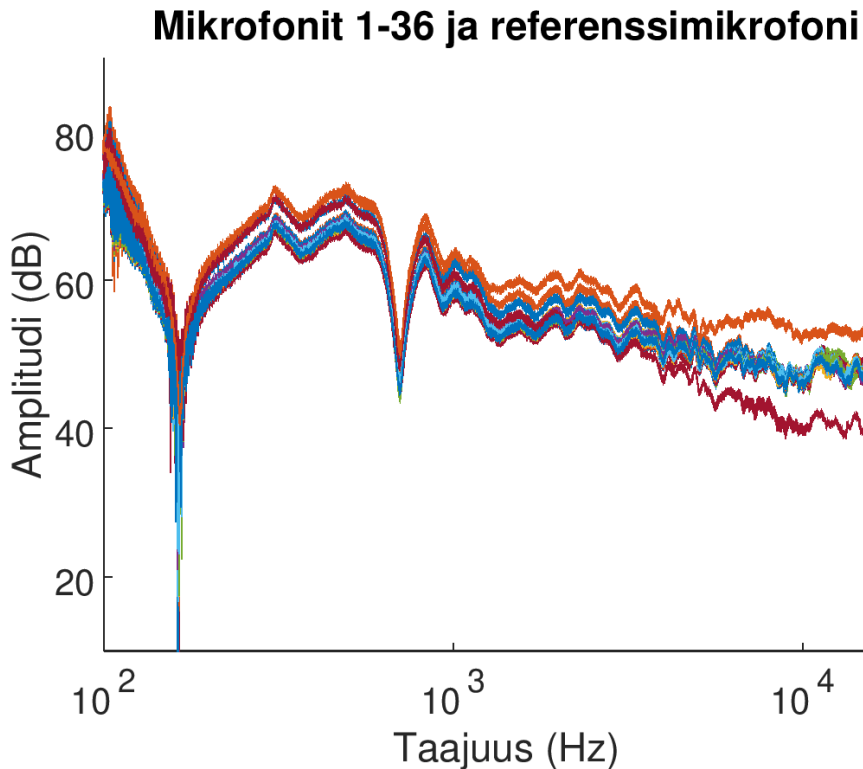
- [1] T. D. Abhayapala ja D. B. Ward. Theory and design of high order sound field microphones using spherical microphone array. *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, 2002.
- [2] D. Arteaga. Introduction to Ambisonics. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/280010078_Introduction_to_Ambisonics.
- [3] S. Barrera-Figueroa, A. Torras-Rosell, K. Rasmussen, F. Jacobsen, V. Cutanda-Henrriquez ja P. Juhl. A practical implementation of microphone free-field comparison calibration according to the standard IEC 61094-8. *41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012 Proceedings Acoustical Society of America*, 2012.
- [4] G. J. Bennett, J. Mahon, S. Hunt ja C. Harris. Design of an Electret Based Measurement Microphone. *26th International Manufacturing Conference (IMC26)*, s. 411–418, 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/266186279_DESIGN_OF_AN_ELECTRET_BASED_MEASUREMENT_MICROPHONE.
- [5] S. Bertet, J. Daniel, E. Parizet, L. Gros ja O. Warusfel. Investigation of the perceived spatial resolution of higher order Ambisonics sound fields: A subjective evaluation involving virtual and real 3D microphones. *Audio Engineering Society Conference: 30th International Conference: Intelligent Audio Environments*, 2007.
- [6] I. H. Chan. Swept Sine Chirps for Measuring Impulse Response. *Stanford Research Systems*, 2011.
- [7] M. C. T. Chan. *Theory and Design of Higher Order Sound Field Recording*. Väitöskirja, The Australian National University, 2003.
- [8] D. G. Ćirić, A. Đorđević ja M. Ličanin. Analysis of Effects of Spherical Microphone Array Physical Parameters Using Simulations. *Electronics and Energetics*, 26(2):107–119, 2013.
- [9] J. Daniel, J. Bernard Rault ja J. Dominique Polack. Ambisonics Encoding of Other Audio Formats for Multiple Listening Conditions. *AES 105th Conv.*, 1998.
- [10] J. Eargle. *The Microphone Book*. Focal Press, toinen laitos, 2005.
- [11] M. Frank, F. Zotter ja A. Sontacchi. Producing 3D Audio in Ambisonics. *Kirjassa Proc. of the 57th AES International Conference*, s. 1–8, 2015.
- [12] M. A. Gerzon. Periphony: With-height sound reproduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 21(1):2–10, 1973.
- [13] B. N. Gover. Spherical microphone arrays for analysis of sound fields in buildings. *Canadian Acoustics, [S.l.]*, 34(3):104–105, 2006. URL: <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1843>.

- [14] B. N. Gover, J. G. Ryan ja M. R. Stinson. Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(5):1980–1991, 2002.
- [15] B. N. Gover, J. G. Ryan ja M. R. Stinson. Measurements of directional properties of reverberant sound fields in rooms using a spherical microphone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(4):2138–2148, 2004.
- [16] J. Granzow. Spherical 32 Channel microphone enclosure. URL: <https://plus.google.com/u/0/photos/118306044089482022916/albums/6090540284787350161>.
- [17] J. Granzow, T. O’Brien, D. Ford, Y. H. Yeh, Y. Hur, D. Mostowfi ja J. S. Abel. An open-source spherical microphone array design. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), 2015. URL: <http://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4919973>.
- [18] A. Guthrie. *Stage acoustics for musicians: A multidimensional approach using 3D ambisonic technology*. Väitöskirja, Rensselaer Polytechnic Institute, 2014.
- [19] D. Havelock, S. Kuwano ja M. Vorländer. *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Springer, 2008.
- [20] D. P. Jarrett. *Spherical Microphone Array Processing for Acoustic Parameter Estimation and Signal Enhancement*. Väitöskirja, Imperial College London, 2013.
- [21] F. Martellotta. On the use of microphone arrays to visualize spatial sound field information. *Applied Acoustics*, 74:987–1000, 2013.
- [22] J. Meyer ja G. Elko. A highly scalable spherical microphone array based on an orthonormal decomposition of the soundfield. *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2, 2002.
- [23] S. Moreau ja J. Daniel. Study of higher order ambisonic microphone. *7ème Congrès Français d’Acoustique (Joint congress CFA-DAGA ’04)*, (6):1–2, 2004.
- [24] S. Moreau, J. Daniel ja S. Bertet. 3D Sound Field Recording with Higher Order Ambisonics – Objective Measurements and Validation of a 4th Order Spherical Microphone. *120th Convention of the Audio Engineering Society*, 2006.
- [25] A. O’Donovan, R. Duraiswami ja N. A. Gumerov. Real time capture of audio images and their use with video. *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 2007.
- [26] A. O’Donovan, R. Duraiswami ja J. Neumann. Microphone Arrays as Generalized Cameras for Integrated Audio Visual Processing. Kirjassa *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007.
- [27] A. M. O’Donovan, D. N. Zotkin ja R. Duraiswami. Spherical microphone array based immersive audio scene rendering. Kirjassa *Proceedings of the 14th International Conference on Auditory Display*, 2008.

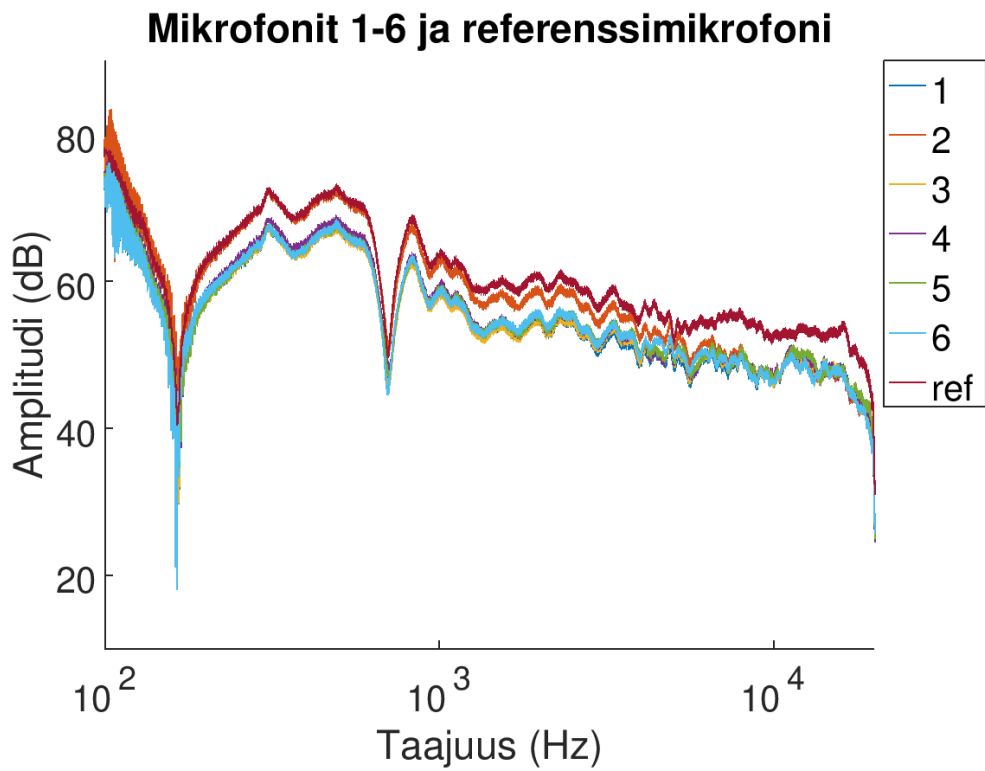
- [28] Panasonic. *Omnidirectional Back Electret Condenser Microphone Cartridge*. URL: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Panasonic%20Electronic%20Components/WM-61A.pdf>.
- [29] B. Rafaely. *Fundamentals of Spherical Array Processing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [30] SketchUp. *SketchUp: 3D Design Software*. URL: <https://www.sketchup.com/>.
- [31] I. Tashev. Gain self-calibration procedure for microphone arrays. *Multimedia and Expo, 2004. ICME '04. 2004 IEEE International Conference on*, 2:983–986, 2004. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1394367>.
- [32] P. D. Teal ja M. A. Poletti. Adaptive phase calibration of a microphone array for acoustic holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(4):2368–2376, 2010.
- [33] P. Tóth ja C. Schram. Simultaneous Calibration of Multiple Microphones for Both Phase and Amplitude in an Impedance Tube. *Archives of Acoustics*, 39(2):277–287, 2014. URL: <http://www.degruyter.com/view/j/aoa.2014.39.issue-2/aoa-2014-0032/aoa-2014-0032.xml>.
- [34] M. Vorländer. *Handbook of Engineering Acoustics. Chapter 2: Acoustic Measurements*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [35] D. N. Zotkin, R. Adelman, A. E. O’Donovan ja R. Duraiswami. Chain architecture: An efficient hardware solution for a large microphone array system. *Kirjassa Proceedings of Meetings on Acoustics*, osa 19, 2013.

A Mikrofonien kalibrointikäyrät

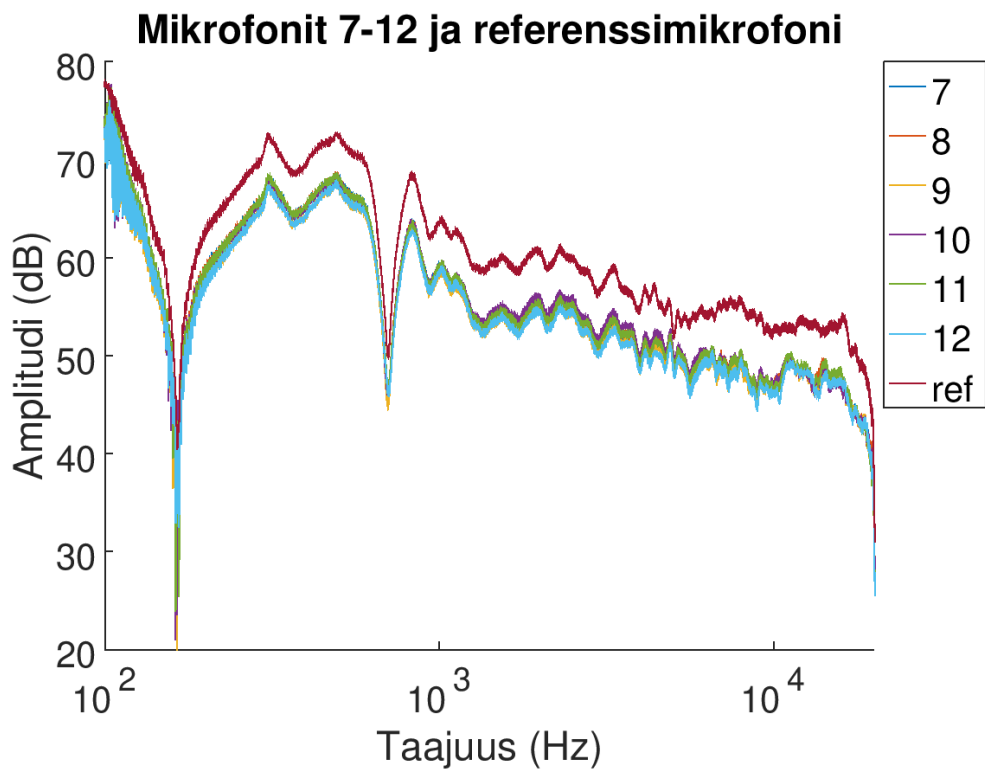
Liitteen kuvissa on esitetty kaikkien mikrofonien kalibrointikäyrät. Kuvassa 40 on esitetty kaikkien mikrofonien signaalit ja kuvissa 41–46 kussakin kuusi mikrofonia kerrallaan. Kuvissa 47 ja 48–53 on esitetty vastaavat amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$ ja kuvissa 54 ja 55–60 vastaavat vaihevasteet $R_{\theta}(f)$.



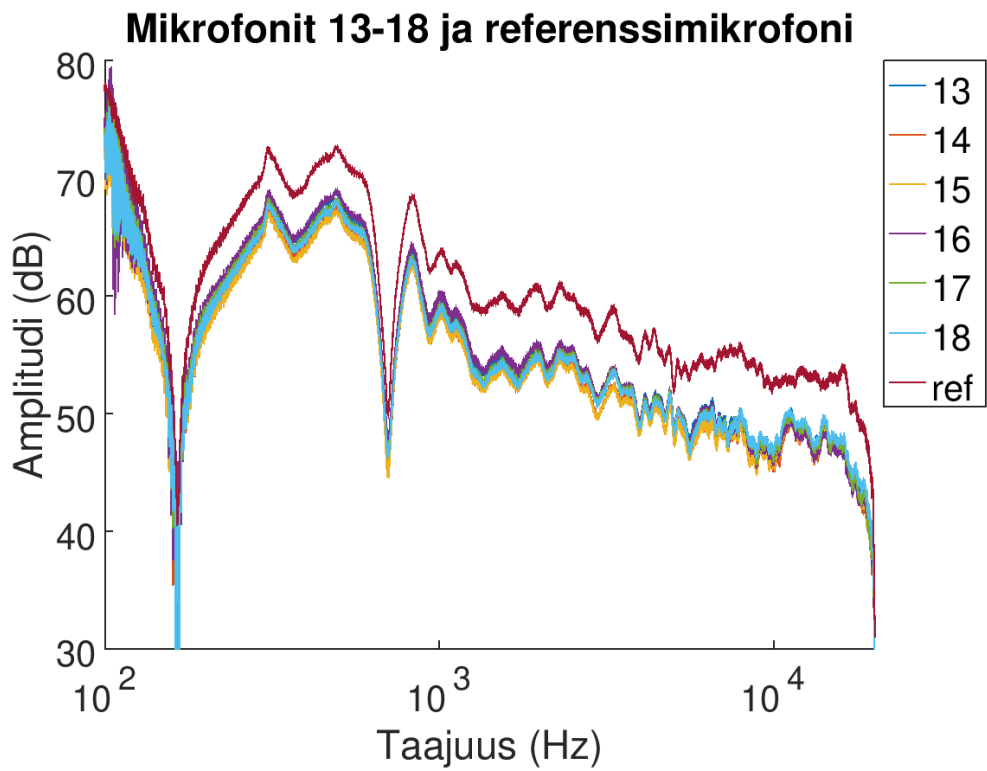
Kuva 40: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 1–36 signaalit $S_{\text{dB}}(f)$.



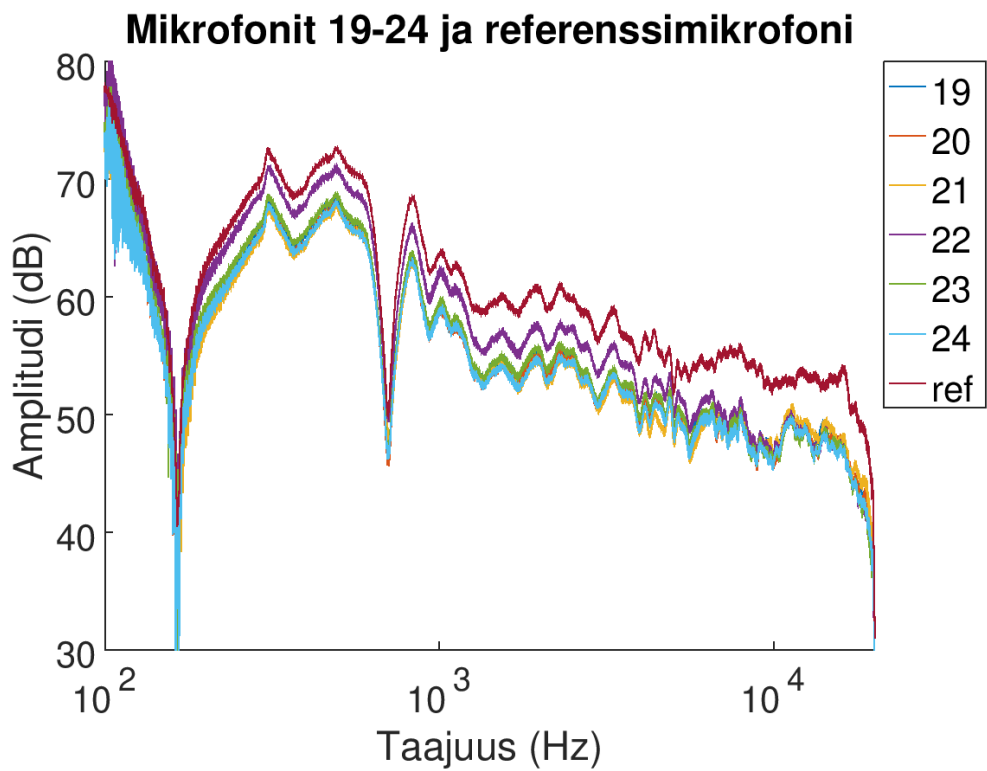
Kuva 41: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 1–6 signaalit $S_{dB}(f)$.



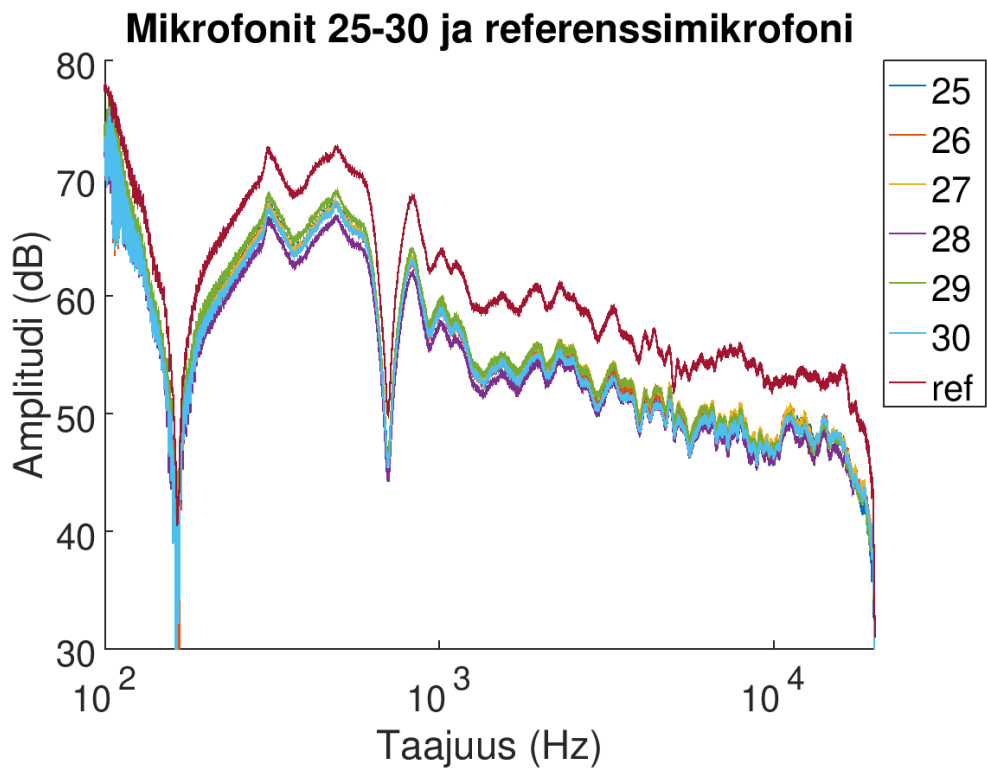
Kuva 42: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 7–12 signaalit $S_{dB}(f)$.



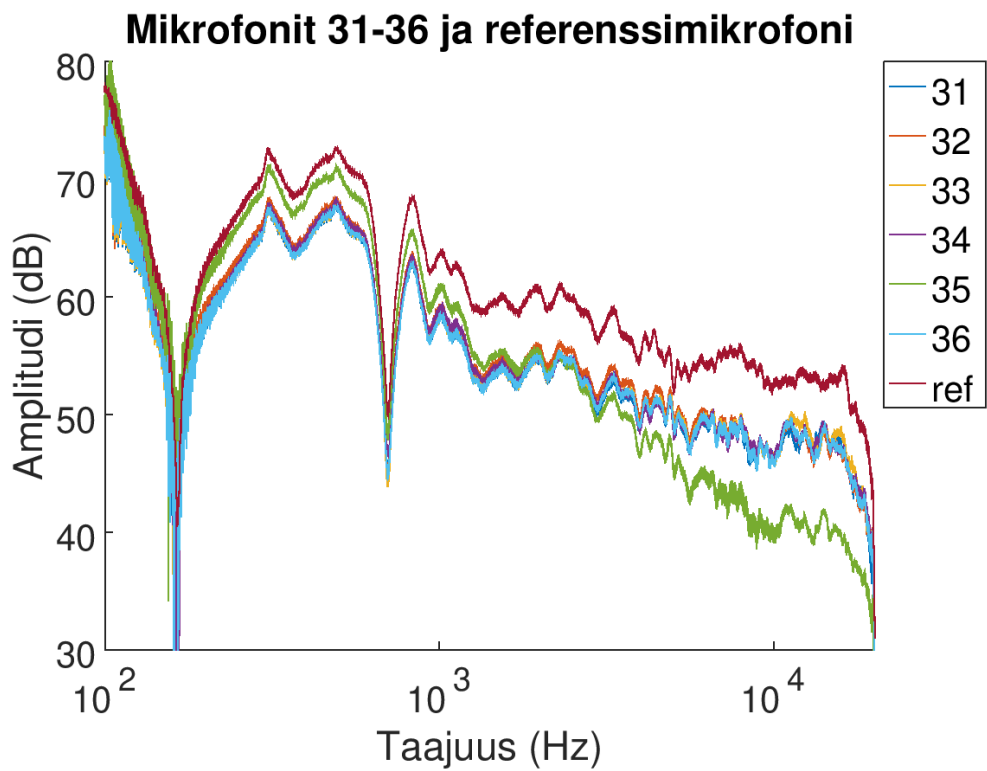
Kuva 43: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 13–18 signaalit $S_{dB}(f)$.



Kuva 44: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 19–24 signaalit $S_{dB}(f)$.

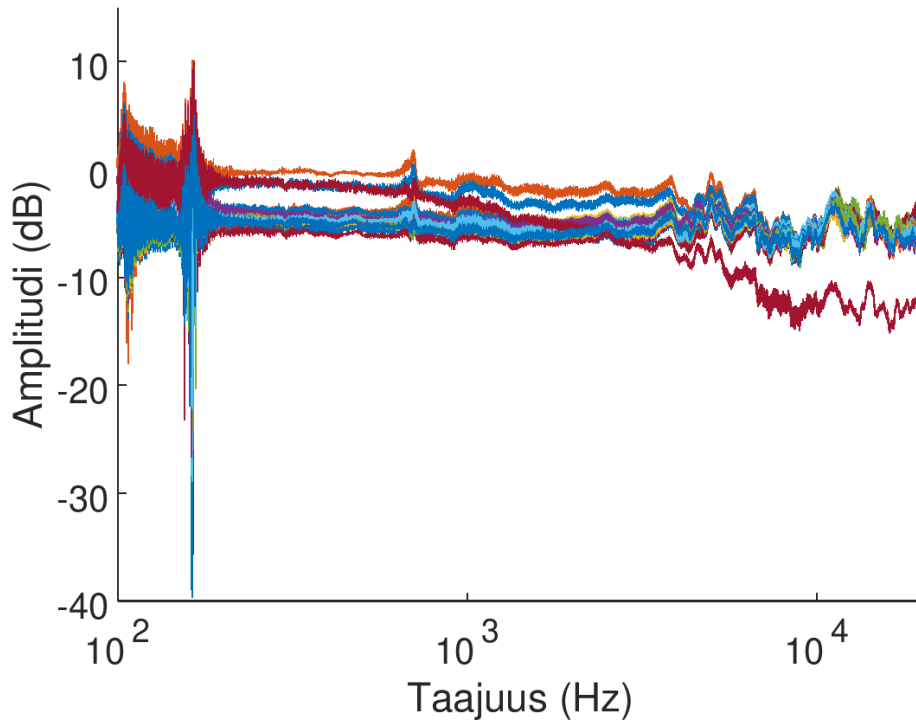


Kuva 45: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 25–30 signaalit $S_{dB}(f)$.



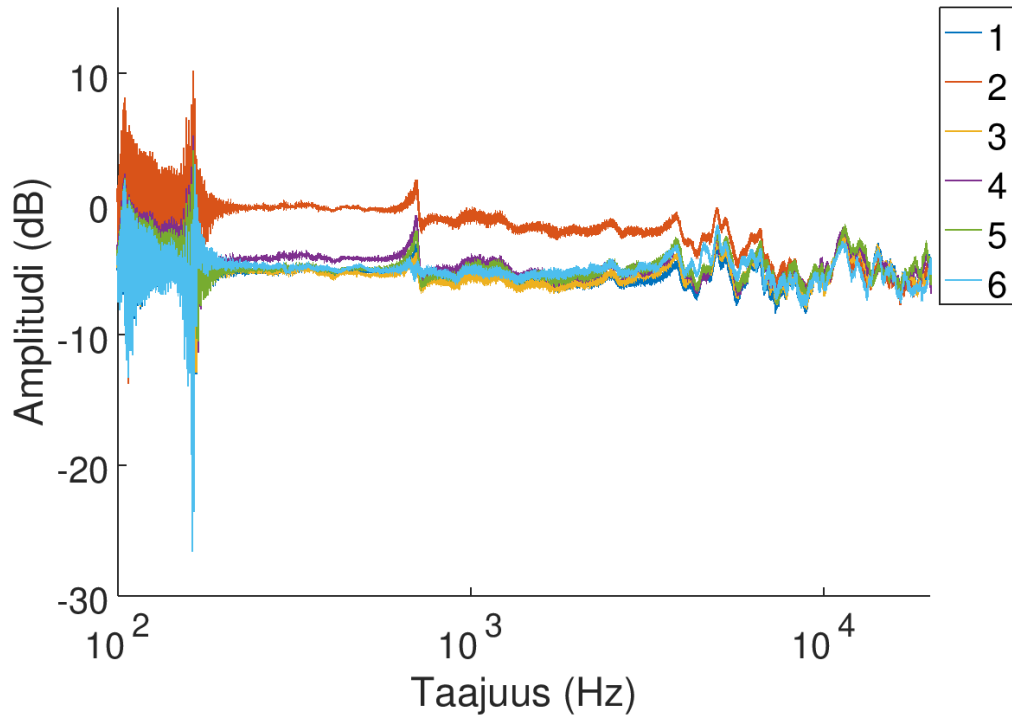
Kuva 46: Referenssimikrofonin ja mikrofonien 31–36 signaalit $S_{dB}(f)$.

Amplitudivaste, mikrofonit 1-36

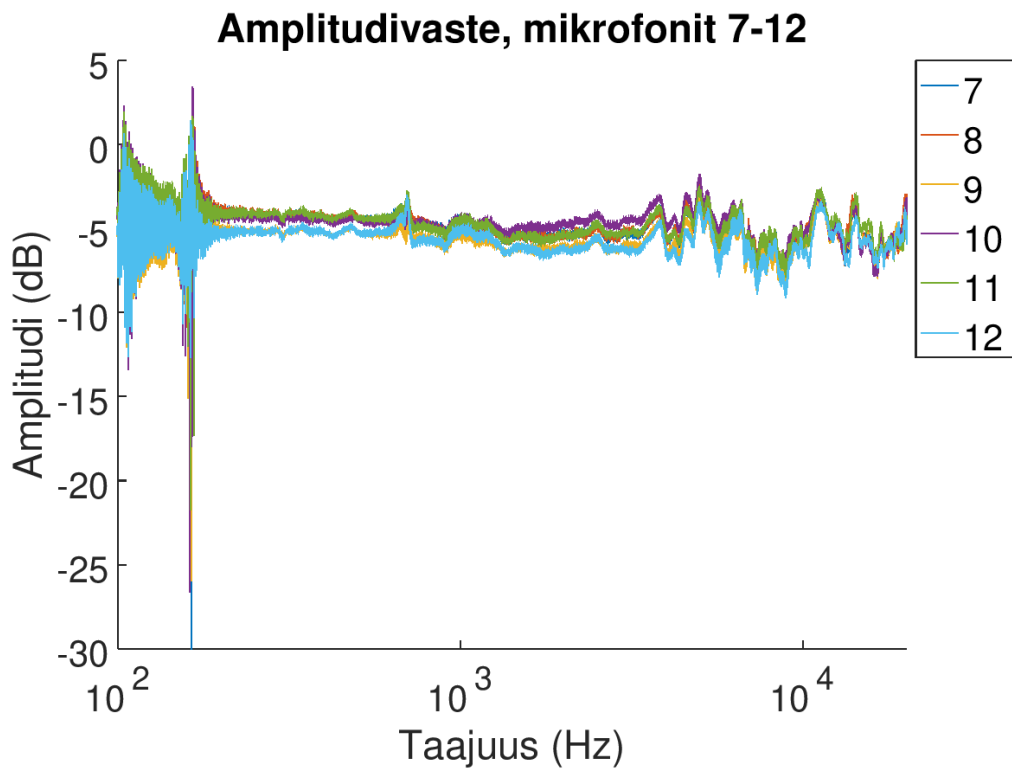


Kuva 47: Mikrofonien 1–36 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.

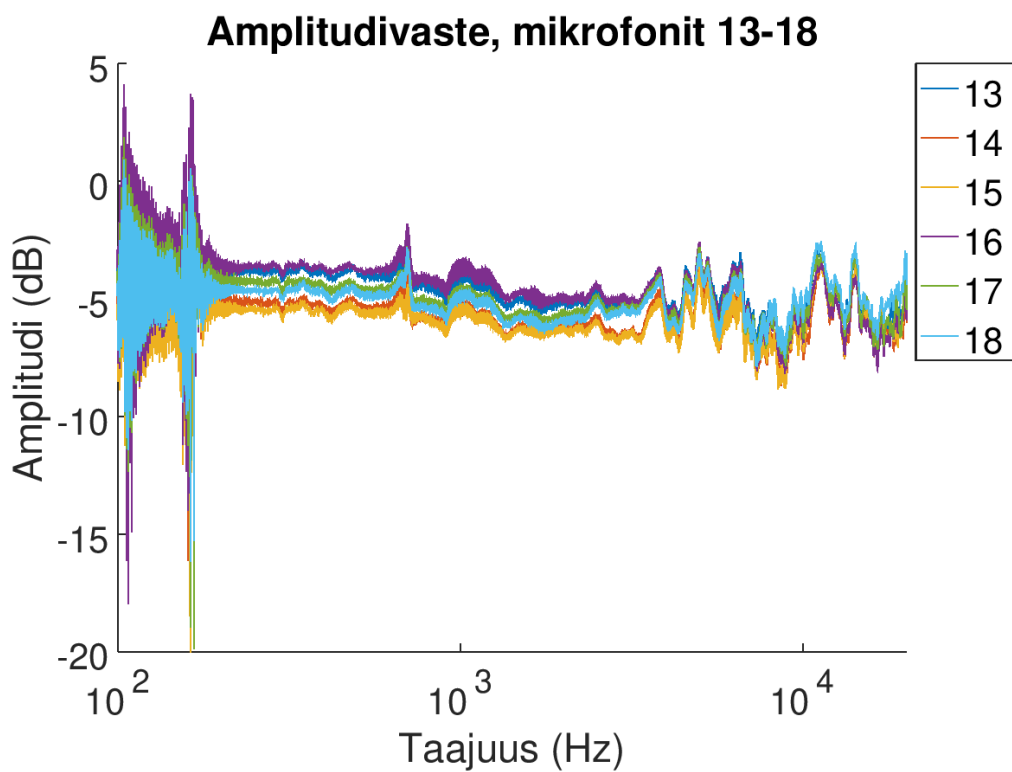
Amplitudivaste, mikrofonit 1-6



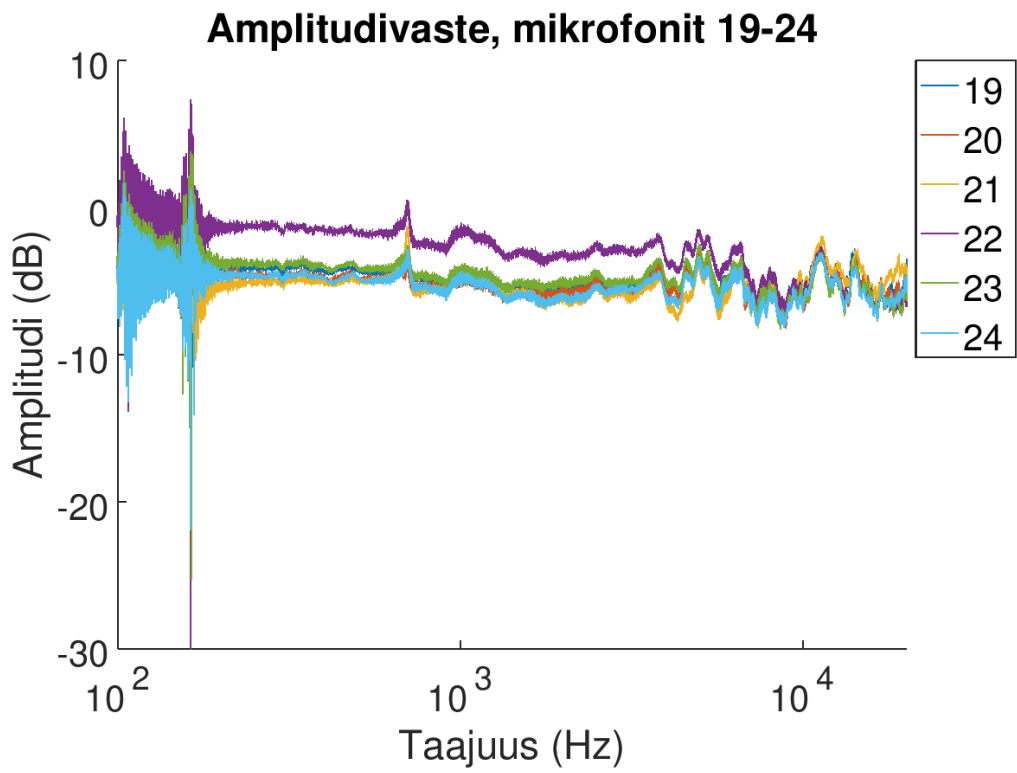
Kuva 48: Mikrofonien 1–6 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



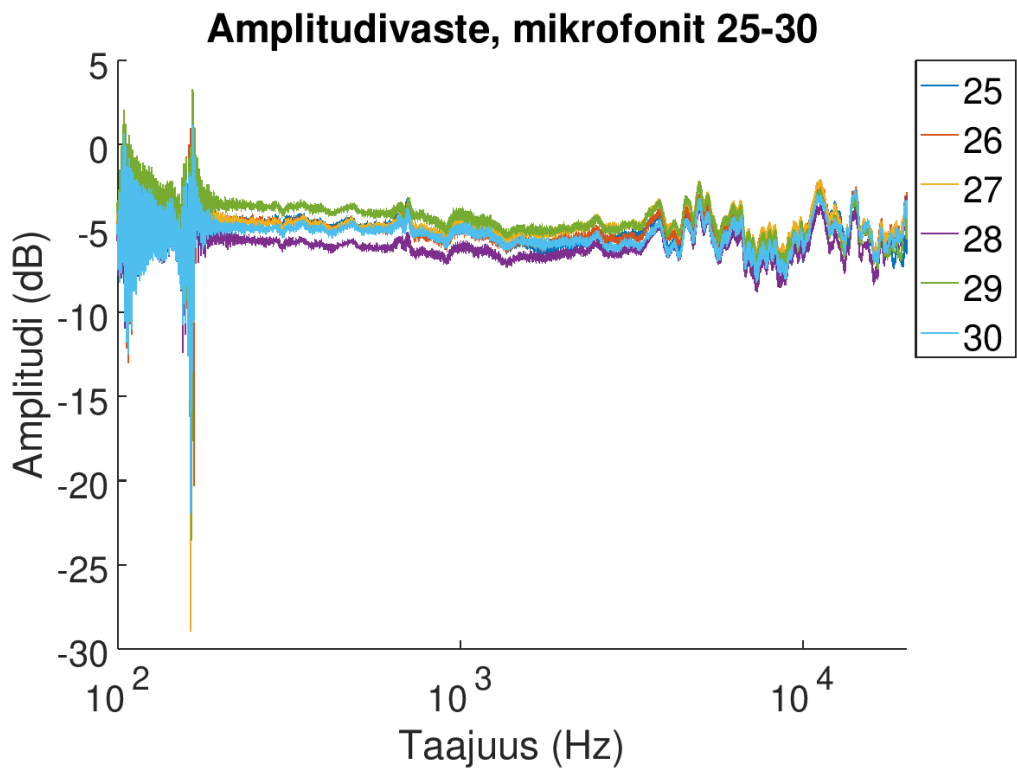
Kuva 49: Mikrofonien 7–12 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



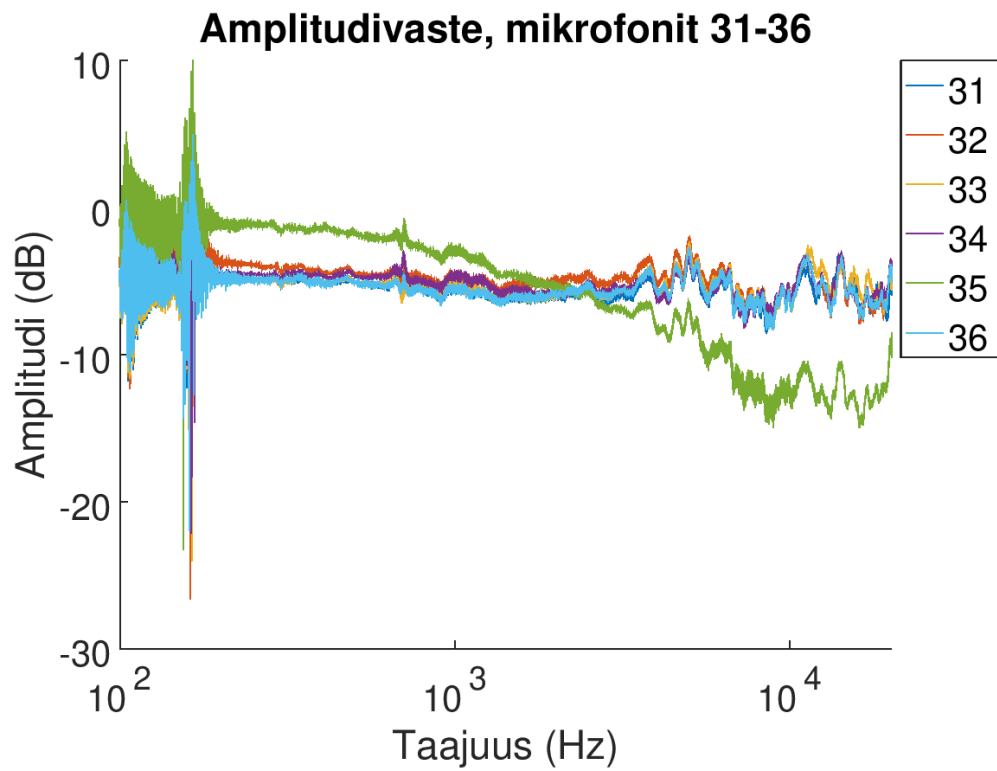
Kuva 50: Mikrofonien 13–18 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



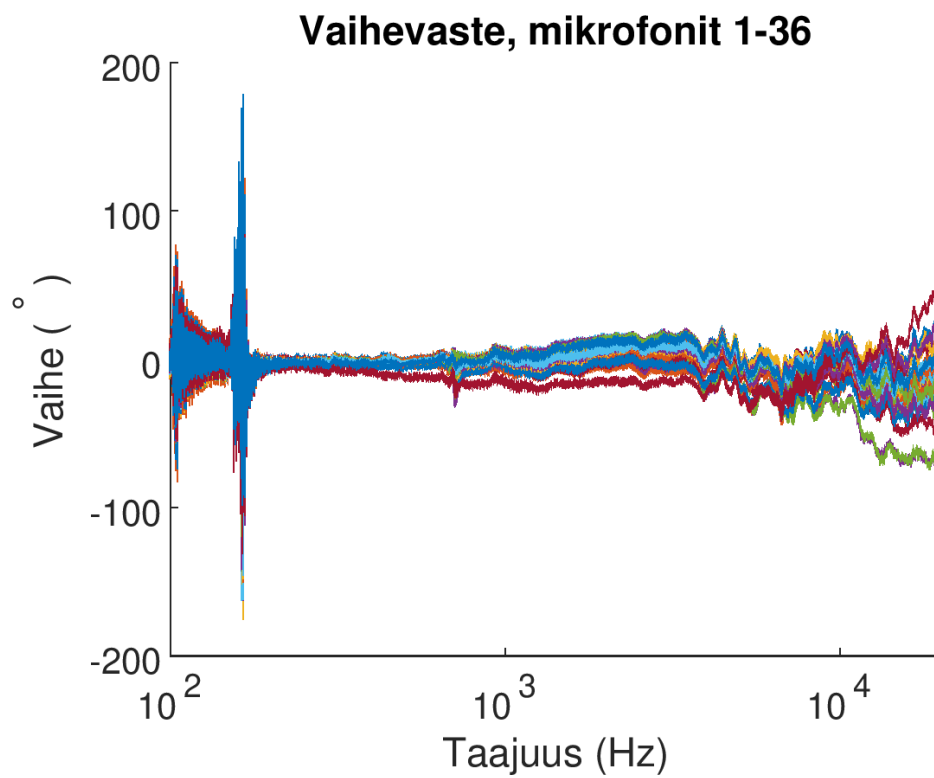
Kuva 51: Mikrofonien 19–24 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



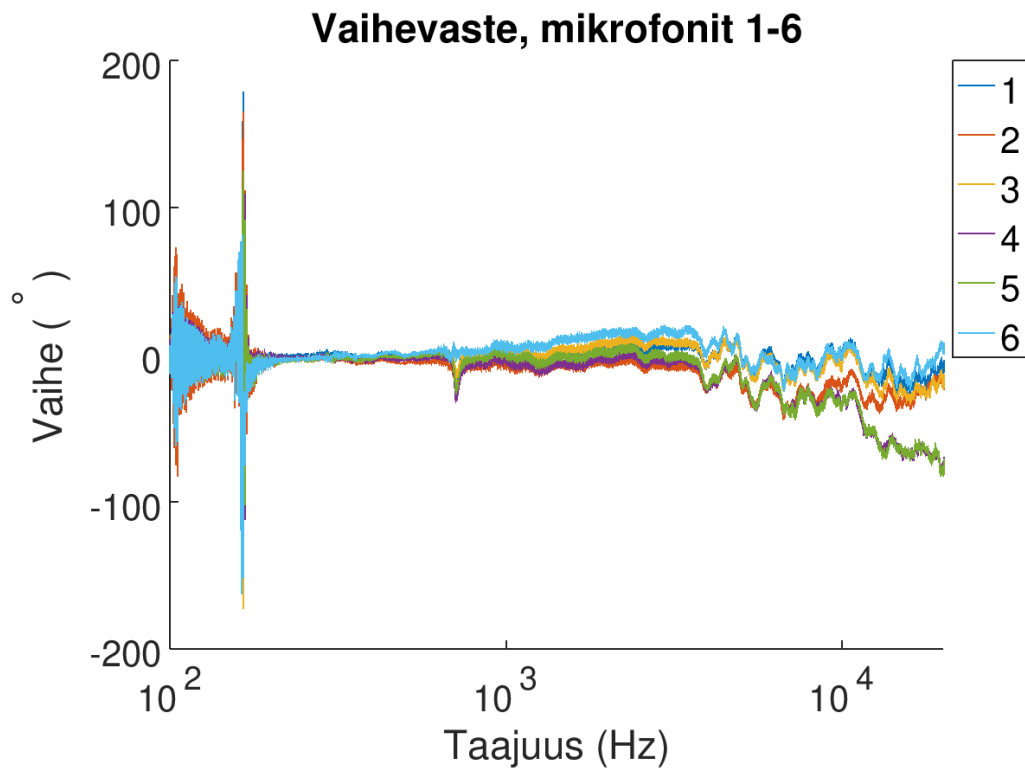
Kuva 52: Mikrofonien 25–30 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



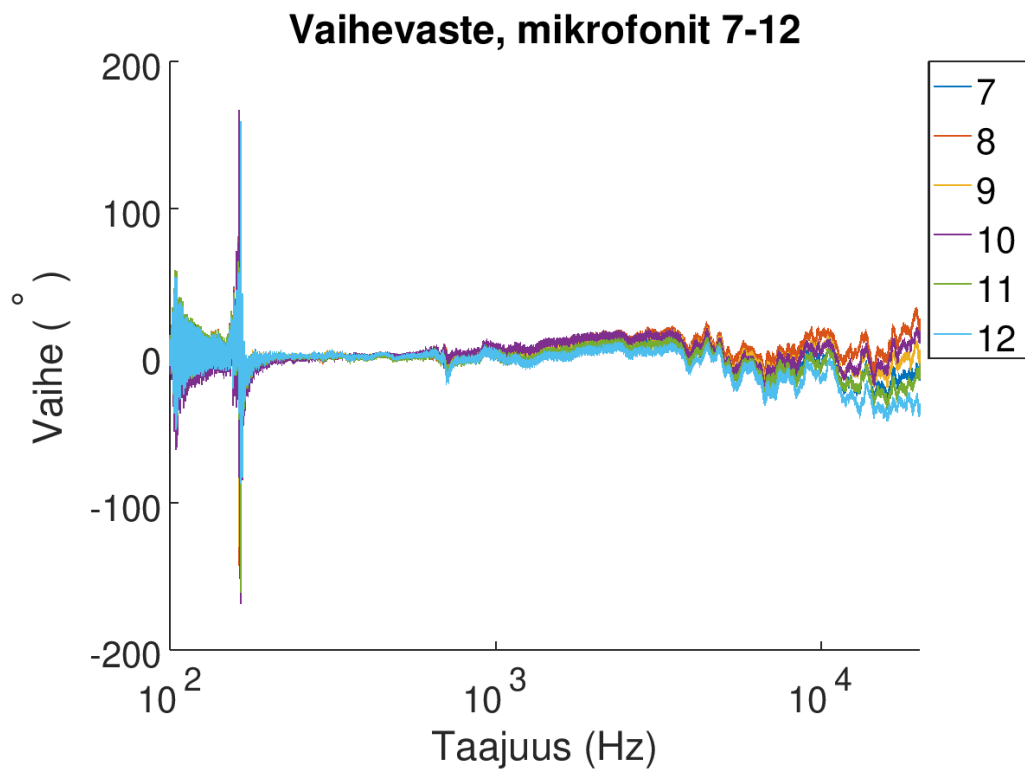
Kuva 53: Mikrofonien 31–36 amplitudivasteet $R_{\text{amp}}(f)$.



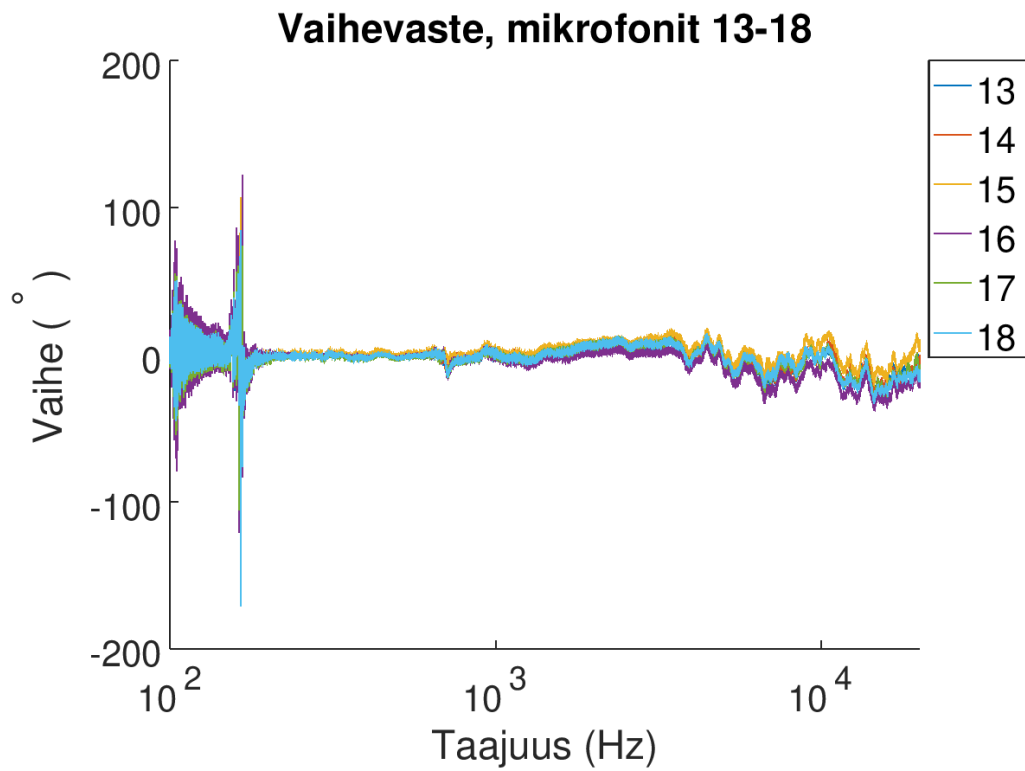
Kuva 54: Mikrofonien 1–36 vaihevasteet $R_{\theta}(f)$.



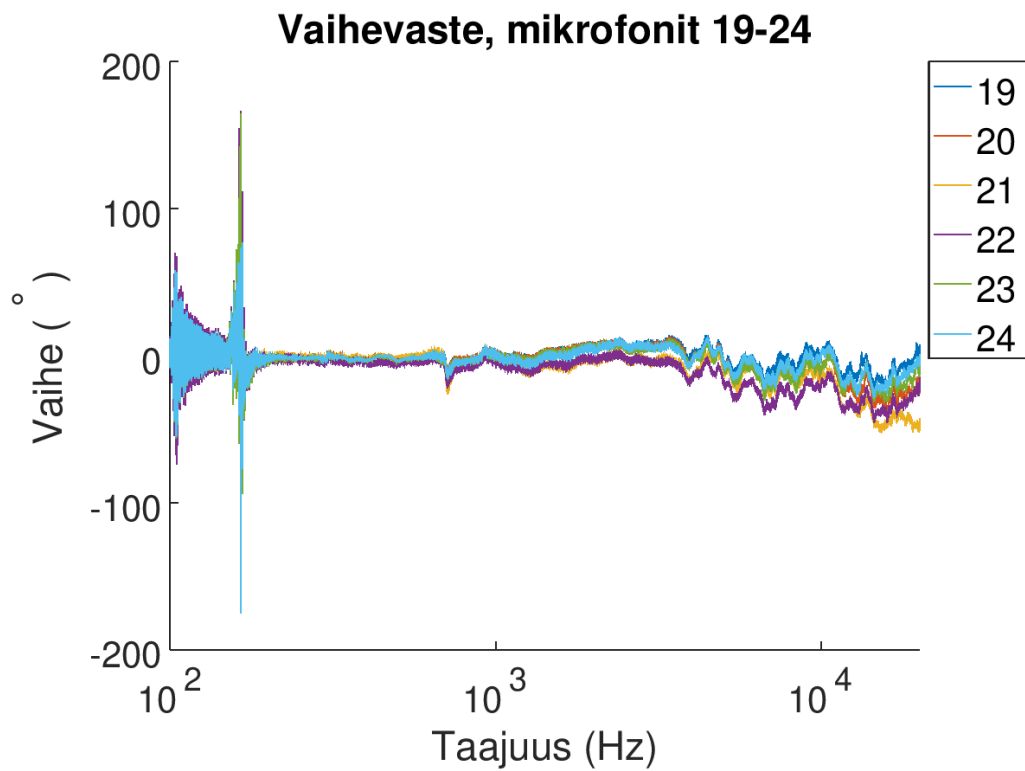
Kuva 55: Mikrofonien 1–6 vaihevasteet $R_\theta(f)$.



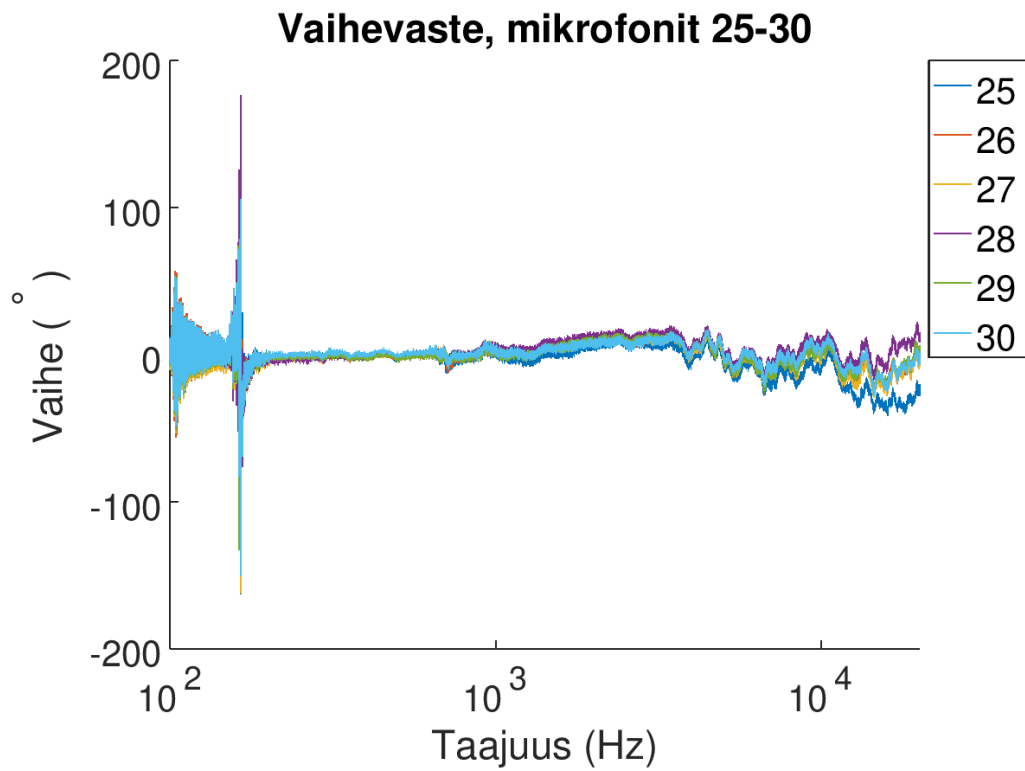
Kuva 56: Mikrofonien 7–12 vaihevasteet $R_\theta(f)$.



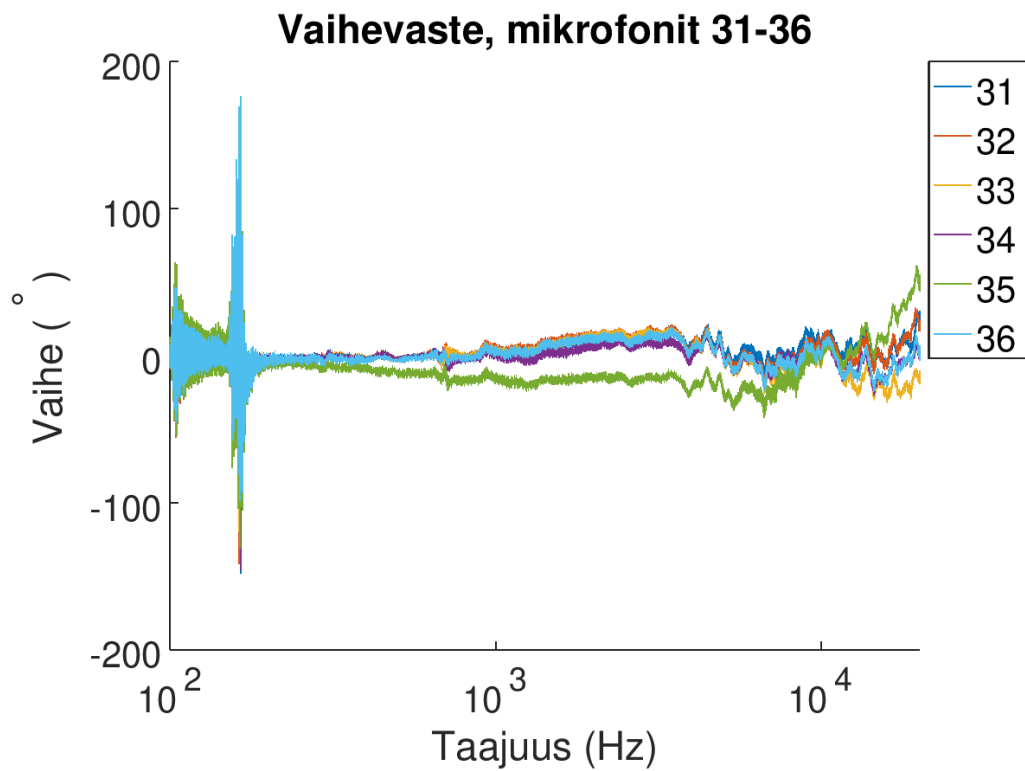
Kuva 57: Mikrofonien 13–18 vaihevasteet $R_\theta(f)$.



Kuva 58: Mikrofonien 19–24 vaihevasteet $R_\theta(f)$.



Kuva 59: Mikrofonien 25–30 vaihevasteet $R_\theta(f)$.



Kuva 60: Mikrofonien 31–36 vaihevasteet $R_\theta(f)$.