

# PUUORKESTERIN EKVALISOINTI

**Juho Liski<sup>1</sup>, Jussi Rämö<sup>1</sup>, Vesa Välimäki<sup>1</sup> ja Otso Lähdeoja<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu  
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, akustiikan laboratorio  
Otakaari 5, 02150 Espoo  
etunimi.sukunimi@aalto.fi

<sup>2</sup> Taideyliopisto  
Sibelius-Akatemia  
Helsinki  
etunimi.sukunimi@uniarts.fi

## Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään neljästä puupaneelikaiuttimesta koostuvan puuorkesterin akustiset ominaisuudet. Jokaiselle puukaiuttimelle suunniteltiin yksilöllinen, Bark-kaistoja hyödyntävä ekvalisaattori (EQ). Puupaneelikaiuttimien epäsymmetrisyydestä ja dipolimaisuudesta johtuen niiden säteilemän äänen spektri eri suuntiin vaihtelee huomattavasti, ja tästä syystä EQ:t suunniteltiin yhden mittauspisteen perusteella, joka sijaitsee kaiuttimien edessä. Näin saavutettiin huomattava parannus puupaneelikaiuttimien edestä mitattuun vasteeseen säilyttäen kuitenkin puiden alkuperäinen resonoiva äänenväri. Tämä johtuu siitä, että EQ:t eivät vaimenna paneelien soivia moodeja ja niistä johtuvia resonanssihuippuja, vaan tasoittavat ainoastaan magnitudivasteen yleisen muodon. Puuorkesteri on esillä vuoden 2022 syksyyn asti tiedekeskus Heurekassa osana puun ominaisuuksia esittelevää SuperPUU-näyttelyä.

## 1 JOHDANTO

Kaiuttimena voidaan käyttää monenlaisia esineitä, jotka saatetaan värähtelemään. Yksi esimerkki tästä on niin kutsuttu runkoääni, joka määritellään kiinteisiin pintoihin johdettuna värähtelynä. Runkoääntä kuvastaa tyypillisesti suuri määrä resonansseja, suuresta säteilevästä pinnasta aiheutuva epätavallinen tilantuntu ja äänen paikallistaminen värähtelevän pinnan taakse [1] sekä värähtelyjen kompleksisesta superpositiosta johtuva vahva taajuusvasteen värittyminen [2]. Tyypillisesti materiaalina käytetään puuta [3, 4], mutta myös esimerkiksi lasia on kokeiltu [5]. Yleensä runkoääntä tuotetaan kiinnittämällä yksi tai useampi aktuaattori valitusta materiaalista tehtyyn levyyn.

Tässä artikkelissa tutkitaan neljän puupaneelikaiuttimen taajuusvasteita, kun jokaiseen niistä on kiinnitetty kaksi aktuaattoria. Jokaiselle kaiuttimelle suunnitellaan mittausten perusteella ekvalisaattori (EQ), jonka tarkoitus on tasoittaa vaste. Tarkoitus ei kuitenkaan

---

Copyright ©2021 Juho Liski, Jussi Rämö, Vesa Välimäki ja Otso Lähdeoja. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

ole valkaista vasteita täysin, vaan ainoastaan tasoittaa niiden yleinen muoto jättäen samalla suurin osa resonansseista ennalleen. Näin puupaneelikaiuttimien äänenlaadun pitäisi parantua, mutta ne säilyttäisivät silti suuren osan alkuperäisestä luonnollisuudestaan. Tämän työn tuloksia on esitelty aiemmin SMC21-konferenssissa [6].

Artikkelin rakenne on seuraava: Kappaleessa 2 esitellään neljästä puupaneelikaiuttimesta koostuva puuorkesteri. Kappaleessa 3 kerrotaan mittausasetelmasta ja EQ-suunnittelusta. Kappaleessa 4 näytetään mittaustulokset ja EQ:n hyödyt. Lopuksi kappale 5 sisältää artikkelin yhteenvedon.

## 2 PUURKESTERI

Puuorkesteri koostuu neljästä puupaneelikaiuttimesta, joiden puulajit ovat: kuusi (korkeus 250 cm × leveys 40 cm × paksuus 2 cm), vaahtera (202 cm × 30 cm × 2 cm), raita (183 cm × 22 cm × 1 cm) ja omenapuu (161 cm × 14 cm × 1 cm). Jokaiseen paneeliin hieman keskilinjnan viereen on ruuvattu kiinni bassotoistin<sup>1</sup> alaosaan ja laajakaistaisempi toistin<sup>2</sup> yläosaan. Esimerkki puupaneelikaiuttimesta ja siihen kiinnitetyistä kahdesta aktuaattorista näkyy kuvassa 1; kuvassa näkyy myös puun rakenteen epäsymmetrisyys. Bassoaktuaattorin ilmoitettu taajuusvaste on 5–200 Hz ja toisen aktuaattorin 100–20000 Hz. Aktuaattorit on yhdistetty audiovahvistimeen<sup>3</sup>. Otso Lähdeojan installaatiota varten säveltämää musiikkia toistetaan neliraitaisella musiikinsoitto-ohjelmalla siten, että jokaiseen puupaneelikaiuttimeen menee yksi soitin ja jokaisen kaiuttimen äänenvoimakkuutta voidaan säätää erikseen. Huomioitavaa on myös se, että molempiin aktuaattoreihin syötetään sama signaali; aktuaattorit muodostavat itse sähköakustisen jakosuotimen, mikä johtuu niiden toistokaistasta.

## 3 MITTAUKSET JA EKVALISAATTORISUUNNITTELU

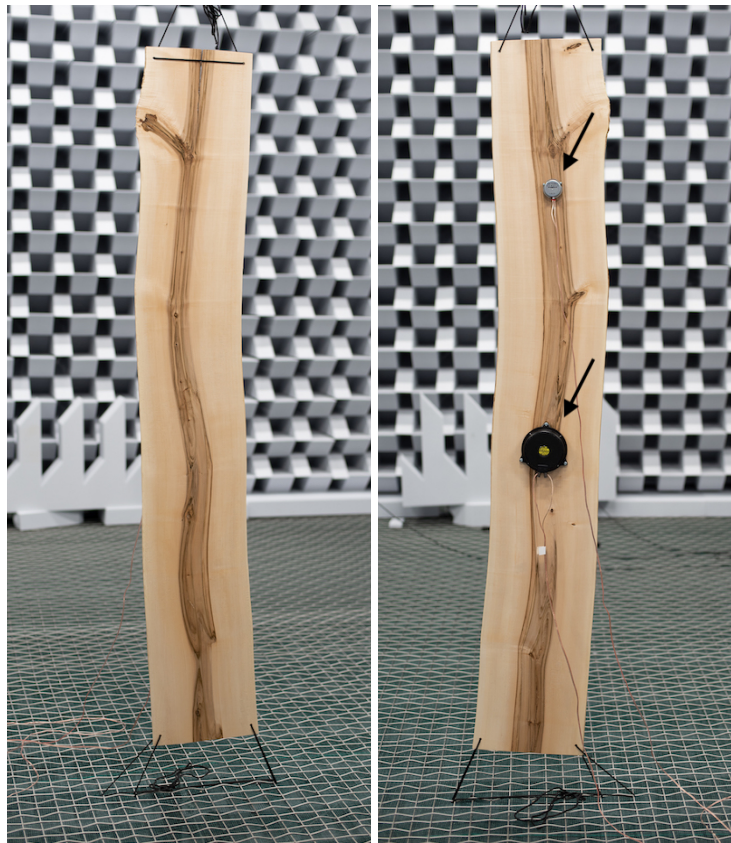
Mittaukset suoritettiin Aalto-yliopiston akustiikan laboratorion suuressa kaiuttomassa huoneessa, joka on nimetty Eero Lampion mukaan. Jokainen puupaneelikaiutin ripustettiin vuorollaan katosta tulevaan ketjuun ja kiinnitettiin narulla löyhästi huoneen teräsverkkolattiaan. Tällöin paneelit riippuivat vapaasti koskematta mihinkään pintaan ja pysyivät paikallaan osoittaen aina samaan suuntaan, ks. kuva 1. Kaiuttimet mitattiin neljässä pisteessä edessä (0°, 1.6 m korkeus; 0°, 1 m korkeus; ±30°, 1.6 m korkeus) ja yhdessä sivulta (90°, 1.6 m korkeus). Mikrofonit olivat mallia G.R.A.S Type 46AF 1/2 tuumaa ja niiden etäisyys paneelistä oli 2.5 m. Mittaussignaalina käytettiin viiden sekunnin mittaista logaritmista sinipyyhkäisyä [7]. Huolimatta mikrofonien määrästä, tässä artikkelissa tarkastellaan ainoastaan edestä mitattuja vasteita 1.6 m korkeudella, joka sijaitsee keskimääräisen aikuisen kuulijan korvan tasolla.

EQ:t suunniteltiin jokaiselle puupaneelikaiuttimelle erikseen ensimmäisten mittausten perusteella. Suunnittelussa käytettiin hyväksi vain kaiuttimien edessä 1.6 m:n korkeudella olevaa mikrofontia, koska mittausten aikana huomattiin paneelien säteilemän äänen

<sup>1</sup>Fischer Amps Bass Pump 3: [https://www.fischer-amps.de/drum\\_section.html#article-253](https://www.fischer-amps.de/drum_section.html#article-253)

<sup>2</sup>Tectonic Audio Labs TEAX32C30-4/B: [https://www.tectonicaudiolabs.com/wp-content/uploads/2019/04/T-DS-TEAX32C30-4B\\_Rev-1.1.pdf](https://www.tectonicaudiolabs.com/wp-content/uploads/2019/04/T-DS-TEAX32C30-4B_Rev-1.1.pdf)

<sup>3</sup>Audac EPA104 D-luokka: <https://audac.eu/Products/d/epa104---quad-channel-class-d-amplifier-4-x-100w---crossover>

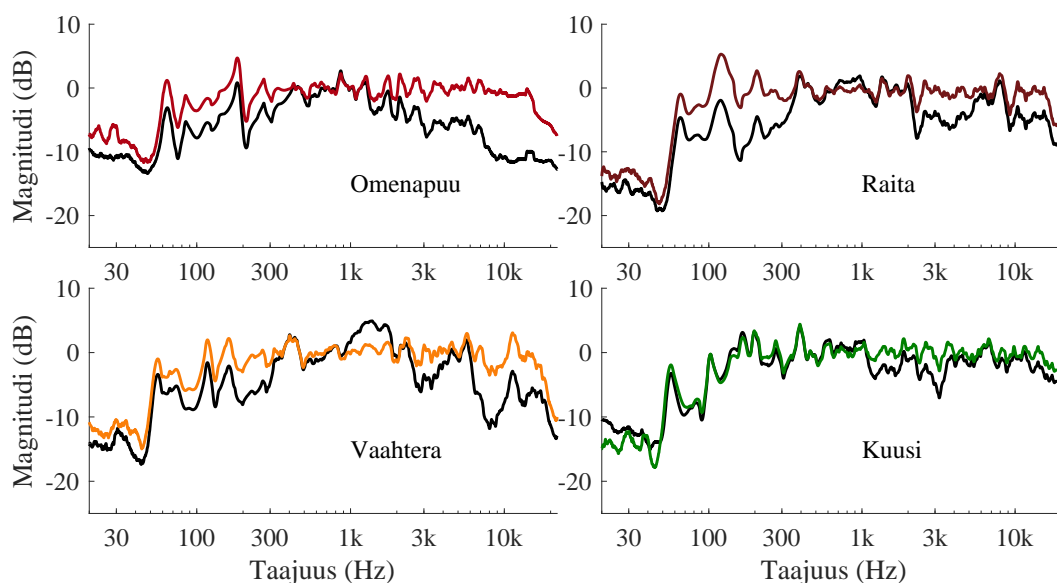


Kuva 1: Vaahterapaneelikaiutin kaiuttomassa huoneessa edestä (vasen) ja takaa (oikea). Takaa otetussa kuvassa (oikea) näkyvät kaksi tiukasti kiinnitettyä aktuaattoria, joiden paikka on korostettu nuolien avulla.

suuri suuntariippuvuus; tällöin mitatut vasteet eri suuntiin keskiarvoistivat paneelien ominaisuuksia ja näiden keskiarvoistettujen vasteiden pohjalta suunnitellut EQ:t eivät olisi korjanneet kaiuttimien vastetta juurikaan. EQ itsessään oli Bark-kaistainen (24 kaistaa) kaskadimuotoinen graafinen EQ, joka hyödyntää neuroverkkoja tarvittavien kaistasuodatinten vahvistuksien laskennassa tuottaen näin erittäin tarkan vastaavuuden tavoitevasteen kanssa [8]. Tavoitevasteet saatiin jokaiselle kaiuttimelle ottamalla edestä mitattu taajuusvaste, pehmentämällä se kuudesosaoktaavin tarkkuuteen, laskemalla saadun vasteen käänteisarvo ja näytteistämällä tämä vaste EQ:n keskitaaajuuksilla. Kaiuttimien kaistanleveys otettiin kuitenkin huomioon siten, ettei erittäin matalia taajuuksia edes yritetty ekvalisoida. Lisäksi EQ:n tavoitevasteen maksimi- ja minimiarvo rajoitettiin  $\pm 12$  dB:een.

#### 4 EKVALISOIDUN PUORKESTERIN VASTEET

Kuvassa 2 esitetään kaikkien puupaneelikaiuttimien vasteet mitattuna suoraan edestä (korkeus 1.6 m) ennen ekvalisointia ja sen jälkeen; käyrät on normalisoitu 0 dB:iin 1 kHz:ssä. Kaikissa ekvalisoimattomissa vasteissa näkyy resonansseja yläbasson alueella (noin 40–200 Hz), mistä johtuen niissä on laatikkomainen äänensävy [9]. Edellä mainittujen resonanssien lisäksi mitatuissa magnitudivasteissa on paljon muitakin resonanssihuippuja ja yleistä epätasaisuutta, ja kaikki tämä vaikuttaa kaiuttimien alkuperäiseen ääneen, joka



Kuva 2: Kaikkien puupaneelikaiuttimien magnitudivasteet mitattuna edestä ennen (musta viiva) ja jälkeen (värilliset viivat) ekvalisoinnin. Vasteet on pehmennetty kuudesosaok-taavisuodattimilla.

on hyvin väritynyt eikä sovellu hifi-äänentoistoon. Huomioitavaa on myös se, että monet vasteissa näkyvät epäideaalisuudet (resonanssit ja vasteen epätasaisuus) ovat kaistanleveysiltään hyvin kapeita, ja valittu EQ ei näin ollen pysty täydellisesti valkaisemaan paneelikaiuttimien vasteita, mikä sopii hyvin hankkeen alkuperäiseen tavoitteeseen.

Ekvalisoimattomista käyristä kuvassa 2 nähdään, että puupaneelikaiuttimet (lukuun ottamatta kuusta) säteilevät hyvin ainoastaan keskitaajuuksia 1 kHz:n ympärillä. Kuusikaiuttimen vaste on jo ennen ekvalisointia melko tasainen muualla paitsi 2 kHz:n ympärillä. Alkuperäisistä vasteista voidaan myös nähdä paneelikaiutinten alarajataajuuudet: Omenapuun ja raidan alarajataajuus on noin 60 Hz, kun taas vaahteran ja kuusen vastaava on noin 50 Hz. Näin ollen kahden isoimman (ja paksuimman) paneelin alarajataajuus on hieman matalampi kuin kahden pienemmän (ja ohuemman) paneelin.

Kun kuvasta 2 katsotaan ekvalisoituja (värillisiä) käyriä, huomataan, että ekvalisointi tekee tehtävänsä eli kaikkien neljän kaiuttimen vaste on huomattavasti suurempi kuin ennen ekvalisointia. Toisaalta vasteissa on nähtävissä myös alkuperäisten kaltaisia resonansseja, joten sekin tavoite saavutettiin.

Puukaiutinten kaistanleveys voidaan määrittää taajuusalueeksi, joka jää ekvalisoitujen vasteiden  $-6$  dB:n rajataajuuksien väliin. Näin saatu kaistanleveys on 60 Hz–20 kHz omenapuulle, 60 Hz–20 kHz raidalle, 50 Hz–19 kHz vaahteralle ja 50 Hz–21 kHz kuuselle. Näiden arvojen avulla voidaan ekvalisoinnilla saavutettu hyöty osoittaa myös numeerisesti: Siinä, missä ekvalisoimattoman omenapuukaiuttimen vaste vaihtelee 14 dB:ä edellä mainitulla kaistanleveydellä, ekvalisoidun version vaste vaihtelee 6 dB (ja ainoastaan 2 dB välillä 300 Hz–10 kHz). Ekvalisoimattoman raidan vaste puolestaan vaihtelee 12 dB:ä, kun taas ekvalisoidun vasteen vaihtelu on ainoastaan 4 dB. Vaahterapaneelikaiuttimen vaste vaihtelee ekvalisoimattomana 10 dB ja ekvalisoituna vain 6 dB. Lopuksi

kuusen ekvalisoimaton vaste vaihtelee 12 dB, kun taas ekvalisoituna sama vaihtelu on 9 dB koko kaistanleveydellä ja vain 4 dB yli 100 Hz:n taajuuksilla.

Ekvalisoinnin vaikutusta arvioitiin myös kuuntelemalla kaikkia puupaneelikaiuttimia. Ensinnäkin tällä varmistettiin, että puupaneelien ja ekvalisoinnin yhteisvaikutuksesta ei aiheudu kuultavia häiriöitä. Lisäksi kuuntelulla varmistettiin, että raitapaneelikaiuttimen vasteessa korostuva resonanssi noin 120 Hz:n taajuudella ei vaikuta haitallisesti äänenlaatuun, vaikka ekvalisointi vahvistaa kyseistä resonanssia.

Lopulta kuuntelu vahvisti sen, minkä mitatut magnitudevastekäyrät osoittavat: ekvalisointi ei tuottanut täydellistä äänenlaatua, vaan sen sijaan saavutettiin selkeä parannus alkutilanteeseen. Kuuntelu auttoi myös valitsemaan sopivan kaiuttimen jokaiselle käytössä olleelle soittimille ja toteamaan sen, että kuusi sopii kaikista puulajeista parhaiten puupaneelikaiuttimen materiaaliksi, koska se tuotti parhaan äänenlaadun. Esimerkkejä puukaiuttimien kautta soitetusta musiikista on tarjolla verkossa SMC21-konferenssin julkaisuun liittyen [6].

Puorkesteri rakennettiin tiedekeskus Heurekan SuperPUU-näyttelyä varten, joka on esillä 10.6.2020 – 18.9.2022. Näyttelyssä puukaiuttimet riippuvat hyvin valaistuna vierekkäin niille rakennetussa akustoidussa kaapissa, jonka yksi sivu on auki kuuntelua varten. Kuuntelupisteen edessä on ohjauspaneeli, josta kuulija voi valita musiikkikappaleen ja säätää eri kaiuttimien vahvistusta. Näin kuulija voi itse miksata musiikkia tai kuunnella yksittäistä puukaiutinta erikseen. Heurekassa puukaiuttimia soitetaan ainoastaan ekvalisoituna, koska se tuottaa laadukkaimman elämyksen.

## 5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin puupaneelikaiutininstallaatio ja sen akustiset ominaisuudet. Puupaneelien vasteet mitattiin ja mittausten perusteella suunniteltiin EQ:t, jotka tasoittavat kaiutinten vasteen. Koska ekvalisoinnin tarkoituksena ei ollut täysin tasoittaa kaiutinten vasteita, vaan korjata niiden yleistä taajusvastetta jättäen samalla alkuperäiset resonanssit jäljelle, hankkeessa käytettiin Bark-kaistajakoista graafista EQ:ta. EQ:t suunniteltiin edestä mitatun vasteen perusteella, ja niiden toiminta varmistettiin uusilla mittauksilla. Nämä mittaukset ja vapaamuotoinen kuuntelu osoittivat, että EQ:t tasoittavat puupaneelikaiutinten vasteita varsinkin niiden edessä, mutta myös muissa mitatuissa pisteissä, vaikka suunnittelu perustuikin ainoastaan yhteen edessä sijaitsevaan pisteeseen.

## 6 KIITOKSET

Tämän tutkimuksen ovat osittain rahoittaneet Aalto ELEC Doctoral School ja tiedekeskus Heureka. Tutkimus kuuluu NordicSMC-yliopistoverkon aktiviteetteihin (Nordic Sound and Music Computing Network, NordForsk-projekti 86892). Otso Lähdeojan työn on rahoittanut Suomen Akatemia (projekti 316072, "Intersubjectivity in Music; the Perspective of Technological Mediation"). Soitinrakentaja Juhana Nyrhinen teki puorkesterin puupaneelit. Kirjoittajat haluavat kiittää seuraavia henkilöitä Heurekasta: Tapio Koivu, Mikko Myllykoski, Meiju Lampinen, Mikko Kauhanen ja Matti Viirimäki.

**VIITTEET**

- [1] O. Lähdeoja, A. Haapaniemi, and V. Välimäki. Sonic scenography—Equalized structure-borne sound for aurally active set design. In *Proc. Int. Comput. Music Conf. (ICMC)/Sound and Music Computing Conf. (SMC)*, pages 1725–1730, Athens, Greece, Sep. 2014.
- [2] B. Pueo, J. Escolano, J. J. López, and G. Ramos. A note on the filtering equalization in large multiactuator panels. In *Proc. 17th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO)*, Glasgow, Scotland, Aug. 2009.
- [3] G. Berndtsson and A. Krokstad. A room acoustic experiment with an artificial reverberation system using wooden loudspeakers. *Acta Acustica*, 2(1):37–48, 1994.
- [4] G. Berndtsson. Acoustical properties of wooden loudspeakers used in an artificial reverberation system. *Appl. Acoust.*, 44(1):7–23, 1995.
- [5] O. Mal, M. Novotný, B. Verbeeren, and N. Harris. A novel glass laminated structure for flat panel loudspeakers. In *Proc. AES 124th Conv.*, Amsterdam, The Netherlands, May 2008.
- [6] J. Liski, J. Rämö, V. Välimäki, and O. Lähdeoja. Equalization of wood-panel loudspeakers. In *Proc. Sound and Music Computing Conf. (SMC21)*, pages 3–10, Jun.–Jul. 2021. Ääniesimerkkejä verkossa: <http://research.spa.aalto.fi/publications/papers/smc2021-tree-orchestra/>.
- [7] A Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Proc. AES 108th Conv.*, Paris, France, Feb. 2000.
- [8] J. Rämö, J. Liski, and V. Välimäki. Third-octave and Bark graphic-equalizer design with symmetric band filters. *Appl. Sci.*, 10(4):1–22, Feb. 2020.
- [9] T. H. Pedersen and N. Zacharov. The development of a sound wheel for reproduced sound. In *Proc. AES 138th Conv.*, Warsaw, Poland, May 2015.