

OBJEKTIIVINEN KONSERTTISALIN DYNAMIIKAN ARVIOINTI

Tapio Lokki, Jukka Pätynen

Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu
Tietotekniikan laitos
PL 13300, 00076 AALTO
tapio.lokki@aalto.fi

Tiivistelmä

Viime vuosien tutkimus on osoittanut, että konserttisali vaikuttaa havaittuun musiikin dynamiikkaan. Aiemmat tutkimuksemme ovat keskittyneet korkeisiin taajuuksiin, mutta tässä artikkelissa tutkitaan havaitun dynamiikan muutosta matalilla taajuuksilla. Yhdistämällä orkesterin pianissimo- ja fortissimospektrit salien vastaisiin ja edelleen kuulon herkkyyssäyrästäön nähdään, että salien välillä on eroa havaitussa dynamiikassa alle 100 Hz taajuuksilla. Tässä artikkelissa esitellään yksi mahdollinen tapa havaitun dynamiikan objektiiviseen arviointiin.

1 JOHDANTO

Virtuaaliakustiikan tutkimusryhmämme on tutkinut konserttisalien akustiikkaa viimeisen vuosikymmenen ajan. Olemme kehittäneet uusia tapoja tallentaa ja toistaa salien akustiikkaa virtuaali-orkesterin avulla. Tämä työ on mahdollistanut autenttisen kuuntelukokemuksen laboratorio-olosuhteissa, jolloin saleja on pystytty vertaamaan toisiinsa samalla musiikinäytteellä erittäin tarkasti. Uusimmassa aistinvaraisia arviointimenetelmiä soveltavassa tutkimuksessa [1] 28 koehenkilöä arvioi kuutta konserttisalia kolmessa eri kuunteluaikassa kahdella eri musiikinäytteellä. Tulokset vahvistavat aikaisempaa käsitystä niistä eroista, joita ihmiset kuulevat konserttisalien akustiikan välillä. Tällaisia ovat äänekkyyys, lämpimyys, läheisyys, kaiuntaisuus, selkeys, äänen ympäröivyyys, jne. Tulosten perusteella olemme rakentaneet konserttisaliakustiikan aistiympyrän, josta on toinen artikkeli näillä Akustiikkapäivillä [2].

Tutkimuksissamme kysymme myös mitkä salit ovat koehenkilöiden mukaan parhaita, eli missä saleissa he mieluiten kuuntelisivat musiikkia. Tulokset sisältävät poikkeuksetta paljon hajontaa ja uusimmissa kokeissa salien preferenssijärjestys riippui sekä istumapaikasta että musiikista. Silti koehenkilöt voidaan makumieltymyksiensä perusteella jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäinen ryhmä haluaa tarkasti kuulla jokaikisen instrumentin tai instrumenttiryhmän kohtuullisen kuivassa ja erottelavassa akustiikassa ja heitä ei haittaa jos äänikuva on hieman latteaa ja etäinen. Sen sijaan toinen ryhmä haluaa voimakkaan ja lämpimän äänen, joka ympäröi heidät, vaikka ääni jopa hieman puuroutuisi. Tämä kahtiajako vaihtelee hieman tutkimuksesta toiseen, mutta on toistunut monessa eri tutkimuksessa viimeisen 50 vuoden aikana. Tätä taustaa vasten on mielenkiintoista, että maailmassa on kuitenkin konserttisaleja (esim. Wienin Musikverein kultainen sali), jotka ovat jokaisen paikan päällä käyneen kuuntelijan mielestä loistavia. Näissä

saleissa täytyy olla jotain sellaisia akustisia ominaisuuksia, joita lyhyillä ääninäytteillä tekemämme tutkimukset eivät ole täysin paljastaneet.

Yksi sellainen tekijä on salin ominaisuus välittää orkesterin soittama dynamiikka mahdollisimman laajana kuuntelijoille. Olemme viime vuosina osoittaneet, että sali todellakin voi vaikuttaa havaittuun dynamiikkaan [3] ja sitä kautta psykofysiologisesti mitattavaan kuunteluelämykseen [4]. Aiemmin olemme näyttäneet, että laaja dynamiikka johtuu konserttisalin muodosta, jolloin tyypillisesti vain fortissimossa heräävät korkeat taajuudet kantautuvat mahdollisimman voimakkaana kuulijan korviin [5]. Tässä artikkelissa laajennamme tuota tulkintaa koskemaan myös matalia taajuuksia ja ehdotamme objektiivista tapaa, jolla matalien taajuuksien dynamiikkaa voidaan mitata ja arvioida.

2 ANALYYSIMENETELMÄ

Käyttämämme analyysimenetelmä ottaa huomioon sinfoniaorkesterin spektrin muutokset eri dynamiikoissa, konserttisalin akustiikan sekä äänitasosta riippuvan kuulon herkyyden.

2.1 Sinfoniaorkesterin dynamiikka

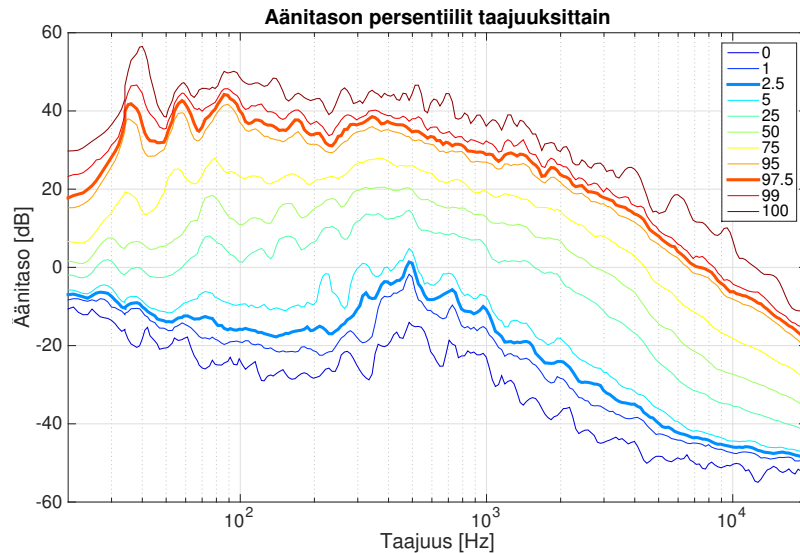
Analysoimme sinfoniaorkesterin dynamiikkaa seuraavasti. Radion sinfoniaorkesteri levytti¹ vuonna 2015 Sibeliuksen Lemminkäinen-sarjan ja tästä äänityksestä saimme tutkimusta varten ensimmäinen osan mikrofonisignaalit. Ne sisältävät lähimikrofoneilla äänitetyt soitinryhmät raakamiksattuna balanssiin. Nämä yksittäiset soitinraidat summasimme yhdeksi monoäänitykseksi, joka ei ole täysin kaiuton, mutta kuulostaa kuitekin hyvin kuivalta. Tämä 956s kestävä musiikinäyte jaettiin yhden sekunnin mittaisiin jaksoihin 50 prosentin päällekkäisyydellä. Kullekin jaksolle laskettiin magnitudispektri sekä ekvivalenttitaso. Jälkimmäisen mittaluvun perusteella 37 jakson äänitaso oli selkeästi muuta joukkoa matalampi, ja nämä musiikin tauoiksi tulkitut jaksot poistettiin.

Jokaisessa sekunnin jaksossa on eri soitinkokoonpano ja näin ollen yksilöllinen spektri. Jotta saisimme käsityksen laajakaistaisesta dynamiikasta kaikkien yksittäisten terssikais-tatasoitettujen spektrien pisteet järjestettiin suuruusjärjestykseen taajuuksittain, jolloin voimme tarkastella esim. hiljaisimpia ja kovimpia kohtia kullakin taajuudella erikseen. Kuvassa 1 on esitetty taajuussisällöt kyseisestä analyysistä ja kuvassa on korostettuna 2,5 ja 97,5% persenttiilit, jotka kertovat kuinka hiljaa ja voimakkaasti orkesteri tuottaa ääntä kullakin taajuudella. Toisin sanoen ne edustavat koko orkesterin *pianissimoa* ja *fortissimoa*.

2.2 Konserttisalin magnitudispektri

Konserttisali välittää äänen lavalta kuulijoille ja lisää havaittuun ääneen kaiuntaa, koska ääni heijastelee salin seinistä. Salin akustiikka voidaan mitata impulssivastemittauksella ja impulssivasteesta voidaan edelleen laskea salin taajuusvaste. Kuvassa 2 on kuvattuna 10 eurooppalaisen konserttisalin taajuusvasteet, jotka on laskettu kahteen eri kuuntelupisteeseen 24 lähteen keskiarvona. Lähteenä oli "kaiutinorkesteri", eli lähteet kattoivat noin

¹<https://www.ondine.net/?lid=en&cid=2.2&oid=5545>



Kuva 1: Kaikista magnitudispektreistä on äänitasojen arvot järjestetty taajuuksittain. Paksummalla käyrällä on 2,5 ja 97,5% persentiilit, jotka edustavat laajakaistaista pianissimoa ja fortissimoa.

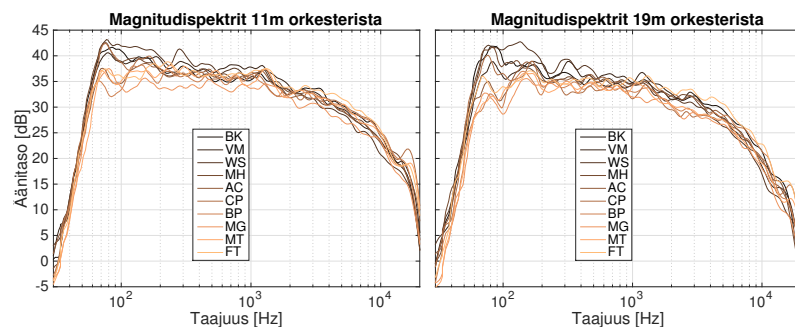
150 m² alueen lavalla ja yksittäisten lähteiden suuntaavuus jäljittelee oikeiden soittimien suuntaavuuksia [6]. Kuvasta nähdään, että suurimmat erot salien välillä ovat alle 1000 Hz taajuuksilla.

2.3 Kuulon herkkyys

Ihmissen kuulojärjestelmän herkkyyttä eri siniääneksien voimakkuuksilla kuvaa vakioäännekkyysskäyrästä, joka on piirretty ohuilla mustilla käyrillä kuvassa 3. Käyrästä kuvaa kuinka voimakkaan kuuloaistimuksen siniäänneksen äänenpainetaso aiheuttaa kullakin taajuudella, kun vertailuääni on taajuudella 1 kHz. Toisin sanoen kullakin käyrällä valitsee tietty äänekkyytaso. Alin käyrä osoittaa kuulokynnyksen ja esimerkiksi 100 Hz taajuudella äänitason pitää olla noin 20 dB ennen kuin se kuullaan kun taas 1 kHz kuulokynnys on 0 dB.

2.4 Havaittu dynamiikan muutos

Kuvaan 3 on myös piirretty kaksi käyräparvea, jotka ovat kuvien 1 ja 2 käyrien välisiä tuloja. Sinisellä on orkesterin *pianissimo*-spektri kerrottuna kymmenen eri konserttisalin magnitudispektreillä kun taas punaiset käyrät saadaan kun orkesterin *fortissimo*-spektri kerrotaan samoilla salein magnitudispektreillä. Kussakin salissa äänen voimakkuus vaihtelee näiden kahden käyrän välillä, eli määrittelee dynamiikan.

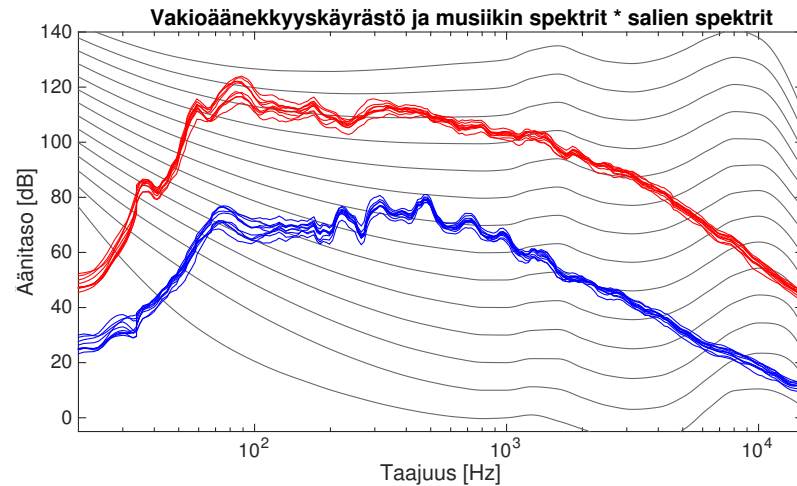


Kuva 2: Kymmennen konserttisalin suhteelliset magnitudivasteet 24 lähdekanavan keskiarvona kahdella eri kuunteluetäisyydellä.

Koska vakioäänekkyyskäyrät ovat eri muotoisia eri äänenvoimakkuuksilla niin kuuntelijoiden *havaitsemaa dynamiikkaa* voidaan arvioida kuvaamalla spektrien tulot vakioäänekkyyskäyrästä. Käytännössä tämän voi tehdä hakemalla kullakin taajuudella spektrin “vakioäänekkyysarvon” ja piirtämällä spektrit tällä uudella “vakioäänekkyysasteikolla”. Kun tämän kuvauksen jälkeen vielä vähennetään fortissimo*salin ja pianissimo*salin spektrit toisistaan voidaan piirtää havaittu dynamiikka taajuuden funktiona eri saleissa. Kuvan 4 yläkuvista nähdään, että vakioäänekkyyskäyrästä epälineaarisuuden vuoksi pienillä taajuuksilla havaittu dynamiikka eroaa salien välillä. Eron näkee parhaiten kun otetaan yksi sali vertailukohtaksi ja verrataan muita saleja tähän saliin. Alemmissä kuvissa erot on piirretty verrattuna Helsingin Musiikkitalon suureen konserttisaliin. Kuvista nähdään, että 11m päässä orkesterista havaitun dynamiikan erot ovat keskimäärin 6 dB suuremmat alle 70 Hz taajuuksilla, etenkin kenkälaatikon muotoisissa saleissa, joissa on tasainen lattia ja avoimet penkit [7] (salit BK, VM, WS, MH, AC). Kun mennään kauemmaksi orkesterista niin erot korostuvat.

3 POHDINTOJA

Kuvan 4 käyristä puuttuu pienten taajuuksien yleistaso, kuvaajat havainnollistavat vain havaitun dynamiikan erot. On kuitenkin muistettava, että saleissa joissa on laajempi havaittu dynamiikka on myös jopa 10 dB enemmän pieniä taajuuksia, kuten kuvasta 2 nähdään. Tämä sinällään jo suuri 10 dB ero siis vielä korostuu vakioäänekkyyskäyrien epälineaarisuuden vuoksi ja havaittu ero saattaa olla jopa yli 15 dB. Kun vielä muistetaan, että monissa orkesteriteoksissa bassosoittimet, kuten isorumpu, padat, kontrabassot, tuuba ja kontrafagotit eivät soita *pianissimo*-kohdissa niin näissä saleissa suuret *crescendot* ja mahtipontiset *fortissimot* tuottavat varmasti kuulijoille suuren elämyksen. Matalat bassot tuovat musiikille myös pohjaa ja erityistä lämpöä, jota ilman musiikki saattaa kuulostaa lattealta ja voimattomalta.



Kuva 3: Vakioäännekyyskäyrästä (ISO 226), jonka päälle on piirretty salien vasteet 11m päässä orkesterista kerrottuna pianissimon (sininen) ja fortissimon (punainen) spektreillä.

4 YHTEENVETO

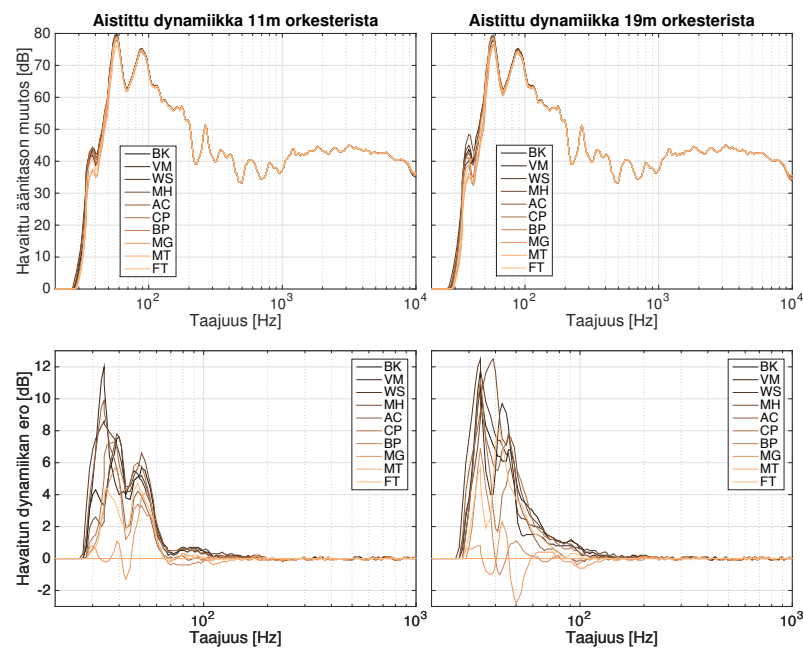
Konserttisalit vaikuttavat orkesterin soittamaan dynamiikkaan sekä suurilla että pienillä taajuuksilla. Tutkimustemme mukaan suorakulmaiset salit, joissa on paljon varhaisia sivuheijastuksia omaavat keskimääräistä laajemman dynamiikan. Sen sijaan saleissa, joissa orkesteria ympäröi jyrkästi nouseva katsomo, suora ääni dominoi äänikenttää ja dynamiikkaa vahvistavat varhaiset heijastukset puuttuvat. Näissä saleissa dynamiikka on latteampi ja suuretkaan fortissimot eivät saa salia heräämään. Tässä artikkelissa analysoidaan orkesterin spektrien muutoksia eri saleissa ottaen huomioon kuulon herkkyyssäyrät eri äänen voimakkuuksilla. Tulokset osoittavat, että saleissa, jotka eivät vaimenna pieniä taajuuksia, bassosoittimien dynamiikka vahvistuu edelleen kuulomme ominaisuuksista johtuen. Näin olleen konserttisalin kyky välittää pieniä taajuuksia lavalta saliin voi olla jopa vielä tärkeämpää hyvän akustiikan kannalta kuin on aiemmin ymmärretty.

Kiitokset: Tätä tutkimusta on rahoittanut Suomen Akatemia, projektit [296390 ja 289300].

VIITTEET

- [1] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, and S. Tervo. Concert hall acoustics: Repertoire, listening position and individual taste of the listeners influence the qualitative attributes and preferences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1):551–562, July 2016.
- [2] T. Lokki and A. Kuusinen. Konserttisaliakustiikan ympyrä. In *Akustiikkapäivät 2017*, Espoo, Finland, August 28-29 2017.

- [3] J. Pätynen and T. Lokki. Perception of music dynamics in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140(5):3787–3798, November 2016.
- [4] J. Pätynen and T. Lokki. Concert halls with strong and lateral sound increase the emotional impact of orchestra music. *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3):1214–1224, March 2016.
- [5] J. Pätynen, S. Tervo, P. W. Robinson, and T. Lokki. Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 111(12):4409–4414, 2014.
- [6] J. Pätynen. *A Virtual Symphony Orchestra for Studies on Concert Hall Acoustics*. PhD thesis, Aalto University School of Science, 2011. URL <http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526042916/>.
- [7] H. Tahvanainen, J. Pätynen, and T. Lokki. Analysis of the seat-dip effect in twelve european concert halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(4):731–742, 2015.



Kuva 4: Havaittu dynamiikan muutos eri konserttisaleissa suhteessa Helsingin Musiikkitalon dynamiikan muutokseen.