

## SALIAKUSTIIKAN VAIKUTUS MUSIIKIN KONSONANSSIIN

Jukka Pätynen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulu  
Tietotekniikan laitos  
Otakaari 5, 02150 Espoo  
jukka.patynen@aalto.fi

### Tiivistelmä

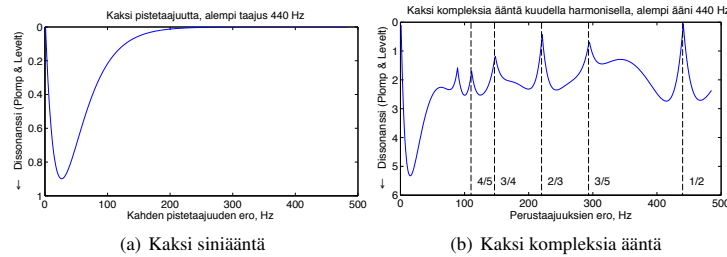
Orkesterisoittimien ääni koostuu yläsävelsarjoista, jotka esitetyn musiikin tilanteessa siirtyvät kuulijan korviin tilan akustiikan välityksellä. Kahden tai useamman äänen soidessa yhtä aikaa tuottaa niiden yhdistelmä konsonoivan tai dissonoivan vaikutelman äänten perustaajuuksista sekä niiden harmonisesta taajuussisällöstä riippuen. Tässä artikkelissa tutkitaan millä tavoin konserttisalien akustinen vaste vaikuttaa koko orkesterin tuottamaan konsonanssiin. Materiaalina käytetään keinopäällä mitattuja konserttisalien impulssivasteita sekä kaiuttomia instrumenttiäänityksiä. Soitinäänistä mallinnetut amplitudispektrit yhdistetään salivasteisiin, ja kokonaisspektri analysoidaan konsonanssin estimointiin kehitetyllä menetelmällä. Tulosten perusteella saliakustiikka vaikuttaa musiikin konsonanssiin.

## 1 JOHDANTO

Konserttisalien akustiikkaa viime vuosikymmeninä käsitelleet tutkimukset ovat löytäneet lukuisia akustisia eroja kuvailevia käsitteitä, kuten kaiuntaisuus, äänekkyyden ja ympäröivyyden. Yksittäisten akustisten ominaisuuksien taustalla vaikuttaa kunkin kuuntelijan yksilölliset mieltymykset, tottumukset ja odotukset tietyn tyyppiseen akustiikkaan. Kuuntelijoiden näkemykset ”hyvästä akustiikasta” vaihtelevat suuresti [1], ja näitä preferenssejä on usein pyritty selittämään yksittäisten akustisten ominaisuuksien yhdistelmillä. On kuitenkin ajateltavissa, että varsinaisten mieltymysten ja akustiikan laatuun liittyvien määreiden välissä on olemassa taso, joka kuvaa äänihavainnon yleistä miellyttävyyttä.

Akustiikan tuottamaa kuulokuvaa selitetään perinteisesti salin lineaarisen vasteen avulla. Todellisuudessa kuulijan korviin saapuu musiikin ja salivasteen yhdistelmä. Lisäksi sekä lähde että vastaanottaja ovat keskenään epälineaarisia, sillä mm. soittimien spektri muuttuu soittovoimakkuuden myötä, ja kuulon toiminnassa vaikuttaa lukuisia epälineaarisia ominaisuuksia. Tästä syystä onkin yhä oleellisempaa huomioida musiikkisignaalin sekä salivasteen keskinäisiä vaikutuksia, jotta akustiikan havaitsemiseen liittyviä ilmiöitä voidaan tutkia kokonaisvaltaisemmin. Edeltävissä tutkimuksissamme on hyödynnetty tällaista lähestymistapaa, ja salivasteiden ja orkesterisoittimien ominaisuuksien kautta on onnistuttu löytämään syitä musiikin dynamiikan välittymisen eroille [2].

Tässä artikkelissa esitellään menetelmä, jolla pyritään vertailemaan konserttisalien akustiikan eroja musiikin sointuisuuden perusteella. Kokonaisen orkesterin äänen miellyttävyyttä tutkitaan konsonanssia ja dissonanssia mittaavan mallin avulla.



Kuva 1: Esimerkki laskennallisesta dissonanssista (a) kahdella siniäänellä ja (b) kahdella kompleksisilla äänellä jotka sisältävät 6 ensimmäistä harmonista taajuutta. Kuvassa (b) tasavireisen järjestelmän tyypilliset taajuussuhteet on merkitty katkoviivoilla.

## 1.1 Tonaalinen konsonanssi ja dissonanssi

Tonaalinen *konsonanssi* on ollut aktiivinen alue akustiikan havaintotutkimuksessa 1900-luvun vaihteessa sekä 1960-70 -luvuilla [3–7], jonka jälkeen konsonanssia on tutkittu niukemmin [8, 9]. Konsonanssi viittaa siihen kuinka miellyttävän kuulohavainnon eri taajuuksien yhdistelmät tuottavat. Yksinkertaisimmillaan ilmiössä käsitellään kahden siniäänien tuottamaa soinnikkuutta tai vastakkaisesti niiden aiheuttamaa äänikuvan kärkeutta (*dissonanssi*). Kuuntelukokeilla on kartoitettu, että kahden siniäänien tuottama konsonanssi riippuu niiden taajuuserosta verrattuna vallitsevaan kriittiseen kaistanleveyteen [5]. Harmonisia taajuuksia sisältävien signaalien tapauksessa spektrin komponentteja verrataan pareittain, ja jokaisen parin tuottama dissonanssi summataan yhteen. Kyseinen malli selittää muunmuassa länsimaisen musiikin tasavireisiä intervaleja vastaavat perustaajuuksien suhteet lokaaleina konsonanssin maksimeina.

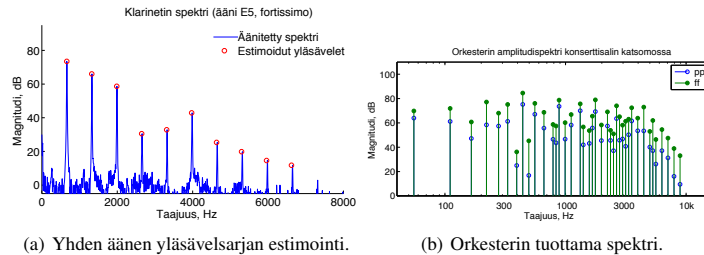
Aikaisemmat konsonanssia käsittelevät julkaisut ovat rajoittuneet pitkälti yläsävelsarjan rakenteen vaikutuksen tutkimiseen [5], sekä yksinkertaisten sointurakenteiden tuottaman konsonanssin vertailuun [10]. Konsonanssin yhdistäminen saliakustiikkaan onkin uudentyyppinen sovelluskohde.

## 2 MENETELMÄT

Orkesterin äänen konsonanssin yhteyttä konserttisalin akustiikkaan tutkitaan kaiuttomien soitinäänitysten, binauraalisten huoneakustisten mittausten sekä konsonanssimallin avulla. Pääperiaatteena on syntetisoida orkesterin soittaman soinnun taajuusspektri, jolle yhdessä salivasteen kanssa lasketaan konsonanssimallin tuottamat arvot. Eri salien vertailun lisäksi konsonanssia vertaillaan eri musiikin dynamiikkatasoilla.

### 2.1 Soitinäänien spektri

Käytetyt soitinäänien spektrit perustuvat aiemmin toteutettuihin kaiuttomiin soitinmittauksiin [11]. Käytössä oleva mittaustietokanta sisältää näytteet yleisimpien orkesterisoit-



Kuva 2: Esimerkit yksittäisen soitinäänen harmonisen amplitudispektrin estimoinnista (a) sekä koko orkesterin soittamien sävelten amplitudispektri kahdessa dynamiikkatasossa yhdistettynä kuuntelupisteen vasteeseen. Soitinäänen mitatusta spektristä (a) (sininen käyrä) on poimittu lokaalien huippujen taajuutta ja amplitudia vastaavat arvot (punaiset ympyrät).

timien A-duurikolmisoinnuista kahden oktaavin alalta kolmessa eri dynamiikkatasossa. Eri äänten magnitudispektrit laskettiin soittimen pääasiallisesta säteilysuunnasta tallennetuista signaaleista. Magnitudispektrit mallinnettiin tämän jälkeen harmonisten taajuuksien amplitudeiksi etsimällä magnitudispektristä sävelkorkeutta vastaavan yläsävelsarjan lokaalit maksimit. Esimerkki analyysistä yhdellä äänellä on esitetty kuvassa 2a. Mahdolliset pienet poikkeamat äänten vireessä korjattiin vastaamaan ideaaliviritystä.

## 2.2 Konserttisalien taajuusvaste

Konserttisalin soitinspektriin tuottaman vaikutuksen arviointia varten salien taajuusvasteet laskettiin eri konserttisaleista mitatuista huoneimpulssivasteista. Salimittauksissa lähteenä toimi ns. kaiutinorkesteri [12], joka koostui 34 kaiuttimesta kytkettynä 24 lähdekanavaan. Kyseinen lähdeasetelma kattaa tyypillistä sinfoniaorkesteria vastaavan alueen konserttisalin lavalla. Huoneimpulssivasteet mitattiin kymmenessä konserttisalissa samalla tavalla viideltä eri etäisyydeltä käyttäen 5 s mittaista logaritmista sinipyyhkäisyä. Mikrofonina käytettiin B&K HATS -keinopäätä kaksikorvaisten impulssivasteiden tallennusta varten.

## 2.3 Orkesterin amplitudispektri salissa

Eri kuuntelupisteissä estimoitavan konsonanssin laskentaa varten tarvitaan orkesterin amplitudispektrin ja salin taajuusvasteen yhdistelmä. Yhden orkesteristemman tuottama spektri kuuntelupisteessä saadaan kertomalla instrumentin soittaman äänen yläsävelspektri (Kuva 2a) instrumenttia vastaavan lähdekanavan huoneimpulssivasteen magnitudispektrillä. Sama prosessi toistetaan kaikille halutuille orkesteriäänille, jonka jälkeen spektrit yhdistetään. Tulos vastaa koko orkesterin spektriä kuuntelupisteessä. Koska konserttisalin magnitudivasteet on mitattu kaksikorvaisina, vasemman ja oikean korvan spektrit yhdistetään binauraalisen summauksen avulla [13].

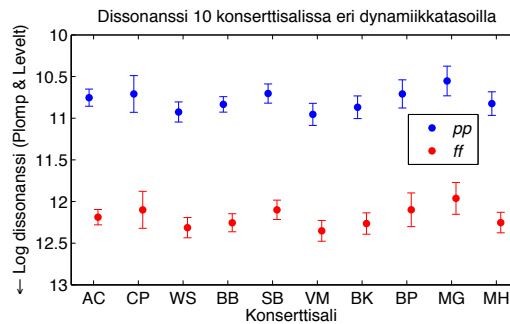
Tässä tutkimuksessa orkesterin soittamat äänet mallinnettiin Beethovenin 7. sinfonian avaavasta koko orkesterin A-duurisoinnusta. Mallinnetusta soinnusta on jätetty pois patarummun soittama soinnun perussävel. Esimerkki koko orkesterin spektristä kahdella eri dynamiikkatasolla salivaste mukaan lukien on esitetty kuvassa 2b.

Kuvan 2b kaltaisen parametrisen spektrin taajuudet ja amplitudit voidaan syöttää konsonanssimalleihin, jolloin orkesterisoinnun konsonanssi on laskettavissa eri kuuntelupisteille, konserttisaleille, sekä orkesterin eri dynamiikkatasoille. Tässä artikkelissa on hyödynnetty konsonanssin estimoinnissa Plompin & Leveltin mallia [5].

### 3 TULOKSET

Estimoidut konsonanssin arvot kymmenessä eri eurooppalaisessa konserttisaleissa on esitetty kuvassa 3, jossa pystyakseli osoittaa logaritmuunnetun konsonanssin (vrt. Kuva 1b). Vertailtavina arvoina on koko orkesterisoinnun konsonanssi kahdessa eri dynamiikkatasossa. Kuvassa pisteet ilmaisevat konsonanssin keskiarvon viiden vastaanottopisteen yli, ja pystyviivat ulottuvat keskiarvosta yhden keskihajonnan päähän.

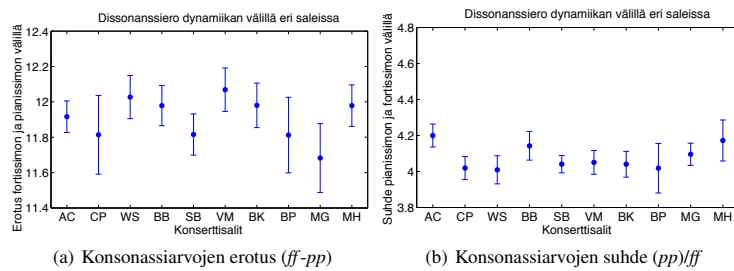
Tuloksista on havaittavissa, että identtisesti soitettu sointu tuottaa konsonanssieroja salien välillä. Konsonanssiarvojen hajonta vastaanottopisteiden välillä on myös suurempi joissain saleissa. Selkein ero on kuitenkin nähtävissä eri dynamiikkatasojen välillä. Estimoitu konsonanssi on kauttaaltaan suurempi pianissimossa kuin fortissimossa.



Kuva 3: Konsonanssin keskiarvot ja keskihajonnat viidestä vastaanottopisteestä koko orkesterin soinnulle kymmenen eri konserttisalin akustiikassa.

Eri salien vaikutus vertailtuihin dynamiikkatasoihin näyttää samankaltaisilta. Aikaisemmat tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että salien vaikutus havaittuun akustiikkaan ja musiikkiin ei ole lineaarinen musiikin dynamiikan suhteen [2]. Näin ollen on kiinnostavaa tutkia sitä onko dynamiikkatasojen vaikutus konsonanssiin erilainen eri saleissa. Kuvassa 3 esitetyt pianissimon arvot on vähennetty vastaavista fortissimon arvoista. Saadut erotukset on piirretty kuvaan 4a. Kuvaaja antaa viitteitä siitä, että pianissimon ja fortissimon välinen muutos ei ole samansuuruinen eri saleissa. Tässä yhteydessä on huomioitava että vastaavaa vertailua ei ole aikaisemmin tehty aiemmissa konsonanssitutkimuksissa. Tästä johtuen arvojen erotusta käyttävä lähestymistapa ei välttämättä

ole oikea. Vaihtoehtoisena tapana on erotuksen lisäksi esitetty eri dynamiikan tuottamien konsonanssiarvojen suhde (Kuva 4b). Myös tässä tapauksessa on nähtävissä, että konsonanssiarvojen suhteet vaihtelevat saleittain.



Kuva 4: Dynamiikkatasojen kymmenessä konserttisalissa tuottamien konsonanssiarvojen vertailu kahdella eri menetelmällä.

#### 4 DISKUSSIO

Saadut tulokset viittaavat siihen, että musiikin koettu sointuisuus eli konsonanssi riippuu salin akustiikasta. Tämän lisäksi on mahdollista, että musiikin sisältöön olennaisena osana kuuluva dynamiikka välittyy konsonanssin ja dissonanssin vaihtelun kautta eri tavoilla eri saleissa. Tämä tulos sopii yhteen aiemmissa tutkimuksissa löydettyjen epälineaaristen ominaisuuksien kanssa [2].

Salleille ominaisen magnitudivasteen muodon lisäksi myös suoraan äänenvoimakkuuteen liittyvä akustinen vahvistus vaikuttaa estimoituun konsonanssiin. Tämä vaikutus selittää osittain myös pianissimon korkeammat konsonanssiarvot. Jatkotutkimuksissa onkin huomioitava millä tavalla salien ja kuuntelupisteiden voimakkuuserot olisi mahdollista normalisoida systemaattisten erojen eliminoinemiseksi.

Erot konsonanssin muutoksessa dynamiikkatasojen välillä on mahdollista tulkita eri tavoilla. Yhtenä lähestymistapana pieni muutos dynamiikkatasojen välillä voisi tarkoittaa että fortissimo ei juurikaan muutu pianissimoa dissonoivemmaksi. Toisaalta suuri muutos pianissimon ja fortissimon välillä voi viitata siihen, että eri dynamiikkatasot erottuvat toisistaan selvemmin, mikä itsessään merkitsisi musiikin laajempaa ilmaisuvoimaa. Näitä tulkintoja ei voida suoraan vahvistaa nykyisten tulosten perusteella, ja jatkotutkimuksessa on olellista ottaa mukaan myös subjektiivisia kuuntelukokeita konsonanssin ja musiikin dynamiikan yhteyksien yksityiskohtaisempaa selvitystä varten.

#### 5 YHTEENVETO

Konserttisaliakustiikan vaikutusta äänenlaatuun on tutkittu pääasiassa huoneakustisten määreiden avulla. Tässä artikkelissa esiteltiin menetelmä, joka pohjautuu musiikin sointuisuutta arvioivaan mittariin. Sinfoniaorkesterin soittaman soinnun välittymistä kuulijalle vertailtiin mitattujen kaksikorvaisten salivasteiden avulla, ja kuulijan vastaanottamaa

musiikin magnitudispektriä arvioitiin kirjallisuudessa aiemmin esitetyllä menetelmällä. Saatujen tulosten perusteella saman musiikkiherätteen tuottama konsonanssi vaihtelee salien välillä. Myös musiikin dynamiikan muutoksen aiheuttama ero konsonanssissa riippuu saliakustiikasta. Näiden tulosten perusteella on mahdollista, että huoneakustiikan laatua voitaisiin vertailla musiikin konsonanssin avulla.

## 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. *J Acoust Soc Am*, 140(1):551–562, Jul. 2016.
- [2] J. Pätynen and T. Lokki. Perception of music dynamics in concert hall acoustics. *J Acoust Soc Am*, 140(5):3787–3798, Nov. 2016.
- [3] A. Kameoka and M. Kuriyagawa. Consonance theory part I: Consonance of dyads. *J Acoust Soc Am*, 45:1451–1459, 1969.
- [4] A. Kameoka and M. Kuriyagawa. Consonance theory part II: Consonance of dyads. *J Acoust Soc Am*, 45:1451–1459, 1969.
- [5] R. Plomp and W. J. M. Levelt. Tonal consonance and critical bandwidth. *J Acoust Soc Am*, 38(4):548–560, 1965.
- [6] E. Terhardt. Pitch, consonance, and harmony. *J Acoust Soc Am*, 55(5):1061–1069, 1974.
- [7] W. Hutchinson and L. Knopoff. The acoustic component of western consonance. *Interface*, 7(1):1–29, 1978.
- [8] J. Vos. Purity ratings of tempered fifths and major thirds. *Music perception: an interdisciplinary journal*, 3(3):221–257, 1986.
- [9] K. Mashinter. Calculating sensory dissonance: Some discrepancies arising from the models of Kameoka & Kuriyagawa, and Hutchinson & Knopoff. *Empirical Musicology Review*, 1(2):65–84, 2006.
- [10] W. Hutchinson and L. Knopoff. The significance of acoustic consonance in western triads. *Journal of Musicological Research*, 1-2(3):5–22, 1978.
- [11] J. Pätynen, V. Pulkki, and T. Lokki. Anechoic recording system for symphony orchestra. *Acta Acust United Ac*, 94(6):856–865, Dec. 2008.
- [12] J. Pätynen. *A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics*. PhD thesis, Aalto University School of Science, 2011.
- [13] V. P. Sivonen and W. Ellermeier. Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions, and binaural summation. *J Acoust Soc Am*, 119(5):2965–2980, 2006.