

KONSERTTISALIAKUSTIIKAN VAIKUTUS DYNAMIIKAN HAVAINTOON JA KUUNTELIJAN TUNTEISIIN

Jukka Pätynen, Sakari Tervo ja Tapio Lokki

Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu, Tietotekniikan laitos
PL 15400, FI-00076 Aalto, jukka.patynen@aalto.fi

Tiivistelmä

Huone- ja saliakustiikan tutkimus nojaa perinteisesti mitattuihin monauraalisiin tai tilaimpulssivasteisiin, jotka kuvaavat tilan akustiikkaa lähetys- ja vastaanottopisteiden välillä lineaarisesti. Viime aikaisten tutkimusten perusteella musiikkisignaaleiden sekä suuntakuulon epälineaarisuudet tekevät kuitenkin huoneakustisesta kokonaisuudesta epälineaarisen. Yksi esimerkki epälineaarisuudesta on havaittujen musiikin dynamiikkaerojen korostuminen. Dynamiikka kuuluu varsinkin klassisen musiikin tärkeimpiin ilmaisukeinoihin, ja dynaamisten havaintojen korostumisen oletetaan tuottavan voimakkaamman kuunteluelämyksen. Tässä artikkelissa esiteltävissä kuuntelukokeissa koehenkilöt arvioivat eroja eri konserttisalien akustiikassa toistetun musiikin dynamiikassa. Lisäksi koehenkilöiden tunnereaktioita keskittyneen kuuntelun aikana seurattiin erillisessä kokeessa psykofysiologisin mittauksin. Tulokset osoittavat että konserttisalin akustiikka vaikuttaa dynamiikan tuottamaan havaintoon. Suurin dynamiikan kontrasti havaittiin suorakaiteen muotoisissa saleissa. Samoin psykofysiologiset reaktiot ovat voimakkaampia suorakaiteen muotoisten salien akustiikassa, ja tunneperäisen vaikuttavuuden suuruus vastaa aiemmin esitettyä parhaiden konserttisalien subjektiivista järjestystä.

1 JOHDANTO

Akustisissa konserteissa soittimien ääni sekä ympäröivän tilan akustiikka yhdistyvät erottamattomasti toisiinsa. Sinfoniakonserttien tapauksessa ääni on lähtöisin orkesterista, ja ympäröivä akustinen tila on tyypillisesti konserttisali. Kuten monilla muillakin taidemuodoilla, musiikin perimmäinen tarkoitus on tunnetilojen välittäminen kuulijalle [1], ja monille musiikin kuuntelu on eri taidemuodoista voimakkain tunnekokemusten lähde [2]. Tyypillisiä musiikillisia ilmaisukeinoja ovat mm. äänenkorkeus, äänen kesto, sointiväri ja dynamiikka [3, s. 6]. Etenkin dynaamisilla vaihteluilla on huomattava merkitys taidemusiikin ilmaisuvoimaan [4], ja ilman dynamiikkaa esityksen teho ja kyky koskettaa kuulijaa on suppeampi. Voimakkaimmillaan musiikin kuunteleminen tuottaa mielihyvää, joka puolestaan saattaa ilmetä jopa selkeinä fysiologisina reaktioina, kuten tunneperäisinä kylminä väreinä tai ihon menemisestä “kananlihalle” [5, 6].

Huone- ja saliakustiikassa impulssivaste määrittelee miten lähteen tuottama äänenpaine etenee vastaanottopisteeseen. Viimeisen puolivuosisadan aikana on löydetty kuuntelukokeiden avulla mm. varhaisten poikittaisheijastusten positiivinen vaikutus havaittuun äänikuvan leveyteen ja ympäröivyyteen, ja niiden myötä subjektiiviseen havaintoon [7, 8].

Vaikka impulssivaste on lineaarinen siirtofunktio, akustisten soittimien sekä kuulojärjestelmän toiminta ei ole lineaarinen. Yhdessä nämä kolme komponenttia muodostavat epälineaarinen systeemin, joka vaikuttaa epälineaarisesti myös havaittuun dynamiikkaan [9]. Yksi tämän artikkelin näkökulmasta oleellinen löydös on suuremman äänitason vaikutus kasvaneeseen havaittuun äänen leveyteen [10]. Aiemmissä kuuntelukokeissa [8, 11, 12] käytetyt musiikkisignaalit ovat pääsääntöisesti olleet lähes stationäärisiä dynamiikan suhteen, ja tutkimukset äänenvoimakkuuden vaikutuksesta havaittuun akustiikkaan on toteutettu keinotekoisesti toistettua äänitasoa muuttamalla. Kuitenkin useissa lähteissä arvellaan [13, 14, 15] varsinaisen dynamiikan ja sen välittymisen olevan merkittävä osuus kuuntelukokemuksessa. Seuraavaksi esitellyt kokeet pyrkivät osoittamaan, että orkesterin dynamiikka havaitaan eri tavalla eri saleissa, ja että dynaamisilla vaihteluilla on yhteys musiikin herättämiin tunteisiin ja täten myös saliakustiikan kokonaisuuteen.

Tämä artikkeli esittelee sarjan kuuntelukokeita, jossa vertaillaan koehenkilöiden psykofysiologisia vasteita, koettua äänikuvan vaikuttavuutta, sekä koehenkilöiden havaitsemia muutoksia orkesterimusiikin dynaamisissa vaihteluissa.

2 MENETELMÄT

Kuuntelukokeiden perustana on suomalaisten ja eurooppalaisten konserttisalien kattavat mittaukset. Äänilähteenä on käytetty standardimittausta paremmin todellista orkesteria vastaavaa 24 lähdekanavan kaiutinorkesteria [16]. Mikrofoniasetelmalla mitattujen impulssivasteen ääniaaltojen aikaeroista estimoidaan äänen hetkellinen tulosuunta jokaiselle vasteen näytteelle 1,5 ms analyysi-ikkunoissa [17]. Suuntainformaation avulla impulssivaste jaetaan konvoluutiokaiuiksi akustoidun kuunteluhuoneen eri suunnissa oleviin 24 kaiuttimeen. Konvolvoimalla analysoidut tilaimpulssivasteet kaiuttomien orkesteriäänitysten kanssa lopputuloksena saadaan realistinen tilavaikutelma kaiutinorkesterin kautta toistetusta musiikista konserttisalin mittauspisteessä [18]. Kuuntelukokeissa oli mukana kuusi konserttisalia: Wienin Musikverein (VM), Amsterdamin Concertgebouw (AC), Berliinin Konzerthaus (BK) sekä Filharmonia (BP), Kölnin Filharmonia (CP), sekä Helsingin Musiikkitalo (HM). Näistä kolme ensimmäistä ovat ns. kenkälaatikko-saleja, ja kolme jälkimmäistä ovat viinitarha- tai amfiteatterityyppisiä saleja. Kokeissa käytettiin jokaisesta salista kolmea vastaanottopistettä: etupermannon keskiosassa (R1), takapermannon oikealla sivulla (R2), ja parven eturivissä tai lähimmässä vastaavassa paikassa (R3). Kuuntelukokeisiin osallistui 28 eri ikäistä koehenkilöä, ja heidän musiikilliset taustansa olivat tarkoituksella erilaisia. Kaikilla oli kriittistä kokemusta aiemmin järjestetyistä kuuntelukokeista.

Ensimmäisessä kokeessa koehenkilöt kuuntelivat keskittyneesti orkesterimusiikin katkelmaa, joka toistettiin peräjälkeen yhteensä 13 vastaanottopisteessä (esittelynäyte sekä kaksi permannon pistettä kuudessa salissa). Musiikinäyte oli 28 sekunnin jakso Beethovenin 7. sinfoniasta [19], jossa alku soitetaan hiljaisessa dynamiikassa (*piano*), ja puolivälissä koko orkesteri yhtyy huomattavaan crescendoon päättyen *forteen*. Esittelynäyte toistettiin Münchenin Filharmonian akustiikassa katkaisemalla lisäksi impulssivaste ensimmäisen 100 ms jälkeen. Näin esittelynäytteestä saatiin vaatimattoman kuuloinen varsinaisiin testinäytteisiin verrattuna. Satunnaisjärjestyksessä toistettujen näytteiden välillä oli 15 sekunnin tauko. Koehenkilöiden toisen käden keskisormeen ja nimettömään kiinnitettiin

ennen kokeen alkua elektrodit, joilla tallennettiin ihon sähkönjohtavuutta musiikinäytteiden kuuntelun aikana [20]. Galvaaninen ihovaste (skin conductance response, SCR) on eräs yleinen tapa mitata tunnereaktioista johtuvan autonomisen hermoston aktivaatiota [21, 22]. Kokeen hypoteesina musiikin dynamiikka sekä ekspressiivisyys välittyvät kuulijalle tehokkaammin tietyissä saleissa, jolloin voimakkaammat fysiologiset reaktiot viittaavat paremmin musiikkia tukevaan saliakustiikkaan.

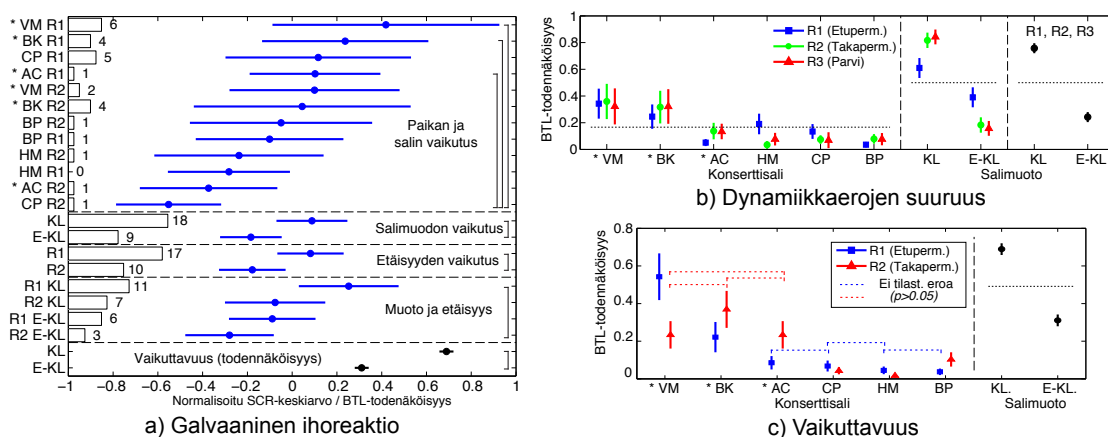
Toisessa kokeessa koehenkilöt vertailivat parivertailumenetelmällä orkesterin yhtäkkistä dynaamista muutosta kahdessa eri akustiikassa. Ääninäyte oli luotu kaiuttomista Brucknerin 8. sinfonian äänityksistä [19] yhdistämällä kaksi kolmen tahdin mittaista katkelmaa peräkkäin. Huomattavin ero katkelmien välillä on musiikin dynamiikka musiikin harmonian sekä soitettujen nuottien äänialan pysyessä käytännössä samoina. Vertailtavana oli kolme kuuntelupistettä kuudessa salissa. Koemenetelmänä oli parivertailu, ja samalla etäisyydellä olevia paikkoja vertailtiin keskenään. Tällöin parivertailuja muodostui yhteensä 45 (15 paria saleista \times 3 paikkoja). Koehenkilö valitsi kahdesta rinnakkain kuunnellusta näytteestä sen, jonka aikana kuultu muutos tuntui suuremmalta. Koehenkilöille ei kerrottu mitkä asiat näytteen aikana mahdollisesti muuttuivat. Suuremman muutoksen valinnan lisäksi koehenkilöä pyydettiin kuvailemaan lyhyesti erilliselle paperilomakkeelle peruste kullekin valinnalle.

Kolmannessa kokeessa koehenkilöiden kokemaa ääninäytteen vaikuttavuutta tutkittiin samojen Beethoven-katkelmien avulla parivertailumenetelmällä kuin ensimmäisessä kokeessa. Koehenkilöitä ohjeistettiin valitsemaan kerrallaan kahdesta vertailtavasta akustiikasta se kumpi tuntui olevan “vaikuttavampi”, “sävyttävämpi” tai “puhuttelevampi”.

Ensimmäisessä kokeessa ihovasteista kerätystä mittaussignaalista purettiin lyhyen aikavälin faasisesta komponentista hermoaktivaation impulssit [23]. Crescendon aikana ja pian sen jälkeen havaittujen hermoimpulssien summat normalisoitiin koehenkilön keskiarvon ja keskihajonnan suhteen logaritmisella asteikolla [24]. Normalisoinnin tarkoituksena on tehdä tuloksista vertailukelpoisia, sillä koehenkilökohtaisten mitta-arvojen vaihteluvälit saattavat poiketa voimakkaasti toisistaan. Lopulliset tulokset saatiin normalisoitujen vasteiden keskiarvoista ja hajonnasta, ja tilastollisesti merkittävät erot analysoitiin Kruskal-Wallis -testillä. Parivertailujen tuottamat valintamatriisit on analysoitu Bradley-Terry-Luce (BTL) -mallilla, joka antaa todennäköisyyden kyseisen näytteen valinnalle vertailtavasta joukosta. Dynamiikkaeroista kerätyt sanalliset kuvaukset purettiin keskustelemalla kokeen jälkeen koehenkilöiden kanssa. Selvästi samankaltaisiin havaintoihin viittaavat attribuutit luokiteltiin käsin seitsemään ryhmään, ja vaikeasti luokiteltavista attribuuteista muodostettiin oma ryhmänsä.

3 TULOKSET

Tulokset sähkönjohtavuusmittauksesta osoittavat, että orkesterimusiikin aiheuttama fysiologinen reaktio riippuu konserttisalin akustiikasta. Korkein vasteiden keskiarvo havaittiin Wienin Musikvereinin etupermannolla, ja matalin arvo takapermannolla Kölnin Filharmoniaassa (Kuva 1a). Kaikkien kuuntelupisteiden väliset erot eivät ole tilastollisesti merkitseviä, sillä luottamusvälit ovat verrattain suuria koehenkilöiden tuottamien vasteiden välisistä eroista johtuen. Salin muodoista kenkälaatikkotyypillä sekä kuunteluetäisyyk-



Kuva 1: Kuuntelukokeiden tulokset. Kuvassa a) pisteet ja poikittaisviivat osoittavat normalisoidun mittasuureen keskiarvon sekä 95% luottamusvälin. Oikean reunan viivat ilmaisevat tilastollisesti merkitsevästi eroavat näytteet tai ryhmät. Vasemman reunan lukuarvot ilmaisevat koehenkilöiden lukumäärän, joilla kyseinen näyte sai aikaan heidän voimakkaimman reaktionsa. Kuvissa b) ja c) arvot pystyakselilla ilmaisevat todennäköisyyden jolla kyseinen näyte valitaan muiden vertailtavien näytteiden joukosta. Kuvan c) vaakasuuntaiset hakasulut ilmaisevat näyteparit joiden välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa. Paikat kenkälaatikkosaleissa on merkitty tähdellä. (KL = kenkälaatikkomuoto, E-KL = ei-kenkälaatikkomuoto)

sistä orkesterin läheisyydellä on samansuuruiset positiiviset vaikutukset ihoreaktioon vaihtoehtoisin tilanteisiin verrattuna.

Dynamiikan havaitsemiskokeessa 1260 parivertailusta yhteensä 983:ssa havaittiin eroja konserttisalien välillä. Huomattavimmat erot musiikin dynamiikan vaihteluissa havaittiin Musikvereinissa sekä Berliinin Konzerthausissa (Kuva 1b), jotka ovat molemmat kenkälaatikon mallisia saleja. Muiden salien keskinäiset erot riippuvat kuunteluetäisyydestä. Yleisesti kenkälaatikkomuodosta poikkeavien salien havaittu dynamiikka oli varsin pieni. Erot salityyppien välillä korostuvat kenkälaatikkomuodon hyväksi mitä etäämmällä orkesterista kuuntelupiste sijaitsee.

Dynamiikan muutoksen aiheuttamia havaintoja kuvaavista attribuuttiryhmistä suurimmaksi muodostuivat äänenvoimakkuuteen viittaavat havainnot (23.0% arvioista) sekä äänen leveys (16.2%). Molemmissa ryhmissä ero salityyppien välillä noudattaa samaa tulosta kuin kuvan 1b keskimmaisessä osassa, eli musiikin dynamiikkavaihtelussa havaittu voimakkuus- ja leveysmuutos on voimakkaampi kenkälaatikkosaleissa erityisesti takapermannolla ja parven eturivillä verrattuna muun mallisiin saleihin. 11.5 prosentissa pareista ensisijaisesti havaittu muutos dynamiikan myötä oli kaiuntaisuudessa, jossa kenkälaatikkosalien kuultiin muuttuvan kaiuntaisemmiksi kasvavalla dynamiikalla. Dynamiikan muutos vaikutti vastaavalla tavalla myös basson määrään (9.6%). Sen sijaan havaitut vaikutukset kirkkauteen (12.1%) ja selkeyteen (6.2%) eivät olleet tilastollisesti yleisesti merkitseviä. Vaikeasti luokiteltavien attribuuttien ryhmä (21.5%) noudattaa kuvan 1b mallia salityyppien välillä.

Subjekttiivinen musiikin vaikuttavuus koettiin etupermannon kuuntelupisteistä vahvimaksi Musikvereinissa ja Berliinin Konzerthausissa kuvan 1c mukaisesti. Takaperman-

nolla erot ovat pienemmät, ja Concertgebouwin vaikuttavuus on lähempänä muita kenkälaatikkosaleja. Kölnin Filharmoniaassa sekä Musiikkitalossa koettu vaikuttavuus on kauttaaltaan matala, ja tämä korostuu vielä siirryttäessä kauemmas orkesterista. Berliinin Filharmoniaassa vaikuttavuus on takapermannolla suhteellisesti parempi kuin etupermannolla.

4 ANALYYSI JA YHTEENVETO

Tulokset viittaavat selvästi siihen, että salien, salityyppien ja kuunteluetäisyyksien välillä on merkitystä kaikilla kuuntelukokeissa käytetyillä mittareilla. Tuloksia verrattiin korrelaatioanalyysillä standardoituihin sekä muihin huoneakustisiin tunnuslukuihin oktaavikaistoittain. Ihovastemittauksessa suurin merkitsevä korrelaatio (merkitsevyystaso $p < 0.05$) molemmat etäisyydet huomioiden havaittiin laajakaistaisessa vahvistuksessa (G, Pearsonin korrelaatiokerroin $r^2 > 0.6$) sekä myöhäisessä poikittaisessa energias- sa (LJ, $r^2 > 0.6$). Pisteessä R1 vahvimmin korreloivat 125-250 Hz G sekä erityisesti laajakaistainen korvienvälinen varhainen epäkoherenssi (1-IACC80, $r^2 > 0.88$). Pisteessä R2 ainoa merkitsevä korrelaatio ($r^2 = 0.95$) havaittiin 1-2 kHz taajuuskaistoilla BDR-parametrissa, jota on esitetty havaitun dynamiikan objektiiviseksi tunnusluvuksi [9]. Sivuttaisheijastukset ovat G-, LJ-, ja (1-IACC80) -parametrien yhdistävä tekijä, ja näiden parametrien korkeat arvot viittaavat korrelaatioiden perusteella korostuneeseen dynamiikkahavaintoon.

Vaikka riittävä selkeys on yksi tärkeä osa-alue onnistuneessa saliakustiikassa, mielenkiintoisena tuloksena selkeyttä kuvaava C80-tunnusluku ei korreloi positiivisesti kokonaisu- mykseen liittyvien koetulosten kanssa. Päinvastoin, tilastollisesti merkitsemätön korrelaatiokerroin on lähes poikkeuksetta negatiivinen. Ensisijaisena suunnittelukriteerinä usein pidettävällä jälkikaiunta-ajalla on positiivinen, mutta myöhäisen energian poikittaisuutta vähäisempi vaikutus fysiologiseen vasteeseen tai havaittuun dynamiikkaan.

Kuuntelukokeiden tulokset ovat suomalaisittain kiinnostavia vuonna 2011 avatun Helsingin Musiikkitalon kannalta, jonka akustiikasta on käyty aktiivista keskustelua heti avajaiskonsertista lähtien. Akustiikan erottelevuus ja selkeys lukeutuvat salin kiiteltyihin ominaisuuksiin, mutta esitettyjen sokkokokeiden perusteella äänikuva ei kuitenkaan ole erityisen vaikuttava. Etupermannolla dynaamiset erot tulevat vielä esiin kohtuullisesti, mutta kauempana salin tarjoama dynamiikka heikkenee muiden viinitarha- (BP) ja amfiteatterisalien (CP) tasolle.

Tulosten yhteenvedona salin muoto vaikuttaa merkittävästi musiikin ekspressiivisyyteen ja vaikuttavuuteen niin fysiologisten mittausten kuin subjektiivisten arvioiden perusteella. Kokeissa mukana olleista saleista selkeimmin edukseen erottuivat Wienin Musikverein sekä Berliinin Konzerthaus, jotka myös Beranek on listannut [25] akustiikaltaan maailman parhaiksi saleiksi.

VIITTEET

- [1] E. Schubert. The fundamental function of music. *Musicae Scientiae*, 13(2 suppl):63–81, 2009.
- [2] L. Dubé and J. Le Bel. The content and structure of laypeople's concept of pleasure. *Cognition & Emotion*, 17(2):263–295, 2003.

- [3] H. Owen. *Music theory resource book*. Oxford University Press, New York, NY, USA, 2000.
- [4] D. Huron. The ramp archetype and the maintenance of passive auditory attention. *Music Perception*, 10(1):93–92, 1992.
- [5] J. A. Sloboda. Music structure and emotional response: some empirical findings. *Psychology of Music*, 19:110–120, 1991.
- [6] A. J. Blood and R. J. Zatorre. Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proc Natl Acad Sci Am*, 98(20):11818–11823, 2001.
- [7] A. H. Marshall. A note on the importance of room cross-section in concert halls. *J Sound Vib*, 5(1): 100 – 112, 1967.
- [8] M. Barron. The subjective effects of first reflections in concert halls — the need for lateral reflections. *J Sound Vib*, 15(4):475–494, 1971.
- [9] J. Pätynen, S. Tervo, P. W. Robinson, and T. Lokki. *Proc Natl Acad Sci Am*.
- [10] W. V. Keet. The influence of early lateral reflections on the spatial impression. In *Proc. 6th International Congress on Acoustics*, volume 3, pages E53–E56, Tokyo, Japan, 1968.
- [11] M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse. Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *J Acoust Soc Am*, 56(4): 1195–1201, 1974.
- [12] J. Blauert and W. Lindemann. Auditory spaciousness - some further psychoacoustic analyses. *J Acoust Soc Am*, 80(2):533–542, 1986.
- [13] L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Springer, New York, NY, USA, 2004.
- [14] J. Meyer. *Acoustics and the Performance of Music*. Springer, New York, NY, USA, 2009.
- [15] E. Kahle. Validation d’un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et d’opéras. PhD thesis.
- [16] J. Pätynen. A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics. PhD thesis.
- [17] S. Tervo, J. Pätynen, A. Kuusinen, and T. Lokki. *J Audio Eng. Soc*.
- [18] T. Lokki. Tasting music like wine. *Physics Today*, 67(1):27–32, 2014.
- [19] J. Pätynen, V. Pulkki, and T. Lokki. *Acta Acust United Ac*.
- [20] W. Boucsein, D. C. Fowles, S. Grimnes, G. Ben-Shakhar, W. T. Roth, M. C. Dawson, and D. L. Filion. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, 49:1017–1034, 2012.
- [21] C. L. Krumhansl. An exploratory study of musical emotions and psychophysiology. *Canadian J of Experimental Psychology*, 51(4):336, 1997.
- [22] L.-O. Lundqvist, F. Carlsson, P. Hilmerron, and P. N. Juslin. Emotional responses to music - experience, expression, and physiology. *Psychology of Music*, 37(1):61–90, 2009.
- [23] M. Benedek and C. Kaernbach. A continuous measure of phasic electrodermal activity. *Journal of Neuroscience Methods*, 190:80–91, 2010.
- [24] J. J. Braithwaite, D. G. Watson, R. Jones, and M. Rowe. A guide for analysing electrodermal activity (EDA) & skin conductance responses (SCRs) for psychological experiments. *Psychophysiology*, 49: 1017–1034, 2013.
- [25] L. L. Beranek. Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls. *Acta Acust United Ac*, 89(3):494–508, 2003.