



This is an electronic reprint of the original article. This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Cucharero Moya, Jose; Hänninen, Tuomas; Lokki, Tapio Akustiikkamateriaalien kulmariippuvainen äänenabsorptio

Published in: Akustiikkapäivät 2021

Julkaistu: 24/11/2021

Document Version Publisher's PDF, also known as Version of record

Published under the following license: CC BY

Please cite the original version:

Cucharero Moya, J., Hänninen, T., & Lokki, T. (2021). Akustiikkamateriaalien kulmariippuvainen äänenabsorptio. teoksessa *Akustiikkapäivät 2021* (Sivut 245-252). (Akustiikkapäivät). Akustinen Seura ry. https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2021/11/akustiikkapaivat_2021_s245.pdf

This material is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of the repository collections is not permitted, except that material may be duplicated by you for your research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered, whether for sale or otherwise to anyone who is not an authorised user.

ABSORPTIO ÄÄNEN TULOKULMAN FUNKTIONA

Jose Cucharero^{1,2*}, Tuomas Hänninen¹, Tapio Lokki²

¹ Lumir Oy, Tammiston kauppatie 22, 01510 Vantaa

² Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, Otakaari 5, 02150 Espoo

jose.cuchareromoya@lumir.fi

Tiivistelmä

Esittelemme tässä artikkelissa vaihtoehtoisen tavan mitata äänen absorptioominaisuuksia 2D-goniometrillä. Laitteistolla voidaan mitata materiaalin äänen absorptiokerroin äänen eri tulo- ja heijastuskulmilla. Menetelmä perustuu ensimmäisten heijastusten erotteluun muista häiritsevistä heijastuksista aikaikkunoinnilla. Menetelmän etuna on helppo näytteen valmistus, suhteellisen pieni näytekoko ja mahdollisuus mitata helposti perforoituja näytteitä. Menetelmällä saadut tulokset korreloivat hyvin jälkikaiuntahuone- ja impedanssiputkimittauksista saatuihin tuloksiin ja auttavat ymmärtämään materiaalien äänen absorptiota entistä laajemmin.

1 JOHDANTO

Materiaalien äänen absorptio-ominaisuuksien mittaukseen käytetään yleisimmin ns. jälkikaiuntahuone- ja impedanssiputkimenetelmiä. Kaiuntahuoneessa jälkikaiuntamittaus suoritetaan diffuusiksi oletetussa kentässä ja impedanssiputkimittaus tapahtuu kohtisuo-raan näytettä vastaan suunnatulla herätteellä. On kuitenkin hyvin yleisesti tiedossa, että absorptio-ominaisuuksien on myös havaittu riippuvan äänen tulokulmasta. Esittelemme tässä artikkelissa tavan mitata äänen absorptiota äänen eri tulo- ja heijastuskulmilla ja osa tuloksistamme on raportoitu jo aiemmin [1].

2 LAITTEISTO JA MITTAUSMENETELMÄ

Materiaalien kulmariippuvaiset äänen absorptiokertoimet määritettiin heräteäänen ensimmäisestä heijatuksesta 2D-goniometrillä, esitettynä kuvassa 1a. Laitteisto koostui kahdesta puolikaaresta, joista äänilähteen puolelle asennettiin vapaasti 0° - 85° kulmissa liikuteltava kaiutin (YAMAHA HS5), ja vastaanottopuolelle 5° välein tärähdyksiä vaimentaviin pidikkeisiin asennetuista 14 pallokuvioisista mikrofoneista (1/4-tuuma, malli Superlux ECM-999). Äänilähde- ja vastaanottopuoli koostuivat erillisistä osista rakenteellisten resonanssien välttämiseksi. Laitteiston dimensiot ovat esitetty kuvassa 2a. Mitattavan näytteen koko on 50 cm x 50 cm ja näytteen pinnan keskipisteen etäisyys puolikaaresta 2 m ja lattiasta 1.5 m. Näytteen koko määrittää mitattavan taajuusalueen.

Copyright ©2021 Jose Cucharero, Tuomas Hänninen ja Tapio Lokki. 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.

Näytteen koon kasvaessa mittaustarkkuus matalilla taajuuksilla paranee näytteen reunoista syntyvän diffraktion vähentyessä [2]. Mitatut akustiset rakenteet ovat esitetty Taulukossa 1 ja Kuvassa 1c.

Rakenteen kuvaus	Kokonaisrakenteen paksuus
Rei'itetty kipsilevy + 20 mm ilmaväli	33 mm
Rei'itetty kipsilevy + 20 mm lasivilla	33 mm
Rei'itetty kipsilevy + 40 mm ilmaväli	53 mm
Rei'itetty kipsilevy + 40 mm lasivilla	53 mm
20 mm lasivilla	20 mm
2x20 mm lasivilla	40 mm
40 mm Bioboard	40 mm

Rei'itetyn kipsilevyn reiän halkasijä on 8 mm, reikäala 15.5 % ja valmistaja Gyproc Saint-Gobain. Lasivillan tiheys on 93 kg/m³ ja valmistaja Ecophon Saint-Gobain. Bioboardin tiheys on 60 kg/m³ ja valmistaja Lumir Oy.

Tutkittava näyte asennettaan 0.5 cm teräslevystä ja kahdesta kipsi-levystä koostuvan mittaustelineen päälle 1b. Näytteen reunoja ympäröi puinen kehikko (korkeus 11 cm ja paksuus 1 cm). Esitetyn laitteiston mitoilla ensimmäinen häiritsevä heijastus, itse näytteestä saapuvan heijastusten jälkeen, tulee lattiasta ja se voidaan helposti ikkunoida pois.



Kuva 1: 2D-goniometri (a), korkeudeltaan säädeltävä näytepidike (b) sekä tutkitut materiaalit (c).



Kuva 2: Laitteiston dimensiot (a), sekä esimerkki signaalinkäsittelyn prosesseista impulssivasteen h3 laskemiseen. Mitattu pinta oli näyteteline, joka koostuu 0.5 cm paksusta teräslevystä ja 2 kipsilevystä; vastaanottokulma oli 65° ja äänen tulokulma 75° (b).

2.1 Ensimmäisten heijastusten määrittäminen ja terssikaistoittaisen äänienergian laskenta

Ensimmäiset heijastukset (ja reunoilta syntyvä diffraktio) määritettiin eri vastaanottopisteistä lasketuista impulssivasteista, jotka mitattiin näytteen suhteen eri kulmiin säädetyn äänilähteen ja mikrofonien avulla. Ensimmäisten heijastusten signaali erotettiin suoran äänen ja muiden pintojen heijastusten signaaleista ikkunoimalla. Impulssivasteet mitattiin 20 Hz – 20 kHz taajuusalueen logaritmisella taajuuspyyhkäisysignaalilla [3] Matlabin ITA-työkalulla [4] ja näytetaajuudella 44100 kHz. Impulssivaste määritettiin eri äänilähteen ja vastaanottopisteiden kulmissa sekä näytteen kanssa (h1) että ilman (h2), kts. Kuva 2b. Taustamelutaso on pidettävä matalana mittausten aikana, jotta saadaan tarpeeksi suuri signaali-kohinasuhde impulssivasteissa.

Impulssivasteiden alkupisteet tasattiin ajallisesti ISO 3382-1 standardin mukaisesti. Impulssivaste h3 saatiin suoran äänen ja häiritsevien heijastusten (h2) ja näytteen (h1) impulssivasteiden erotuksesta (h3 = h1 – h2). Mitattaessa on huomattava huoneen kosteus ja lämpötila, koska äänen nopeuden vaihtelu voi pienentää h2:n ja h1:n erotusta. Ensimmäisten heijastusten impulssivasteet ikkunoitiin suorakulmaisesti Hamming-ikkunan reunoilla. Hamming-ikkunan reunoja käyttämällä vältetään korkeiden taajuuksien oskillaatio, joka syntyy ikkunan suoraa reunaa käyttäessä. Ikkunan pituus määritellään häiritsevien heijastusten aikaerosta näytteestä lähteviin ensimmäisiin heijastuksiin. Mittauslaitteiston dimensioiden mukaan 250 näyteen ikkuna (n. 5,6 ms) on riittävä. Ikkunan pituus rajoittaa tulosten taajuusalueen matalilla taajuuksilla noin 250 Hz:iin.

Ensimmäisten heijastusten ikkunoidulle äänelle lasketaan spektri käyttäen diskreettiä Fourier-muunnosta. Spektri tasoitetaan terssikaistoittain. Tasoitetusta spektristä lasketaan magnitudivaste terssikaistoittain laskemalla spektripisteiden keskiarvo. Lopuksi magnitudivaste muutettiin terssikaistoittain desibeleiksi ja sitä käytetään äänen absorptiokertoimien laskelmissa. Kuvassa 2b on esimerkki signaalinkäsittelyn prosesseista impulssivasteen h3 laskemiseen.

2.2 Absorptiokertoimien laskenta

Absorptiokertoimet lasketaan kaavalla (1), joka ilmaisee kuinka suuri osuus materiaaliin osuvasta äänienergiasta absorboituu:

$$\alpha = \frac{I_{\rm i} - I_{\rm r}}{I_{\rm i}} = 1 - \frac{I_{\rm r}}{I_{\rm i}},\tag{1}$$

missä I_i ja I_r ovat saapuva ja heijastunut äänienergia. Referenssinäytteen asennustapa ja dimensiot ovat samat kuin tutkittavan näytteen, josta seuraa:

$$\left(\frac{I_{\rm PR}}{I_{\rm S}}\right)_{\rm atReceiver} = \left(\frac{I_{\rm i_{\rm S}}}{I_{\rm r_{\rm S}}}\right)_{\rm atSpecimen},\tag{2}$$

missä $I_{\rm PR}$ ja $I_{\rm S}$ ovat täydellisesti heijastavasta levystä sekä näytteestä mitatut äänienergiat vastaanottopisteessä. $I_{\rm is}$ ja $I_{\rm rs}$ ovat tutkittavaan näytteeseen osuva ja siitä heijastuva äänienergia. Menetelmässämme käytettävän 0,5 cm paksusta teräslevystä ja kahdesta kipsilevystä koostuva näyteteline oletetaan täydelliseksi heijastuslevyksi 250 Hz:stä ylöspäin ja sitä käytetään referenssinä mittauksille.

Mittausmenetelmä voidaan olettaa vapaan kentän mittaukseksi, koska näytteestä lähtevien heijastusten signaali eristetään suorasta äänestä ja muista pinnoista syntyvien heijastusten signaalista. Tämän vuoksi äänen intensiteetti voidaan ilmaista äänenpaineen funktiona, $I = \frac{p^2}{\rho c I_{ref}}$, jolloin yhtälö (1) voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\alpha = 1 - \frac{I_{\rm r}}{I_{\rm i}} = 1 - \frac{I_{\rm PR}}{I_{\rm S}} = 1 - \frac{p_{\rm PR}^2}{p_{\rm S}^2}$$
(3)

Vastaavasti sama äänenpainetasona eli desibeleinä:

$$10log_{10}(1-\alpha) = L_{\rm ppR} - L_{\rm ps} \tag{4}$$

missä $L_{\rm ppR} - L_{\rm ps}$ on tutkittavan näytteen äänienergian vaimennus, D, verrattuna täydelliseen heijastuslevyyn. Tutkittavan näytteen äänienergian vaimennus voidaan kirjoittaa seuraavassa muodossa:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} 20 \log_{10}(h_{3_i})_{\text{REF}} - \sum_{i=1}^{n} 20 \log_{10}(h_{3_i})_{\text{S}}}{n},$$
(5)

missä n on spekulaarisen heijastusalueen vastaanottopisteiden määrä, ja h3 ikkunoidut impulssivasteet kyseisistä pisteistä. Spekulaarinen heijastusalue on määritelty standardissa [5]. Lopulta tulokulmasta riippuva äänen absorptiokerroin saadaan yhtälöstä:

$$\alpha = 1 - 10^{(D/10)} \tag{6}$$

3 TULOKSET JA POHDINTOJA

Kuvissa 3 ja 4 on esitettynä terssikaistoittaiset absorptiokertoimet useasta vaimennusmateriaalista erilaisilla äänen tulokulmalla. Huokosilla materiaaleilla absorptiokertoimien havaittiin kasvavan matalilla taajuuksilla äänen tulokulman pienentyessä (Kuva 3). Matalien taajuuksien tuloksiin vaikuttavat mahdollisesti näytepidikkeen reunoista syntyvät diffraktiot sekä suoran äänen ja ensimmäisten heijastusten impulssivasteiden osittainen päällekäisyys. Myös käytetyt puiset reunat voivat vaikuttaa tuloksiin matalilla, <500 Hz taajuuksilla. Villapaneelin paksuuden kaksinkertaistuessa 20 mm:sta 40 mm:iin lisäämällä toinen paneeli absorptiokäyrän ensimmäinen huippupiste siirtyy noin oktaavin verran matalammille taajuuksille. Sama ilmiö on havaittavissa impedanssiputki- ja kaiuntahuone-menetelmillä [6]. 40 mm Bioboardin ja 40 mm villan äänen absorption ero johtuu materiaalien erilaisista tiheyksistä sekä niiden huokoisista rakenteista. Bioboardin ja lasivillan tiheydet ovat 60 kg/m³ ja 93 kg/m³. Erot villan ja bioboardin huokoisissa rakenteissa johtuvat erilaisten kuitujen ominaisuuksista, lasikuitu lasivillassa ja puukuitu bioboardissa sekä siitä, että Bioboardissa on suurempia huokosia. Samanlaisia tuloksia saadaan myös impedanssiputken sekä kaiuntahuoneen menetelmällä [7].

Teorian mukaan ääniaallot taittuvat väliaineiden rajapinnassa Snellin taittumislain mukaan kohti ainetta, jossa äänen nopeus on pienempi [6]. On esitetty, että huokoisissa materiaaleissa ääni taittuu kohtisuoraan pintaan nähden tulokulmasta riippumatta [6]. Tällaisia materiaaleja kutsutaan paikallisesti reagoiviksi materiaaleiksi. Usein materiaalien anisotrooppisuudesta johtuen materiaalien äänen absorptio muuttuu tulokulman funktiona.



Kuva 3: Huokoisten materiaalien terssikaistoittaiset absorptiokertoimet, jotka mitattiin neljällä erilaisella äänen tulokulmalla 30°, 45°, 60°, ja 75°. Mitatut materiaalit olivat 20 mm lasivilla, 40 mm BioBoard, ja 2x20 mm lasivilla.



Kuva 4: Rei'itetyn kipsilevyn terssikaistoittaiset absorptiokertoimet, jotka mitattiin kahdella erilaisella ilmavälillä lasivillan kanssa ja ilman neljällä erilaisella äänen tulokulmalla 30°, 45°, 60°, ja 75°.

Kuvassa 4 esitetään rei'itetyn kipsilevyn terssikaistoittaiset absorptiokertoimet, jotka mitattiin kolmella erilaisella ilmavälillä sekä lasivillan kanssa että ilman. Tyhjän ilmavälin kasvaessa absorptioresonanssi siirtyy matalammille taajuuksille, mutta kun ilmaväliin lisätään villaa se levittää absorptioresonanssin taajuusaluetta. Tulokset korreloivat hyvin kaiuntahuoneessa ja impedanssiputkella yleisesti mitattujen äänen absorptiokertoimien kanssa [1]. Ilmavälin sisältäessä villaa äänen tulokulman pienentyminen kasvattaa absorptioresonanssin maksimia kun taas ilman villaa rakenne toimii päinvastaisesti. Tämä ilmiö poikkeaa huokoisten materiaalien tuloksista (Kuva 3).

Teorian mukaan rei'itetyn kipsilevyn takana olevassa villassa ääniaallot kääntyvät kohtisuoraan pintaan nähden riippumatta äänen tulokulmasta. Kun levyn takana on pelkkä ilmaväli, sivuttaissuuntaiset ääniaallot etenevät vapaasti ilmavälissä ja voivat muuttaa rakenteen impedanssia, jolloin rakenteen äänen absorptio muuttuu äänen tulokulman mukaan [8].

Kuvassa 5 esitetään Bioboardin absorptiokertoimet terssikaistoilla 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ja 4000 Hz mitattuna yksittäisistä vastaanottopisteistä neljällä äänen tulokulmalla. Spekulaarisen alueen ulkopuolelta mitatuissa tuloksissa on nähtävissä paljon hajontaa korkeilla taajuuksilla. Näillä taajuuksilla spekulaarisen alueen ulkopuolisissa mittapisteissä signaali-kohinasuhde pienenee, mikä aiheuttaa mittausepätarkkuutta.



Kuva 5: Bioboardin absorptiokertoimet terssikaistoilla 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz ja 4000 Hz mitattuna yksittäisistä vastaanottopisteistä neljällä äänen tulokulmalla. Kuvien alapuolella on merkitty spekulaarisen heijastusalueeseen sijoittuvat vastaanottopisteet jokaisella äänen tulokulmalla.

4 YHTEENVETO

Tässä työssä esitettiin mittausmenetelmä, jolla voidaan tutkia rakenteiden absorptioominaisuuksia äänen tulokulman funktiona. Äänen absorptiomittaukset erilaisista absorptiorakenteista osoittavat, että menetelmällä on saatavissa samankaltaisia tuloksia kuin kaiuntahuone- ja impedanssiputki-menetelmillä. Mittauslaitteiston dimensiot ja tutkittavan näytteen koko osoittivat, että saadut tulokset ovat luotettavia 250 Hz terssikaistasta ylöspäin. Menetelmällä on useita etuja verrattuna aiempiin menetelmiin, koska sillä voidaan mitata äänen absorptio äänen tulokulman funktiona. Lisäksi se soveltuu melko pienille näytteille ja näytteen valmistus sekä asennus on todella helppoa. Menetelmä helpottaa merkittävästi impedanssiputkinäytteiksi vaikeasti työstettävien kovien ja huokoisten materiaalien sekä rei'itettyjen levyjen mittausta.

VIITTEET

- Jose Cucharero, Tuomas Hänninen, and Tapio Lokki. Angle-dependent absorption of sound on porous materials. In *Acoustics*, volume 2, pages 753–765. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020.
- [2] Peter D'Antonio and Trevor Cox. Aes information document for room acoustics and sound reinforcement systems-characterization and measurement of surface scattering uniformity. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(3):149–165, 2001.
- [3] Angelo Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Audio Engineering Society Convention 108*. Audio Engineering Society, 2000.

- [4] Marco Berzborn, Ramona Bomhardt, Johannes Klein, Jan-Gerrit Richter, and Michael Vorländer. The ita-toolbox: An open source matlab toolbox for acoustic measurements and signal processing. In *Proceedings of the 43th Annual German Congress on Acoustics, Kiel, Germany*, volume 2017, pages 6–9, 2017.
- [5] Iso 17497-1. Acoustics -sound-scattering properties of surfaces -part 2: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room., 2004.
- [6] Trevor J Cox and Peter D'antonio. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Crc Press, 2009.
- [7] Jose Cucharero, Tuomas Hänninen, and Tapio Lokki. Influence of sound-absorbing material placement on room acoustical parameters. In *Acoustics*, volume 1, pages 644–660. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.
- [8] Philippe Guignouard, Mathias Meisser, Jean F Allard, Pascal Rebillard, and Claude Depollier. Prediction and measurement of the acoustical impedance and absorption coefficient at oblique incidence of porous layers with perforated facings. *Noise control engineering journal*, 36(3):129–135, 1991.