

SCHROEDER - HLJÓÐDREIFAR

Útdráttur úr verkefni í rafhljóðverkfræði við Háskóla Wisconsin Madison, Bandaríkjunum



Sigrún Ragna Helgadóttir er fædd 28. júní 1968. Hún útskrifaðist sem rafmagnsverkfræðingur frá Háskóla Íslands 1992 og lauk M.Sc. prófi frá sama skóla 1996. Veturinn 2006-2007 stundaði hún hlutanám í hljóðverkfræði við Háskóla Wisconsin í Madison, Wisconsin, Bandaríkjunum. Sigrún starfaði hjá Rafmagnsveitu Reykjavíkur og Rarik með námi sumrin 1988-1991. Hún starfaði sem rafmagnsverkfræðingur hjá Rafmagnsveitu Reykjavíkur 1992, í Stjórnstöð Landsvirkjunar 1993-1994, hjá Verkfræðistofunni Afl og Orka 1996, á hljóðtækjajadeild Ríkisútvarpsins 1997-1998, við raforkustjórnkerfi (kerfiráð) Alliant Energy í Madison, Wisconsin, Bandaríkjunum 1999-2005. Sigrún starfar nú við hljóðvist hjá verkfræðistofunni VGK-Hönnun.

Schroeder-hljóðdreifar

Í rýmum þar sem hljóðvist hefur verið veitt sérstök athygli má oft sjá sérkennilega lögun veggja. Sem dæmi má nefna hljóðupptökuver. Þessa lögun má oft rekja til svokallaðra Schroeder-hljóðdreifa (e. Schroeder diffusers).

Hver er Schroeder?

Schroeder fæddist árið 1926 í Þýskalandi [Schr 07a]. Hann var ungur nemandi við Háskólann í Göttingen, Þýskalandi, um miðja síðustu öld. Á þessum tíma stunduðu hljóðtæknifræðingar mikið af tíðnisvörnumælingum á hinum ýmsu tónleikasölum. Schroeder fór að skoða þetta og birti sína fyrstu grein um þetta efni árið 1954 [Schr 87]. Hann komst að því að ójafna tíðnisvörnum mátti rekja til ómtíma salanna vegna handahófskennds endurkasts eigintíðna þeirra [Schr 91]. Hann fann einnig út að mannseyrað síar á náttúrulegan hátt út slíkar sveiflur í tíðnisvörnum þegar hlustað er á talað mál eða tónlist. Schroeder starfaði um árabíl hjá Bell Labs og hefur verið prófessor við háskólann í Göttingen í Þýskalandi frá árinu 1969 [Schr 04] [Schr 07b].

Rannsókn á Evrópskum tónleikasölum

Schroeder rannsakaði útbreiðslu hljóðs í ómandi rýmum [Schr 70]. Hann rannsakaði einnig starfsemi eyrans og hvernig við heyrum og skynjum hljóð [Schr 75]. Upp úr 1970 tók Schroeder sér fyrir hendur stóra rannsókn á 20 evrópskum tónleikasölum [Schr 74]. Kammersveit Lundúna (e. London Chamber Orchestra) féllst á að flytja verk eftir Mozart til upptöku í hljóðverum BBC, upptöku sem var alveg laus við umhverfisáhrif eins og bergmál eða ómtíma. Upptakan var síðan spiluð frá sviði hinna ýmsu tónleikasala með fjölda hátalara og líkti þetta eftir raunverulegum flutningi hljómsveitarinnar í viðkomandi sal. Hljóðmóttaka var tekin upp á band við bæði eyru gervihöfuðs sem staðsett var í sæti í salnum. Hljóðupptakan var síðan spiluð fyrir hlustanda sem sat í hljóðeinangruðu rými, eftir viðeigandi meðhöndlun hljóðmerkjanna tveggja sem bárust eyrunum. Hlustandinn gat nú skipt á milli helstu tónlistarsala á sekúndubroti og var beðinn um að velja þann flutning sem honum líkaði betur. Mynd 1 var tekin við rannsóknina [Schr 80] af gervihöfðinu sem notað var til upptöku á hljóðmerkjunum tveimur, eitt fyrir hvort eyra, í tónleikasal.



Mynd 1. D. Gottlob, "Gervihöfuð", og K.F. Siebrasse (frá vinstri til hægri) við hljóðmælingar í tónleikasal. Mynd fengin úr [Schr 80].

Niðurstöður rannsóknarinnar

Rannsóknin leiddi í ljós að hlustendur kjósa hljóðbylgjur sem koma frá hliðunum [Schr 93], frá veggjum, sem gefa þeim víðóma eða tvírása áhrif (e. stereophonic effect) frekar en hljóð sem endurkastast frá lofti og lendir jafnt á báðum eyrum á sama tíma, sem gefur einóma eða einrása áhrif (e. monophonic effect).

Niðurstaðan var þessi; tónleikasalir þar sem hátt er til lofts og þröngt til veggja falla betur að hlustendum en salir þar sem lágt er til lofts og vítt til veggja. Aðrir sem höfðu rætt þessi áhrif "snemma endurkastaðs hljóðs frá hliðum" (e. early lateral reflections) voru West [West 66], Marshall [Mrsh 67-68], Keet [Keet 68] og Barron [Brn 71]. Á tímum loftkælingar eru lág loft mun hagkvæmari í byggingu. Ef loftin verða áfram lág, hvernig er þá hægt að bæta hljómburð í þessum tónleikasölum þannig að hlustendum líki betur?

Dreifar

Í kjölfar rannsóknar á evrópskum tónleikasölum gefur Schroeder út grein árið 1974 þar sem hann leggur til að "dreifar" með mikilli hliðartvístrun verði settir á hliðarveggi og í loft tónleikasala. Þetta muni auka útbreiðslu hliðarhljóðbylgna, minnka þannig einslögun hljóðmerkis við eyrun tvö og þar með bæta hljómburð salarins. Til þess að dreifa hljóðinu, leggur Schroeder til að notað verði yfirborð sem dreifi hljóðorkunni jafnt í allar áttir. Fyrir mynstur slíks yfirborðs leggur Schroeder til að notaðar verði runur úr talnafræði.

Runur úr talnafræði

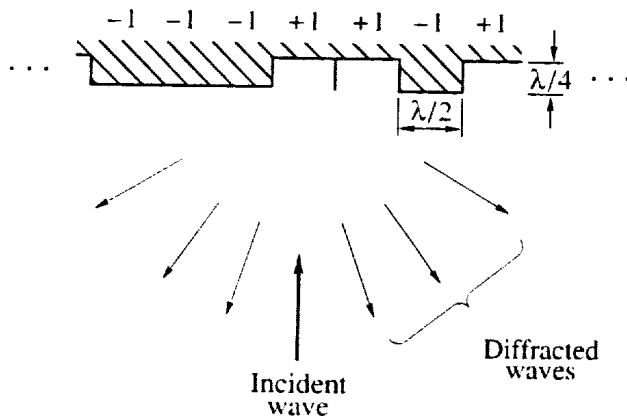
Svokölluð Galois runa (e. maximum-length sequence, MLS, eða Galois sequence), hefur þá eiginleika að aflróf hennar er svo til alveg flatt (fyrir utan dæld í beina stefnu). Vegna tengsla Fourier raðar og stefnuvirkni mynsturs mun yfirborð veggjar með endurkastsstuðla sem breytast frá +1 og -1, eftir slíkri runu, dreifa aðfallandi bylgju jafnt í allar áttir (fyrir utan dæld í spegilstefnuna sem samsvarar dc hluta í tíðnirófinu) [Schr 74].

Endurkastsstuðul +1 má fá með hörðum vegg og endurkastsstuðul -1 má fá með "rásam" í veggnum með dýpt sem samsvarar einum fjórða af bylgjulengd. Þetta veldur því að endurköstuð bylgja úr rásinni ferðast hálfri bylgjulengd á eftir bylgjunni sem endurkastast frá veggnum, og eyðir þannig bylgjulengdinni algerlega.

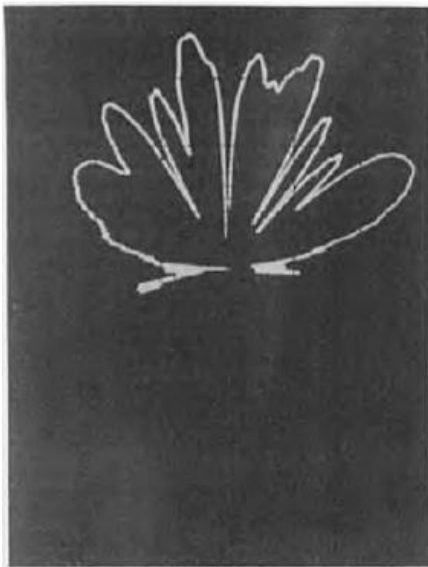
Með því að raða niður rásunum og hinu flata yfirborði eftir hinni svokölluðu MLS runu af +1 og -1, mun samanlögð hljóðorka sem endurkastast frá “dreifinum” dreifast svo til jafnt í allar áttir í stað þeirrar einu áttar sem myndi eiga sér stað með flötu yfirborði. Mynd 2a sýnir hvernig bylgja fellur á slíkt yfirborð og dreifist í allar áttir.

Þetta virkar hinsvegar aðeins fyrir þá einu bylgjulengd sem samsvararar einungis einni tiltekinni tíðni. Í raun fæst þó góð dreifing fyrir bylgjulengdir u.þ.b. hálfri áttund undir og yfir hönnunarbylgjulengdinni.

Mynd 2b var birt í fyrstu greininni sem fjallaði um hugmyndina að dreifum [Sch 74]. Hún sýnir hvernig rafsegulbylgja dreifist þegar hún skellur á yfirborði með $\frac{1}{4}$ bylgjulengdar djúpum rásunum raðað eftir MLS rununni (- + + - - + + + - - - + -).



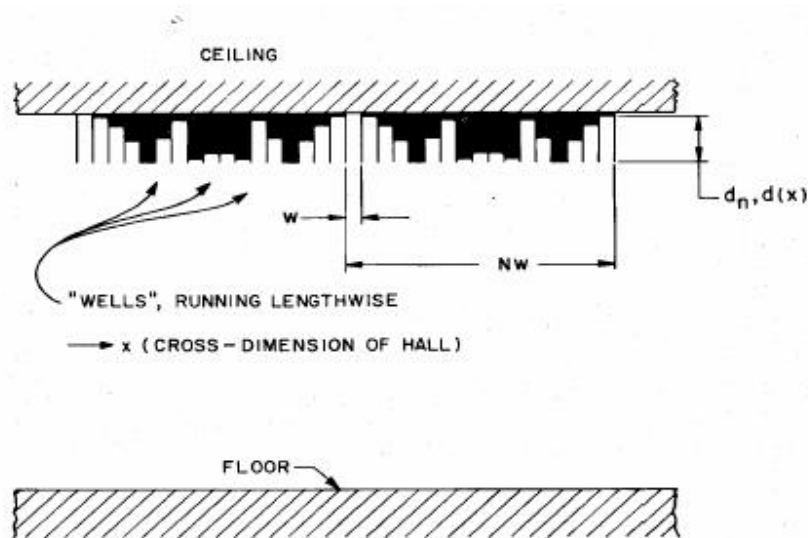
Mynd 2a. Dreifir sem byggir á Galois runu með lengd 7. Aðfallandi bylgja (e. Incident wave) skellur á yfirborðinu og dreifist í margar áttir (e. diffracted waves). Mynd fengin úr [Schr 03a].



Mynd 2b. Tvístrun frá yfirborði með endukastsstuðlum sem víxlast í x-átt samkvæmt einni lotu af MLS runu (- + + - - + + + - - - + -). Niðurstöður fengnar í tilraun með rafsegulörbylgjur. Mynd fengin úr [Sch 74].

Annars stigs dreifar (e. Quadratic Residue diffusers)

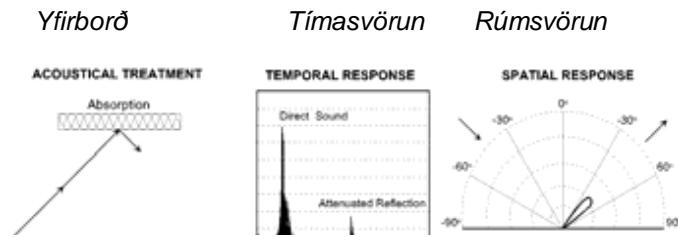
Til þess að dreifirinn virki fyrir fleiri bylgjulengdir eru notaðar rásir með mismunandi dýpt. Árið 1979 birti Schroeder grein [Schr 79] þar sem hann kynnti notkun annarar runu, fyrir hönnun á dreifum, með þann sama eiginleika að Fourier aðgerð gefur flatt tíðniróf. Þetta var svokölluð "annars stigs" runa (e. Quadratic residue sequences). Dýpt rásanna breytist frá núlli og rétt upp undir hálfa hönnunarbylgjulengdina. Þessir dreifar virka vel fyrir tíðnibil yfir fjórar áttundir og fyrir bylgjur sem koma frá mismunandi hornum. Mynd 3 sýnir annars stigs dreifi úr greininni. Fyrstu notkun annars stigs dreifa við hönnun stórs salar er lýst í grein Marshall og Hyde [Mrsh78]. Síðan þá hafa þeir verið notaðir víða.



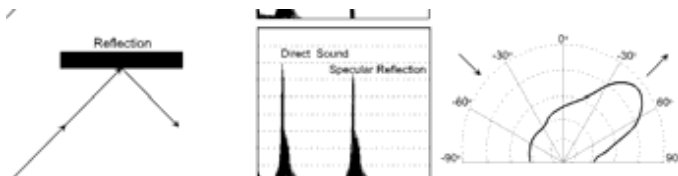
Mynd 3. Hliðar þversnið af lofti með dreifðu endurkasti byggt á annars stigs runu (e. quadratic residue sequence). Mynd fengin úr [Schr 79].

Framleiðsla á dreifum

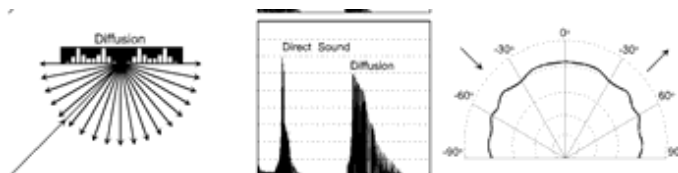
Cox (Acoustics Research Centre, UK) og D'Antonio (RPG Diffusor systems, USA) hafa rannsakað, framleitt og prófað Schroeder dreifa síðan stuttu eftir að fyrsta greinin um þá birtist og gefa gott yfirlit í greinunum [D'An 98] og [Cox 03]. Mynd 4 sýnir endurkast frá ísogsyfirborði og flötu yfirborði borið saman við endurkast frá dreifandi yfirborði. Myndin sýnir einnig tímasvörun (e. temporal response) þar sem sést hvernig speglandi endurkast flata yfirborðsins verður dreifðara með notkun annars stigs dreifisins. Rúmsvörun (e. spatial response) flata yfirborðsins sýnir stefnuvirk endurkast en svörun dreifisins sýnir mun jafnara og dreifðara endurkast.



a) Yfirborð með ísogi



b) Flatt yfirborð



c) Dreifandi yfirborð með annars stigs dreifi (e. Quadratic Residue Diffuser)

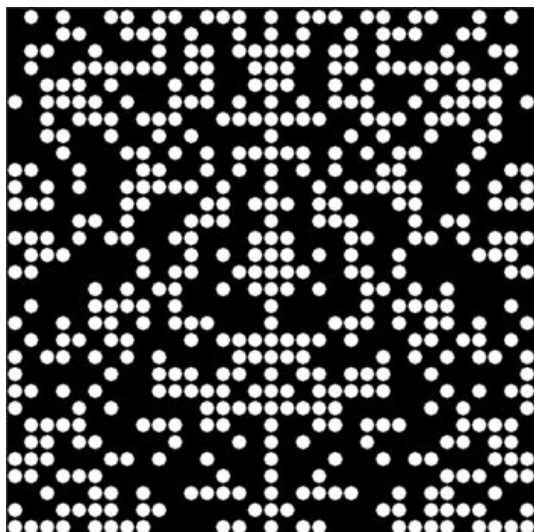
Mynd 4. Rúm- og tímasvörun hljóðs sem endurkastast frá a) yfirborð með ísogi, b) flötu yfirborði og c) dreifi. Mynd fengin úr [Cox 03] og [RPG 07a].

Frekari þróun í hönnun og notkun dreifa

Fræðin á bak við góðan hljómburð í tónleikasal eru töluvert ólík fyrir minni rými. Fræðigreinar hafa verið skrifaðar um mismunandi lausnir á mismunandi rýmum allt frá tónleikasölum til upptökuhljóðvera, stjórnklefa hljóðvera og heimila. Schroeder dreifar hafa nú verið framleiddir nú í yfir 30 ár og margar greinar verið birtar [D'AN 98-06] [Cox 00-06]. Annars stigs dreifar hafa náð mikilli útbreiðslu og eru notaðir víða en einnig hafa frekari rannsóknir verið gerðar sem byggjast á MLS rununum og tilsvareandi dreifar verið framleiddir.

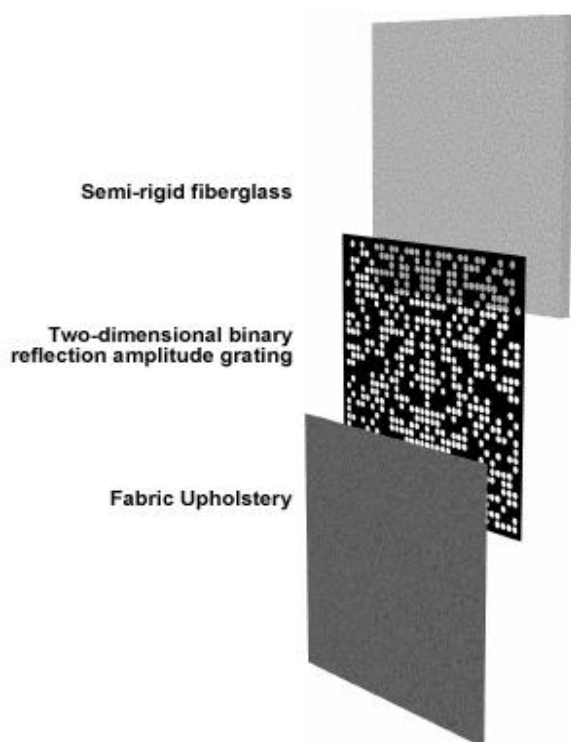
Ísogsdreifir (e. Diffsorber)

Dreifar með rásam geta verið fyrirferðarmiklir þar sem dýpt rásanna tengist beint þykkt veggplötunnar. Á seinni árum hafa dreifar með runum af endurkastandi efni og ísogsefni verið rannsakaðir fyrir lítil rými eða herbergi þar sem rými er takmarkað [D'An 98a]. Í greininni [D'An 05], er fjallað um slíkan dreifi og er hann kallaður "tví-útslags ísogsdreifir" (e. binary amplitude diffsorber eða BAD). Hann er í raun flatt blendings-yfirborð (hybrid surface) þar sem staðsetning ísogsbletta ákvarðast af MLS runu. Mynd 5 sýnir slíkt yfirborð. Svört svæði eru endurkastandi, hvít svæði eru holur sem veita aðgang að ísogsefni.



Mynd 5. Tví-útslags sniðmát (e. binary amplitude template). Svört svæði eru endurkastandi, hvít svæði eru holur sem veita aðgang að ísogsefni. Mynd fengin úr [RPG 07b].

Mismunandi runur úr talnafræði hafa verið rannsakaðar og prófaðar. Dreifir með blandað yfirborð (e. Hybrid surface diffusion) [Cox 03] er gerður úr ísogsefni, sniðmáti (e. template) og efni eða dula (e. cloth). Holur eru boraðar í sniðmátið þegar runan hefur stafinn 1 og þegar runan hefur stafinn 0, er engin hola boruð. Efnið eða dulan er notað til að fela sniðmátið og er "gegnsæ" (e. transparent) fyrir hljóðbylgjur. Mynd 6 sýnir dreifi með blandað yfirborð.

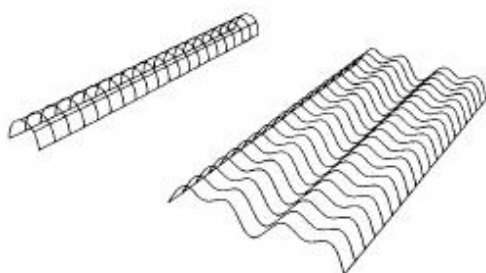


Mynd 6. Samsetning blandaðs yfirborðs eða tví-útslags ísogsdreifir (e. BAD panel) : ísogsefni (efst), sniðmát (miðja) og efni (neðst). Mynd fengin úr [RPG 07b].

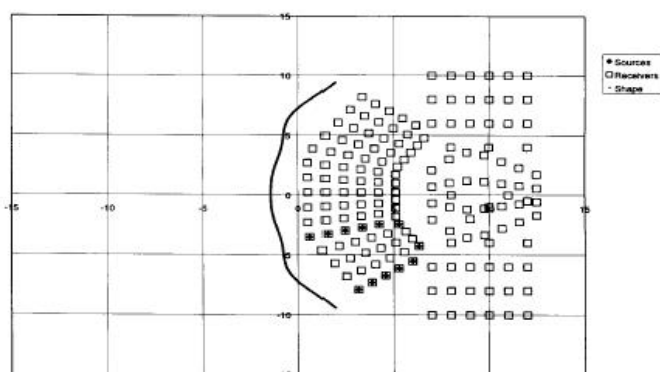
Bestunaraðferðir (e. Optimization methods)

Bestunaraðferðir hafa verið notaðar til að skapa “besta bugðotta yfirborð” (e. optimized curved surfaces) af D’Angelo og Cox [D’An 98a]. Höfundarnir leggja til notkun þessara yfirborða í tónleikasölum þar sem þau eru aðlaðandi og koma gjarnan til móts við hugmyndir arkitekta um útlit tónleikasala. Fyrir hljóðupptökuver leggja höfundar til notkun annars stigs dreifa.

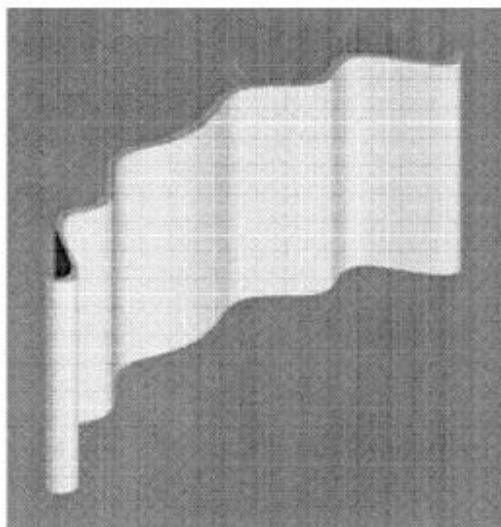
Notkun á bestuðu bugðottu yfirborði má sjá í Edwina Palmer salnum í Hitchin, UK [Cox 03]. Höfundar greinarinnar [Cox 03] segja mikilvægast að ákvarða hve mikla dreifingu þarf á hljóði og hvar skal nota dreifa. Myndir 7-8 [D’An 98a] sýna teikningar og notkun á slíku yfirborði. Mynd 9 [D’An 99] sýnir hið sama í þrívídd. Mynd 10 [Cox 03] sýnir uppsetninguna í Edwina Palmer Salnum.



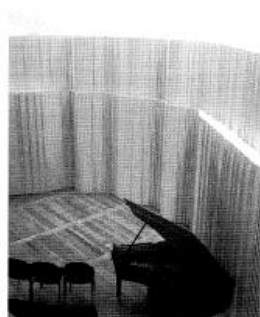
Mynd 7. Bestuð yfirborðslögun tveggja bugðottra dreifa með sömu hámarkshæð en mismunandi breidd. Mynd fengin úr [D’An 98a].



Mynd 8. Bestuð sveifluviddar-mótuð hljómburðar skel (e. Optimized amplitude-modulated acoustical shell). Sýndir eru nokkrir hljóðgjafar (tíglar) og viðtakar (ferningar). Mynd fengin úr [D’An 98a].



Mynd 9. Sveifluviddar-mótað yfirborð (e. amplitude modulated surface) sem minnkar brennidepils áhrif (e. focusing effects). Mynd fengin úr [D'An 99].



Mynd 10. Bestað bugðótt yfirborð (e. Optimized curved surface) í Edwina Palmer salnum í Hitchin, UK. Mynd: Arup Acoustics fengin úr [Cox 03].

Mannseyrað skynjar hljóð með tíðninni 20Hz til 20kHz eða u.þ.b. 10 eða 11 áttundir. Sjö mikilvægustu áttundirnar sem íhugaðar eru við framleiðslu hljóðdreifa ná frá um 80Hz til 5kHz [Cox 03]. Ef hljóðdreifir getur meðhöndlað um 4 áttundir þarf að finna aðrar leiðir fyrir önnur tíðnibil.

Samantekt

Margar rannsóknir hafa verið gerðar á hljómburði í rýmum og til úrbóta hafa meðal annars verið hannaðir hljóðdreifar. Gæði hljómburðar í gömlum tónleikasölum, þar sem hátt var til loftis og þröngt til veggja, hafa minnkað með breyttum byggingarstíl nútímans þar sem lofthreinsun leyfir lægri loft, aukinn fólksfjöldi krefst breiðari sala til að rúma fleiri sæti og sléttir fletir hafa komið í stað skreyttra, útfúraðra veggja og lofta sem áður veittu náttúrulega dreifingu á hljóði. Viðamikil rannsókn á evrópskum tónleikasölum leiddi í ljós að fólk upplifir betri hljómburð þar sem hljóðið berst til þeirra frá hliðunum á örlítið mismunandi tímum og gefur þeim þannig víðómaáhrif (e. stereophonic effect), frekar en hljóð sem berst frá lágu lofti jafnt á bæði eyrum og gefur einhljómaáhrif (e. monophonic effect). Í lágum, breiðum sölum nútímans er reynt að fá þessi áhrif og þar með bæta hljómburð, með notkun hljóðdreifa á veggjum og í lofti.

Heimildir

Greinar eftir Schroeder:

- [Schr 70] Schroeder, M. R., DIGITAL SIMULATION OF SOUND TRANSMISSION IN REVERBERANT SPACES, JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA 47 (2): 424& **1970**
- [Schr 74] Schroeder, M. R., Comparative Study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters, Volume: 56 Date: **1974** Pages: 1195-1201 Journal J.Acoust. Soc. Am
- [Schr 75a] Schroeder, M. R., Diffuse sound reflection by maximum-length sequences, Volume: 57 Date: **1975** Pages: 149-150 Journal J.Acoust. Soc. Am
- [Schr 75b] Schroeder, M. R., MODELS OF HEARING. PROCEEDINGS OF THE IEEE 63 (9): 1332-1350 **1975**
- [Schr 79] Schroeder, M. R., Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion, Volume: 65 Date: **1979** Pages: 958-963 Journal J. Acoust. Soc. Am.
- [Schr 80a] Schroeder, M. R., Acoustics in human communications: Room acoustics, music, and speech, Volume: 68 Date: **1980** Pages: 22-28 Journal J.Acoust. Soc. Am
- [Schr 80b] Schroeder, M. R., Towards better acoustics for concert halls, Volume: 33 Date: **1980** Pages: 24-30 Journal Physics Today
- [Schr 84a] Schroeder, M. R., PROGRESS IN ARCHITECTURAL ACOUSTICS AND ARTIFICIAL REVERBERATION - CONCERT HALL ACOUSTICS AND NUMBER-THEORY, Volume: 32 Issue: 4 Date: **1984** Pages: 194-203 Journal Journal of the Audio Engineering Society
- [Schr 84b] Schroeder, M. R., Number theory in science and communication : with applications in cryptography, physics, biology, digital information, and computing, **1984**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [Schr 91] Schroeder, M. R., Fractals, Chaos, Power Laws - Minutes from an Infinite Paradise, **1991**, W.H. Freeman and Company, New York
- [Schr 93] Schroeder, M. R., LISTENING WITH 2 EARS, Volume: 10 Issue: 3 Date: **1993** Pages: 255-280 Journal Music perception
- [Schr 95] Schroeder, M. R., PHASE GRATINGS WITH SUPPRESSED SPECULAR REFLECTION, Volume: 81 Issue: 4 Date: **1995** Pages: 364-369 Journal Acustica.
- [Schr 96] Schroeder, M. R., The "Schroeder frequency" revisited, Volume: 99, No. 5, Date: **1996** Pages: 3240-3241 Journal Acoust. Soc. Am.
- [Schr 98] Schroeder, M. R., Acoustics in the Audio Engineering Society, Volume: 46 Issue: 1-2 Date: **1998** Pages: 71-73 Journal of the Audio Engineering Society.
- [Schr 03a] Schroeder, M. R., Sequences from number theory for physics, signal processing, and art, Volume: 49 Date: JAN-FEB **2003** Pages: 97-108 Journal Acoustical physics.
- [Schr 03b] Schroeder, M. R., Reciprocal maximum-length sequence pairs for acoustical dual source

measurements, Volume: 113 Date: **2003** Pages: 2754-2761, J. Acoust. Soc. Am

[Schr 04] <http://www.physik3.gwdg.de/~mrs/Vortraege/Remembering-the-Good-Days-at-Bell-Laboratories-2004/index.html>

[Schr 07a] <http://www.physik3.gwdg.de/~mrs/>

[Schr 07b] <http://www.physik3.gwdg.de/%7Emrs/mrs/main.html>

Greinar eftir D'Antonio/Cox:

[D'An 98a] D'Antonio, P., Two decades of sound diffuser design and development - Part 1: Applications and design, Volume: 46 Issue: 11 Date: **1998** Pages: 955-976 Journal of the Audio Engineering Society

[D'An 98b] D'Antonio, P., Two decades of sound diffuser design and development - Part 2: Prediction, measurement, and characterization, Volume: 46 Issue: 12 Date: **1998** Pages: 1075-1091 Journal of the Audio Engineering Society

[D'An 00a] D'Antonio, P., Diffusor application in rooms, Volume: 60 Issue: 2 Date: **2000** Pages: 113-142 Journal Applied acoustics. Acoustique appliquee. Angewandte Akustik.

[D'An 00b] D'Antonio, P., Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures, Volume: 108 Date: **2000** Pages: 1710-1720, J. Acoust. Soc. Am

[Cox 00] Cox, Acoustic phase gratings for reduced specular reflection, Volume: 60 Issue: 2 Date: **2000** Pages: 167-186 Journal Applied acoustics. Acoustique appliquee. Angewandte Akustik.

[D'An 01] D'Antonio, P., AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity, Volume: 49 Issue: 3 Date: **2001** Pages: 149-165 Journal of the Audio Engineering Society

[Cox 03] Cox, Engineering art: the science of concert hall acoustics, Volume: 28 Issue: 2 Date: **2003** Pages: 119-129 Journal Interdisciplinary science reviews : ISR.

[Cox 04] Cox, Room sizing and optimization at low frequencies, Volume: 52 Issue: 6 Date: **2004** Pages: 640-651 Journal of the Audio Engineering Society.

[D'An 06] D'Antonio, P., Ternary and quadriphase sequence diffusers, Volume: 119 Date: **2006** Pages: 310-319 Journal J.Acoust. Soc. Am

[Cox 06] Cox, A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces, Volume: 92 Issue: 1 Date: **2006** Pages: 1-15 Journal Acta acustica united with Acustica.

[RPG 07a] RPG Diffusor systems,
http://www.rpginc.com/news/seminars/Diffuse_Seminar_2007_School_Acoustics.pdf

[RPG 07b] RPG Diffusor systems, Research & Development, Research Topics: Binary Amplitude Diffusor Part 1, <http://www.rpginc.com/research/6i2.htm>

Greinar eftir Beranek:

[Bnk 98] Beranek, L. L., Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces, Volume: 104 Date: **1998** Pages: 3169-3177 Journal J.Acoust. Soc.

Am

- [Bnk 99] Beranek, L. L., Acoustical design of the opera house of the New National Theatre, Tokyo, Japan, Volume: 107 Date: **1999** Pages: 355-367 Journal J.Acoust. Soc. Am
- [Bnk 01] Beranek, L. L., Mechanism of sound absorption by seated audience in halls, Volume: 110 Date: **2001** Pages: 2398-2411 Journal J.Acoust. Soc. Am

Aðrar greinar:

- [Brnn 71] Barron, M., The Subjective Effects of First Reflections in Concert Halls – The Need for Lateral Reflections, Volume: 15, Date: **1971**, Page: 475-494, Journal of sound and vibration
- [Brdl 83] Bradley J. S., Experience with new auditorium acoustic measurements, Volume: 73, Date: **1983**, Pages: 2051-2058, Journal Acoust. Soc. Am
- [Keet 68] Keet, W.V., The Influence of Early Lateral Reflections on the Spatial Impression, Proc.6th ICA, Tokyo, Paper E-2-4 Date: **1968**
- [Mrsh 67] Marshall, A Note on the Importance of Room Cross-Section in Concert Halls, Volume: 5, Date: **1967**, Page: 100, Journal of sound and vibration
- [Mrsh 68] MARSHALL, Concert Hall Shapes for Minimum Masking of Lateral Reflections, Proc.6th ICA, Tokyo, Paper E-2-3. Date: **1968**
- [Mrsh 78] Marshall, A. H., Hyde, J. R., Evolution of a Concert Hall: Lateral Reflection and the Acoustical Design for Wellington Town Hall, Vol.63, Date: 1978, S36 (A), J. Acoust. Soc. Am.
- [Mrsh 79] MARSHALL, SOME PRELIMINARY ACOUSTICAL CONSIDERATIONS IN THE DESIGN FOR THE PROPOSED WELLINGTON (NEW-ZEALAND) TOWN HALL, Volume: 63, Issue: 2, Date: **1979**, Pages: 201-211, Journal of sound and vibration
- [Ross 02] Rossing, Moore and Wheeler The Science of Sound, third edition, Addison Wesley, San Francisco Date: **2002**
- [Rtng 81] RETTINGER, CONTROL ROOM ACOUSTICS, Volume: 15, Issue: 10 Date: **1981**, Pages: 57-61, Journal DB.
- [Tshm 86] TOYOSHIMA, CONTROL ROOM ACOUSTIC DESIGN, Volume: 34, Issue: 5 Date: **1986**, Pages: 382-382, Journal of the Audio Engineering Society
- [West 66] West J.E., Possible Subjective Significance of the Ratio of Height to Width of Concert Halls, Volume: 40, Date: **1966**, 1245, J. Acoust. Soc. Am.