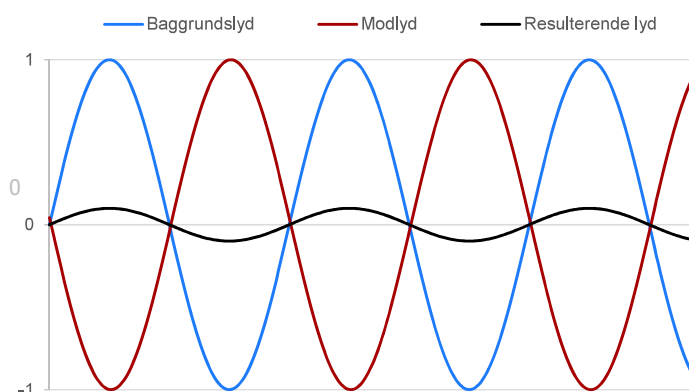


# AKTIV STØJREDUKTION TIL UDENDØR BRUG

SenseLab  
Side 1 af 8  
02-02-2024  
GARA/CVO

## 1 Introduktion

Aktiv støjreduktion (ANC) er en teknologi til at reducere baggrundsstøj. I dag bliver den primært brugt i hovedtelefoner – endda i små in-ear enheder (earbuds som f.eks. Apple AirPods Pro). Teknologien virker ved at en eller flere mikrofoner måler udefrakommende baggrundslyd og derefter afspiller en "modlyd", som delvist neutraliserer den udefrakommende lyd.



*Figur 1 Princippet i aktiv støjreduktion. En baggrundslyd (blå) har et lydtryk, som skiftevis er positivt og negativt. Hvis en modlyd (rød) med modsat negativt og positivt lydtryk afspilles på præcis det rigtige tidspunkt neutraliseres lyden. I praksis er der altid noget tilbage, som illustreret her med den sorte resulterende lyd (sort). I værste tilfælde kan modlyden forstærke baggrundslyden, når timingen er helt forkert (hvis kurverne ligger oveni hinanden).*

Dette betyder at neutralisering afhænger af, hvor præcist den udefrakommende lyd kan forudsiges. Teknologien virker godt i hovedtelefoner, fordi en del af den udefrakommende lyd bliver dæmpet passivt af transmissionen gennem hovedtelefonens materiale, der blokerer øregangen. Passiv dæmpning har stor effekt ved højere frekvenser (f.eks. 's'-lyde i tale), hvorimod aktiv dæmpning har stor effekt ved lave frekvenser (f.eks. den dybe bas).

Inden for de seneste par år, er aktiv støjreduktion blevet undersøgt som løsning i andre sammenhænge. F.eks. har B&O forsket i "lydzoner" i samarbejde med Aarhus Universitet og Aalborg Universitet. Et eksempel er situationen, hvor to mennesker lytter til noget forskelligt i samme rum – én ser TV, én lytter til musik. Her kan lydzone mindske lyden fra TV'et som når ind i musikzonen og omvendt. Der findes også et kommercielt system fra Meyer Sounds, som laver lydzone i restauranter, så samtaler fra andre borde ikke forstyrre i samme grad. Ydermere, arbejdes der på at indføre ANC i biler med formål at dæmpe lyden fra trafikken.

I det Europæiske projekt MONICA (2017-2019) [1], <https://www.monica-project.eu>, blev der forsket i potentialet i at bruge teknologi til at dæmpe lyden fra koncerter udenfor publikumsområdet, således at naboer bliver mindre forstyrret, uden at påvirke publikumsoplevelsen. Det blev f.eks. forsøgt i Tivoli. Danmarks Tekniske Universitet deltog i dette projekt og har derigennem opnået ekspertviden i denne teknologi og de bedste løsninger der findes i dag.

I de næste afsnit er termen "den udefrakommende lyd" - lyden der ønsket dæmpes – kaldt "støj" eller "støj" for bedre at passe til emnets kontekst.

## 2 Begrænsningerne ved aktiv støjreduktion

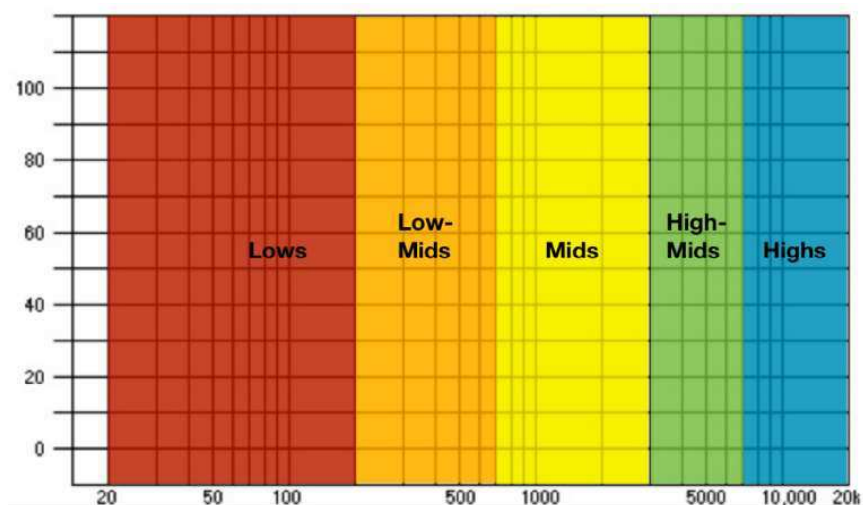
Støjen ændrer sig konstant og det giver udfordringer. Processen med at optage lyd, analysere den, beregne en modlyd og afspille den give en lille forsinkelse. Dermed kan man ikke dæmpe den lyd man optager, men skal dæmpe den der kommer kort efter. Så den optaget lyd skal helst være repræsentativ for lyden der følger efter. Det er årsagen til at ANC først blev introduceret til flystøj, som er næsten konstant (og overvejede lavfrekvent). Derudover skal optagelsen repræsentere det samlede lydfelt, som når ind i øret og ikke kun det lige ved mikrofonen. Det er relativt enkelt i hovedtelefoner, men meget sværere i åbne omgivelser, hvor mikrofonen/mikrofonerne kun måler i få punkter af et meget stort område. Ydermere, skal højttalere afspille modlyden direkte i retningen af støjen udbredelsesretning, hvilke er svært at opnå i praksis.

Beregningen af modlyden er også ganske kompleks og afhænger f.eks. af:

- 1) Hvor uniform støjen er i yderområdet som afgrænser koncertlyden.
- 2) Hvor hurtig støjen ændrer sig (f.eks. påvirket af vejrforhold).
- 3) Hvor mange refleksioner der kommer fra omgivelserne (f.eks. vægge, lofter, møbler, osv.)

I ideelle laboratorieforhold kan opnås ganske imponerende resultater, hvor det opfattede niveau af støjen bliver mere end halveret, men som forholdene bliver mere realistiske/komplekse, falder den realiserede lyddæmpning. Ydermere, kræver støjreduktion mange højttalere rundt om publikumsområdet og påvirkes af antallet af publikum. Udendørs, er der også store indflydelser af vejrændringer, som komplicerer opgaven betydeligt.

For at forstå beskrivelserne af MONICA projektet, kræves en forståelse af vores hørbare frekvensområde. Det er illustreret i Figur 2. Aktiv støjdemning til udendørsbrug påvirker kun lavfrekvensområdet. Det røde område ("Lows") som spænder fra 20 Hz til 200 Hz. Fra 20-60 Hz er den helt dybe bas, som vi primært opfatter med maven, som vibrationer. Disse frekvenser er også dem, som naturligt udbredes længst i vores atmosfære og som nemmest gennemtrænger bygninger. Dæmpningen i luft og gennem bygninger er her den passive dæmpning, som tidligere beskrevet. Selvom 20-200 Hz er en meget lille del af hele frekvensområdet fra 20-20.000 Hz (20 kHz), så udgøre frekvensområdet typisk en ganske betydelig del af energien i lyden.



Figur 2 Det hørbare frekvensområde. Figur fra [5].

### 3 Tre eksempler på praktisk afprøvelse fra MONICA projektet

Som opsummeret i konferenceartiklen, der blev publiceret som del af MONICA projektet [2], blev ANC til udendørsanvendelse i 2018 testet i tre scenarier med stigende kompleksitet. Disse er beskrevet i afsnit i dette kapitel, som starter med en ordliste med fagtermer.

#### Ordliste

*Subwoofer:* Højtaler særligt designet til afspilning af de dybeste toner og lyde. Dem i det røde felt i Figur 2.

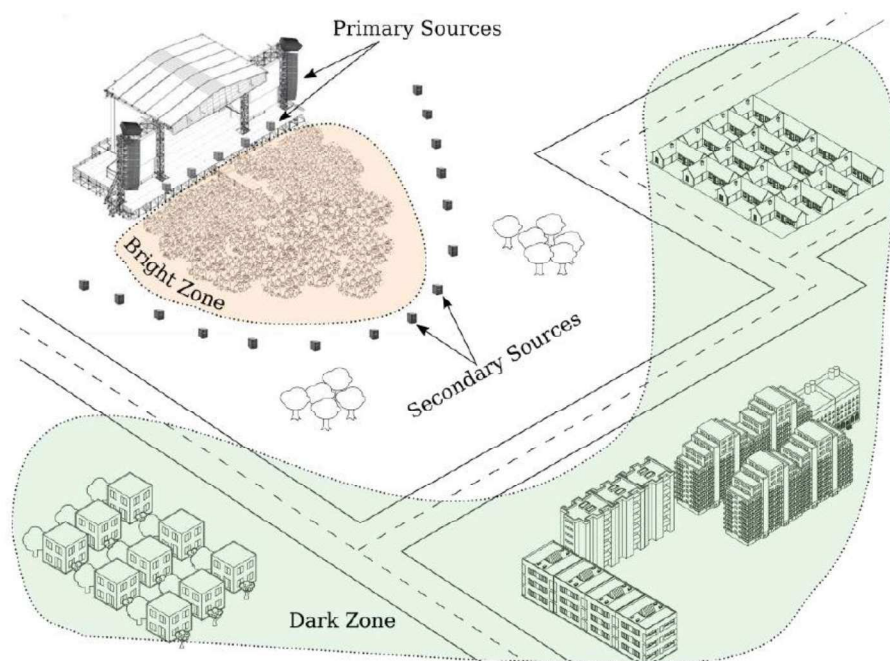
*Publikumsområde:* Hvor koncertlyden skal udbredes upåvirket. Kaldes "Bright zone" i MONICA projektet. Det lysfersken-farvede område på Figur 3.

*Naboområde:* Området, der omringer og afgrænser publikumsområdet, hvor koncertlyden skal dæmpes. Bemærk at denne zone ikke er lige op af publikumsområdet, da neutraliseringen ikke er effektiv helt tæt på subwoofer-højtalerne. Kaldes "Dark zone" i MONICA projektet. Det lysegrønne område på Figur 3.

*Primære kilder:* Højtalerne som er del af en normal sceneopstilling. Her indgår både subwoofere og højtalere, som spiller i mellemtone og diskantområdet (orange til blå frekvensområde i Figur 2). Kaldes "Primary sources" i MONICA projektet.

*Sekundære kilder:* Subwoofer-højtalerne, som dæmper lyden fra publikumsområdet. Kaldet "Secondary sources" i MONICA projektet.

*Line array:* Højtalere stablet oven på hinanden i en buet form, som resulterer i en lydudbredelse der kan styres delvist. Se et eksempel i Figur 8. Et line array er også afbilledet ved den ene "Primary Sources" pil i Figur 3 herunder.



Figur 3 Illustration af MONICA projektets adaptive lydfelt kontrol løsning [1]

### 3.1 Refshaleøen, København

I maj 2018 blev en realistisk udendørstest afprøvet i København på Refshaleøen med formålet at evaluere systemets funktionalitet i en opstilling med professionelt lydforstærkningsudstyr. Et fladt område på 80 m x 20 m med minimale forhindringer blev udvalgt. Opstillingen inkluderede 10 subwoofere som primære kilder (som simulerede to koncert scenehøjtalere) i en line array og 20 subwoofere som sekundære kilder i en dobbeltlags konfiguration (10 per række i to parallelle rækker), med et effektivt frekvensområde mellem 37-115 Hz. Under testen var der moderate variationer i temperatur og vind, som bidrog med indsigt om opstillingens virkningsgrad under realistiske forhold.

#### Læring

- + En estimeret maksimal dæmpning på 12-14 dB blev opnået i frekvensbåndet 45-85 Hz, i både enkelt- og dobbeltlagsopstillinger af de sekundære kilder, og indikerede dermed at der ikke er en fordel ved at benytte en dobbeltlagsopstilling.
- Denne testopstilling blev foretaget under meget simple forhold. Systemets lyd dæmpning blev kraftigt påvirket af ændringer i temperatur. Et temperaturfald på 6-8° C fra kalibreringen til selve testen, gav en reduktion i det opnåede resultat på 2-10 dB.



*Figur 4 - Refshaleøen test [2]. På billede ses fire af de primære subwoofere i forgrunden, samt en række af de sekundære subwoofere i baggrunden. I forgrunden er også fire almindelige højtalere i et line array stablet oven på den ene subwoofer. Deres formål er ikke beskrevet i [2].*

### 3.2 Kappa FuturFestival, Torino

Testområdet på festivalen arealer dækkede et stort område med ca. 300 meter fra scenen med de primære lydkilder til bageste ende af "naboområdet" (dark zone). De primære kilder bestod af en række med 20 subwoofere, mens de sekundære kilder bestod af en 40 meter lang række med 16 subwoofere vis lydenhederne blev rettet mod "naboområdet".

Målingerne viste at de sekundære subwoofere havde en ubetydelig påvirkning af publikumsområdet. I denne opstilling var det af praktiske årsager ikke muligt at placere de sekundære kilder, præcis som ønsket, sådan at deres position flugtede med det valgte "Naboområde". "Naboområdet" var ca. 40 meter bredt og 100 meter dybt og hævet i terrænet i forhold til de sekundære subwoofere. Området inkluderede en åben plads og en kirke (med måling af dæmpningen på taget).





Figur 5 - Kappa FuturFestival testen [2]. Den publikumsområdet i venstre side, de sekundære subwoofere i midten tæt på hegnet og naboområdet bag hegnet.

### Læring

+ En lyddæmpning på ca. 6 dB blev opnået i frekvensbåndet 31,5 – 40 Hz, mens dæmpningen i det bredere frekvensbånd 25-100 Hz var lige over 3 dB.

- Trods succesen med dæmpning i et stort område, blev der opnået en markant lavere dæmpning, som ikke en gang var tydeligt hørbar i "naboområdet". Delvis pga. det meget begrænsede frekvensbånd og delvis pga. det hævdede nabo område og baggrundsstøj fra andre festivalscener.

### 3.3 Tivoli, København

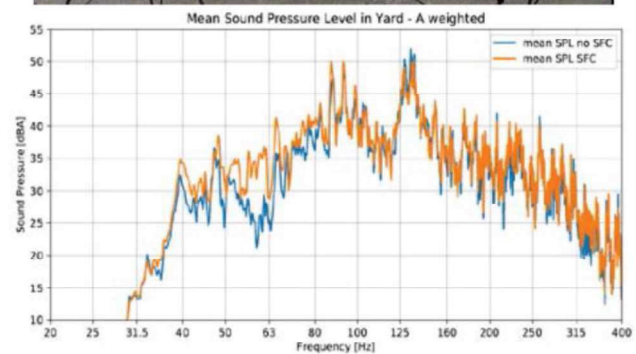
Den tredje test af opstillingen blev testet til en koncert i Tivoli i august 2018. Figur 6 på næste side viser rækken af sekundære subwoofere placeret på Glassalens tag i Tivoli. I denne komplekse opstilling, var det udvalgte nabo område placeret på en parkeringsplads på modsatte side af vejen fra Tivoli. Utallige bygninger reflekterede og spredte lyden af både primære og sekundære subwoofere inkl. en stor bygning placeret mellem de primære subwoofere og de sekundære subwoofere og besværliggjorde opgaven.

### Læring

+ Dette var den mest komplekse og realistisk testopstilling.

- Desværre var udfordringerne i Tivoli for mange og for store og resultaterne viste ubetydelig dæmpning, som knap kan ses af målinger (se nederste venstre billede i Figur 6).

Blandt udfordringerne var de store afstande, trafikken, praktiske udfordringen med kabler, synkroniseringsproblem i optageudstyret som påvirkede den meget kritiske timing i målingerne og begrænset data. Vejforhold og ændringer i publikum (antal, placering m.m.) påvirkede opstillingens tilpasningsevne i kombination udfordringer pga. en meget kompleks områdegeometri, som krævede flere- og mere avancerede beregninger og mikrofonplaceringer. Yderligere udfordringer med to uafhængige systemer til at styre de primære subwoofere og varierende trafikstøj resulteret i et komplekst testmiljø uden målbar dæmpning af støjen.



Figur 6 - Tivoli testen [2]. På venstre billede vises de sekundære subwoofere på taget og på øverste højre billede vises mikrofonerne i naboområdet, der måler den effektive lyddæmpning. Grafen viser forskellen mellem at have ANC slået fra (orange) og slået til (blå). Eneste område med en synlig dæmpning er mellem 50-63 Hz – et meget snævert område.

## 4 Økonomiske betragtninger

Eftersom et større antal ekstra subwoofere er nødvendige i forhold til en traditionel sceneopstilling er her beregnet et par eksempler på hvad et arrangement med et udendørs støjreduktionssystem kunne koste at leje i ekstraudgifter.

Priserne i eksemplerne herunder er baseret på konsultation med "Nordic Rental – Event Technology" ([hjemmeside](#)) om priser på højttalere og forstærkere. Priserne er for én dags leje af udstyr til professionelt brug.

Bemærk at eksemplerne ikke inkluderer udlejning af mikrofoner, lydmålere og selve ANC-systemet, som ud fra inputtet (det der afspilles i de primære højttalere) kan beregne modlyd til afspilning i de sekundære subwoofere. Mikrofoner og lydmålere opstilles i det ønskede nabo område og bidrager med input til justeringer til den beregnede modlyd i realtid. ANC-systemer til udendørsbrug findes så vidt vides ikke i kommerciel handel. Priserne til dette indgår ikke, da krav til udstyret ikke er specificeret præcist i kilderne.

Et "sæt" består her af en subwoofer (L-Acoustics KS28) og en forstærker (LA12X)

- Minimumsopstilling (4 sæt): 3.500 DKK ekskl. moms (per dag)
- MONICA Test 1 eller Test 2 (20 sæt): 17.500 DKK ekskl. moms (per dag)
- MONICA Test 3 (16 sæt): 14.000 DKK ekskl. moms (per dag)

Generelt koster en opstilling ca. 875 DKK per sæt per dag der er behov for. I eksemplerne fra MONICA er benyttet ca. et sæt per to meter, men kun til dæmpning direkte foran scene (én side) ønskes dæmpning til flere sider eller opstillet i en blød kurve, som viste i Figur 3, så kan det blive mange meter der skal dækkes.

Har man yderligere behov for en eller flere teknikere til at opstille og kalibrer opstillingen koster det yderligere 6000 DKK ekskl. moms per tekniker per dag.

## 5 Afsluttende kommentarer til MONICA projektrapporten

Aktiv støj dæmpning er en adaptiv tilgang til problemet med støjforurening ved udendørsarrangementer. Desværre er kompleksiteten og den krævende opsætning og kalibrering en begrænsende faktor, som gør opstillingen uegnet til begivenheder af kort varighed, såsom enkeltstående koncerter. Den optimale udnyttelse ser i stedet ud til at være gentagne begivenheder (hver måned, hver sommer) eller til permanente installationer.

MONICA projektets indsamlet erfaring med opstilling og demonstrationer førte til værdifuld forståelse af de nuværende udfordringer og begrænsninger, som kan være yderst vigtige for opstilling og brug af et sådanne system.

Den nuværende konklusion må være at udendørs ANC kan være effektive i åbne områder, men ikke vil føre til støj dæmpning i bymiljøer pga. det komplekse lydmiljø, som komplekse grundplan og refleksioner fra bygninger fører til. For at sikre en nøjagtig evaluering af systemets opsætning krævedes mindst 4 timers uafbrudt forhold med stabil og kontrolleret baggrundsstøj.

Derudover, viste det sig kritisk at etablere referenceværdier inden et arrangement. Disse referenceværdier bruges som hjælp til at forstå og tilpasse output (til de sekundære subwoofere) til variationer forårsaget af indflydelse fra eksterne støjkilder. Derudover kan ændringer i vejrforhold, især i vindforhold, kraftigt påvirke lydudbredelse langt fra scenen. Det er derfor vigtigt at forstå disse og inkorporere dem i systemets beregninger for at optimere støj dæmpningen og kan være udslagsgiven i forhold til at opnå overholdelse af lokale tilladelser af maksimum gennemsnitlige lyd niveauer.

## 6 Forstå hvornår udendørs ANC fungerer bedst og værst

Tabellen i dette afsnit giver en oversigt af de forhold hvor ANC må formodes at fungere bedst og værst. Denne bygger delvis på erfaringerne fra MONICA (hvide celler), samt vores (FORCE Technology) forståelse af de faktorer, der ydermere kan påvirke effektiviteten (grå celler).

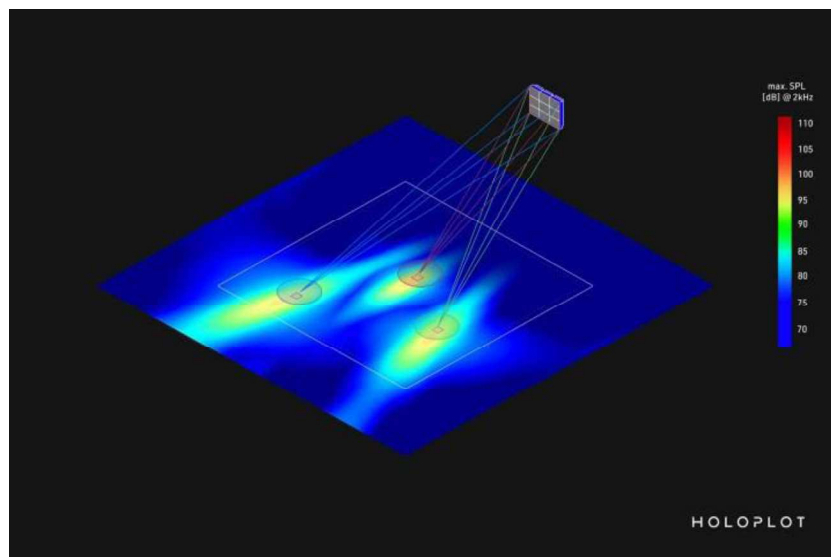
Bedste forhold	Værste forhold
Udendørs, ingen hindringer (beplantning og små træer har ingen indflydelse)	Bygninger og andre hindringer i området
Hævet naboområde eller fladt terræn	Ujævnt terræn
Ingen baggrundsstøj	Uforudsigelig eller varierende baggrundsstøj
Ingen vind	Vind fra skiftende retninger og varierende hastighed
Stabil udendørstemperatur	Variierende udendørstemperatur
Stille omgivelser	Støjende omgivelser (trafik, jernbane, m.v.)

Bedste forhold	Værste forhold
God tid til grundig kalibrering og måling af reference værdier	Hurtig kalibrering
Et samlet system til håndtering af både primære- og sekundære højttalere	Flere separate systemer der skal snakke samme.
Samme baggrundsstøj og vejrforhold under kalibreringen og arrangementet	Forskellige baggrundsstøj og vejrforhold under kalibreringen og arrangementet
Mange målemikrofoner til justering i realtid	Få målemikrofoner til justering i realtid
Ensartet og blødt underlag (græs, jord)	Varierende og hårdt (reflekterende) underlag
Konstant publikumsplacering og -mængde	"Nomade" publikum, som på festivaler, der går fra det ene til det andet.
Elektronisk musik kun spillet over højttalere	Betydelige bidrag til lydniveauet fra både f.eks. højttalere og instrumenter

*Tabel 1 Bedste og værste forhold til udendørs ANC.*

## 7 Et eksisterende alternativ

Kompleksiteten af udendørs ANC, som beskrevet i dette notat, gør det relevant at overveje alternativer. Et sådan er værd at nævne her: Beamforming. Alle højttalere har en retningskarakteristik (lydudbredelses mønster). De sender mere lyd lige frem end ud til siderne. Beamforming er en teknik, som gør det muligt at forme og styre retningskarakteristikken, som illustreret i Figur 7. Lyden kan dermed styres hen, hvor publikum sidder. Det er meget brugt til arrangementer, så som koncerter og teaterforestillinger. Princippet bag, er det samme som ved ANC, men modlyden er her begrænset til at være identisk med (koncert)lyden, bare tidsforskudt en lille smule. Da neutraliseringen/dæmpning sker ved de primære lydilder, påvirkes de ikke af kontekst (vejr, hindringer, osv.) i nær samme grad som ANC og kræver færre højttalere samlet set.

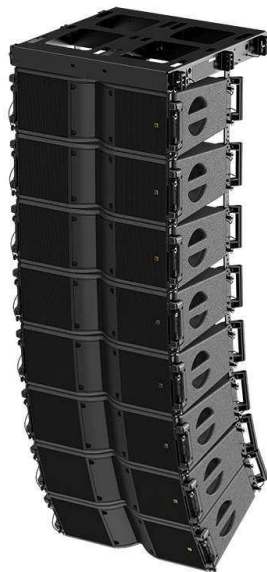


*Figur 7 Speaker Beamforming [6]. Lyden styres hen i tre udvalgte zoner.*

I Figur 8 ses en højttaleropstilling – et *line array* – af stablede højttalere, som ved hjælp af forskelle i vinkel og tidsforskydelser af signalet kan styre retningskarakteristikken.



Vi er i FORCE Technology ikke eksperter i line array beamforming og deres effektivitet, fordele- og ulemper, men ser det som et alternativ, der kunne være værd at undersøge nærmere. Selvom det allerede bruges til større arrangementer, kunne der være et potentiale ved mindre sceneopstillinger og derudover er beamforming – os bekendt – ikke udbredt til styring af lyd fra subwoofere, men velkendt og f.eks. brugt på Roskilde festivalen, hvor en opstilling med 4 subwoofere opstillet i et T, kan forme retningskarakteristikken og dæmpe lydudbredelsen i siderne og bag publikumsområdet.



*Figur 8 Eksempel på højtalerkonfiguration til beamforming. Her L-Acoustic KARA II. Typisk mange meter høje. Fire lignende systemer blev f.eks. brugt til tronskifteceremonien udenfor Christiansborg d. 14. januar.*

## 8 Konklusion

På nuværende tidspunkt, kan vi (FORCE Technology) ikke anbefale aktiv støjdemning (ANC), som en hurtig og nem løsning, da udfordringerne med at opnå en fordelagtig effektivt stadig er for store.

Selv under optimale forhold kan man med den nuværende løsning, ikke kalde ANC systemet for et praktisk gennembrud til at løse udfordringerne med støjforurening fra koncerter og andre udendørs arrangementer.

Testen af systemet under komplekse forhold i Tivoli viste en dæmpningseffektivitet, som var meget lille. På baggrund af den manglende forskning og erfaring under disse komplekse by-forhold, kan man ikke konkludere om det kan komme til at fungere indenfor en overskuelig fremtid.

Den bedste nuværende teknologi ser lovende ud i forhold til på sigt at kunne lede til bedre effektivitet og nemmere anvendelse. I nogle scenarier, f.eks. til flerdagsbrug eller permanente opstillinger under gode forhold kan måske opnås en moderat fordel allerede nu. En 3 dB dæmpning blev i MONICA beskrevet som ikke-hørbart og vi vurderer at minimum 6 dB kan være påkrævet for at opnå et fald i støjgene.

## 9 Referencer

[1] "D9.3-Replication-Reference-Book-and-Roadmaps-for-MONICA-Market-Replication", Version 1.0, 2020-03-31, side 80-92.

[2] Brunskog J. et al., "Full-scale outdoor concert adaptive sound field control", 2019, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Acoustics, Aachen, Tyskland.

[https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/194650956/ICA\\_2019\\_JBR\\_paper\\_final.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/194650956/ICA_2019_JBR_paper_final.pdf)

[3] Heuchel F. et al, "Sound field control for reduction of noise from outdoor concerts", 2018, 145<sup>th</sup> AES Convention, New York, USA.

[4] Haddad K. et al, "Application of Internet of Things technology for sound monitoring during large scale outdoor events", 2019, InterNoise19, Madrid, Spanien.

[5] Figur fra <https://hotcore.info/babki/sound-frequency-range.htm>

[6] Figur fra <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/holoplot-beamforming-audio/>