Intelligent kommunikation til atleter med kropsmonterede højtalere

AALBORG UNIVERSITET

STUDENTERRAPPORT

SPA10
Gruppe 1077
Signal Processing and Acoustic
Aalborg Universitet
02-06-2022

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Signal Processing and Acoustics

Frederik Bajers vej 7B
9220 Aalborg Øst
http://www.es.aau.dk

Titel:

Intelligent kommunikation til atleter med kropsmonterede højtalere

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

Februar 2022 - Juni 2022

Projektgruppe:

SPA 1077

Deltagere:

Jesper Mønster Asschenfeldt

Vejledere:

Dorte Hammershøi

Sidetal: 61
Sidetal med appendiks: 110
Afsluttet: 02/06-2022

Synopsis:

Denne rapport omhandler personlig lyd til sportsfolk, primært fodboldspillere, i træningssituationer og baseres på problemformuleringen: *Kan der, på bagrund af overføringsfunktioner for forskellige højtalerpositioner, laves et kommunikationssystem til brug i træningssituationer, der giver forståelig og personlig lyd?* Først undersøges den nuværende lovgivning på området om brug af teknologi i kampsituationer og hvilke lignende produkter, der er på markedet, samt deres andre anvendelsesmuligheder. Bagefter undersøges det hvor på en spiller højtalere eventuelt kan placeres, for bagefter at fremstille en generel model af et system, samt at lave målinger til overføringsfunktioner for potentielle højtalerpositioner. På baggrund af disse overføringsfunktioner, undersøges der forskellige konfigurationer, baseret på den gennemsnitlige MSE i forhold til en diffusfeltsrepons, taget over 1/3 oktavbånd. De forskellige konfigurationer undersøges for, hvordan forskellige hovedorienteringer påvirker frekvensresponset og grundlæggende principper om og tanker til eventuel beamforming-implementation af et endeligt system redegøres. Der findes 10 potentielle konfigurationer, men der vælges ikke at fremhæve en over de andre, grundet manglende validering af resultaterne.

Forord

Denne rapport er skrevet af gruppe 1077 fra kandidatuddannelsen "Signal Processing and Acoustics", 10. semester (SPA10) på Aalborg Universitet i foråret 2022.

Læsevejledning

Denne rapport bruger Vancouver-metoden til kildehenvisning. Dette betyder, at kilderne i litteraturlisten er nummereret efter rækkefølgen de bliver benævnt i rapporten. For eksempel vil den første kildehenvisning blive angivet som [1], og kan, hvis rapporten læses elektronisk, videreføre til litteraturlisten, hvis der klikkes på kildehenvisningen.

Rapporten er inddelt i kapitler, afsnit og underafsnit, angivet som kapitel X.X.X. For eksempel vil kapitel 1, afsnit 4, underafsnit 2 blive angivet som kapitel 1.4.2. Figurere og tabeller er nummereret efter hvilken rækkefølge de forekommer i kapitlet. For eksempel vil den fjerde figur i kapitel 1 blive angivet som figur 1.4. Ligesom for kildehenvisningerne, videreføres der til kapitlet, hvis der klikkes på henvisningerne.

Der er benyttet ISO 80000, *System International* til angivelse af enheder igennem rapporten.

Særlig tak

Der ønskes en særlig tak til Claus Vestergaard Skipper, laboratorieansvarlige på Signal Processing and Acoustics, til hjælp med udstyr og fejlsøgning (samt at åbne en enkelt dør). Endvidere ønskes der også at takke Jakob Hjort, medstifter og kontaktperson hos Vokalo, for god korrespondance og interesse under projektforløbet.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledende analyse **1**
1.1 Lovgivning . . . 2
1.1.1 Sikkerhed . . . 2
1.2 Eksisterende teknologier . . . 3
1.3 Montering og placering af højtalere . . . 3
1.3.1 På WT . . . 3
1.3.2 På vesten . . . 4
1.4 Overføringsfunktioner og målinger . . . 5
1.4.1 Måleforsøg 1: Referencens position . . . 6
1.4.2 Måleforsøg 2: Hovedets orientering . . . 9
1.4.3 Måleforsøg 3: Mikrofonens position . . . 10
1.4.4 Efterbehandlinger af målinger. . . . 13
1.5 Delkonklussion og endelig problemformulering . . . 14

Kapitel 2 Systemdesign **15**
2.1 Case 1: Vest . . . 15
2.1.1 Valg af højtalerkonfigurationer baseret på similaritet til target-curve 16
2.1.2 Valg af højtalerkonfigurationer baseret på forsøg . . . 24
2.2 Case 2: WT . . . 33
2.2.1 7×2 konfiguration . . . 34
2.2.2 5×3 konfiguration . . . 38
2.3 Undersøgelse af orienteringsændring . . . 41
2.4 Beamforming . . . 55
2.5 Delkonklussion . . . 57

Kapitel 3 Afsluttende analyse **59**
3.1 Resultater . . . 59
3.2 Diskussion . . . 60
3.3 Konklusion . . . 61

Appendiks A Appendiks **63**
A.1 Målerapport: Referencens position . . . 63
A.2 Målerapport: Hovedets orientering . . . 67
A.3 Målerapport: Mikrofonens position . . . 74

Litteratur **111**

Indledende analyse 1

Teknologi rykker ind i flere og flere områder. Inden for de sidste 5-10 år har bærbar teknologi (WT, wearable technology) gjort sit indtog inden for sport, og især fodbold [1, 2]. Disse enheder måler alt fra position, acceleration, hjerterytme og g-påvirkninger, til at give optimale muligheder for at skræddersy træning og kampsituationer for de individuelle spillere, samt danne præstationsstatistik til brug i kampforberedelser/analyse [3].

Ét sted, teknologien ikke er kommet til, er kommunikation mellem træner og spiller. Vokalo er et dansk start-up firma, der er i gang med at udvikle et system til brug i træningssituationer. På nuværende tidspunkt består systemet af en tablet til træneren, hvorfra han/hun kan vælge hvem der skal kommunikeres med på et givent tidspunkt (én spiller, en gruppe, hele holdet), og en mobiltelefon til spilleren, placeret i en sportsvest.

På nuværende tidspunkt er der kun envejskommunikation fra træneren til spillerne, men ønsket fra Vokalos side er tovejskommunikation, så spilleren/-ne kan kommunikere tilbage eller til hinanden. Endvidere ønsker Vokalo også at undersøge alternative positioner til højtaler/mikrofon, eventuelt på sportsvesten, for at forebedre forståligheden af talen, samt muligheden for "personlig lyd" til de individuelle spillere, så en eventuel modstander ved siden af ikke kan høre eventuelle taktiske ændringer.

Baseret på dette opstilles en initierende problemanalyse:

Kan der laves et kommunikationssystem til spillere, der giver forståelig og personlig lyd?

Afgrænsning

I dette projekt tages der kun udgangspunkt i kommunikation fra træner til spiller. Dette vil sige, at der kun fokuseres på højtalersystemet og der ikke fokuseres på mikrofonkonfiguration. Dette er gjort på et tidligt stadium af projektforløbet for at begrænse omfanget af projektet.

Endvidere fokuseres der ikke på løsninger placeret på/omkring øret, som in-ear hovedtelefoner, høreapparat-lignende eller benledende løsninger. Dette er gjort for at give så lidt gene til spillerne, både i forhold til generel orientering i træningssituationen og for at undgå situationer, hvor hovedtelefonen ryger ud/af under træning.

1.1 Lovgivning

Lovgivningen inden for fodboldverdenen er primært placeret hos International Football Association Board (IFAB), en uafhængig organisation, der har hovedsæde i Zürich, Schweiz, og hvis medlemmer er henholdsvist det engelske, skotske, walisiske og nordirske fodboldforbund, samt Fédération Internationale de Football Association (FIFA) [4]. Lovgivningen med henhold til elektronisk måleudstyr (EPTS, electronic performance and tracking systems) er underlagt *Laws of the Games* § 4, *The Players' Equipment*, punkt 4, *Other equipment*.

Under underpunktet *Electronic performance and tracking systems (EPTS)* står der:

"I de tilfælde, hvor bærbar teknologi anvendes som en del af elektronisk måleudstyr (EPTS), og det sker i officielle turneringskampe under FIFA, en konføderation eller et nationalforbund, skal turneringsmyndigheden sikre sig, at den teknologi, som er fæstnet til spillernes udstyr, ikke er farlig og opfylder kravene i 'FIFA Quality Programme' for EPTS.

Hvor der anvendes EPTS stillet til rådighed af turneringsmyndigheden eller kampens arrangør, er det den pågældendes ansvar at sikre sig, at de data og informationer, der transmitteres fra EPTS til det tekniske område under kampen, er pålidelige og nøjagtige.

'The FIFA Quality Programme' for EPTS støtter turneringsmyndighederne." [5, 6].

Endvidere står der i underpunktet *Electronic communication*:

"Spillere (herunder reserver, udskiftede og udviste spillere) må ikke bære eller bruge nogen form for elektronisk udstyr eller udstyr til brug for kommunikation (med undtagelse af EPTS, hvor dette er tilladt)." [5, 6].

I Danmark er Dansk Boldspil Union (DBU) ansvarlig for, at de gældende regler bliver overholdt [7, § 3.3].

1.1.1 Sikkerhed

I henhold til at få EPTS godkendt til brug i kampsituationer skal det gennemgå to forskellige tests: "Wearable Safety Test", og "Performance Standard Test" [8]. "Wearable Safety Test" tester om hvorvidt et EPTS lever op til minimumsikkerhedskravene omfattet af International Match Standard (IMS), der er udviklet af FIFA og IFAB. Testen omfatter kun EPTS, der er monteret øverst på ryggen og fokuserer ikke på hardware. Testen er specifieret i *Handbook of test methods for wearable EPTS devices* [9]. Overholder EPTS sikkerhedskravene kan det blive IMS certificeret.

"Performance Standard Test" tester systemet mod to kendte systemer; Vicon, et motion capture system og et "Vision Kit", udviklet af Victoria University [8]. Testen er specifieret i *Handbook of test methods for EPTS devices* [10]. Opfylder EPTS testkriterierne kan det blive FIFA Quality certificeret.

For hverken "Wearable Safety Test" eller "Performance Standard Test" er der specificeret maksimum eller minimum dimensioner for et EPTS. Det er heller ikke specificeret at komponenter tilhørende EPTS må monteres andre steder end øverst på ryggen.

I henhold til brug af teknologi under træningsbrug er der ikke specifikke love fra hverken FIFA, IFAB eller DBU, og det må derfor antages at eventuel brug af ikke FIFA/IFAB godkendte systemer aftales mellem klubben og udvikleren af teknologien, så længe systemet overholder den til hver tid generelle lovgivning om arbejdssikkerhed.

1.2 Eksisterende teknologier

På nuværende tidspunkt er der ingen teknologier til kommunikation mellem træner og spiller i kampsituationer, grundet den gældende lovgivning (se sektion 1.1). Af virksomheder, der har lignende kommunikationsystemer under udvikling til træningssituationer, er firmaet Armony Ltd. [11]. Deres system minder om det Vokalo udvikler (WT monteret i en sportsvest), men er kun et envejskommunikationsystem fra træner til spiller, og består af en "walkie talkie" og en højtalerenhed [11].

Af WT, godkendt af FIFA er der i skrivende stund 32 forskellige produkter, fra 13 producenter. Af disse 32 produkter er 26 "FIFA Basic" certificeret og 6 "FIFA Quality" certificeret [12]. Af teknologier inkluderet i de forskellige systemer er blandt andet: IMU (Inertimåleenheder, omfattende accelerometer, gyroskop og magnetometer), elektrokardiogram (EKG), barometer, GNSS (globalt navigation satellit system, omfattende GPS, GLONASS (russisk satelitnavigationssystem), Galileo (fælleseuropæisk satelitnavigationssystem) og BeiDou (kinesisk satelitnavigationssystem)), 4G kommunikation, Bluetooth 5 og 200+ målepunkter (ikke yderligere specificeret) [13–16]. Størrelsen på de forskellige WT ligger mellem 65-81 mm i længde, 35-49 mm i bredde og 15-21 mm i højde, med en vægt på 35-72 g [13–16]. Endvidere kan de fleste WT, hvis ikke alle, oplades med USB.

1.3 Montering og placering af højtalere

I henhold til systemet er der to potentielle placeringsmuligheder af højtalerne: På WT-enheden eller på vesten.

1.3.1 På WT

I henhold til montering af højtalere på WT, er der begrænset til størrelsen på enheden. Da Vokalos ambitioner er at lave et system med EPTS funktionalitet, tages der udgangspunkt i målene af de FIFA-godkendte WT, der giver et maksimum areal på 81 $\times$ 49 mm til montering af højtalerenheder. Dette vil give en maksimal enhedsstørrelse for en standard cirkulær højtaler på 40 mm i diameter, med to monteret ved siden af hinanden. Det vil også være muligt, hvis der bruges rektangulære højtalerenheder, enten at køre med et 4 $\times$ 1 eller 2 $\times$ 2 array konfiguration (med udgangspunkt i en 40 $\times$ 20 mm enhed). Disse enheder vil med stor sandsynlighed have en anderledes udbredelseskarakteristik i forhold til de cirkulære højtalere, hvilket der skal tages forbehold for.

1.3.2 På vesten

Vesten i sig selv kan ses som en ærmeløs tætsiddende undertrøje, der stopper ved mellemgulvet. Dette vil sige, at mulige placeringer af højtalere vil være på brystet, det øverste af ryggen eller over skulderen/kravebenet på stropperne. Et eksempel på en sportsvest kan ses på figur 1.1, hvor de eksisterende WT-placeringer også kan ses.

(a) Front. (b) Bagside.

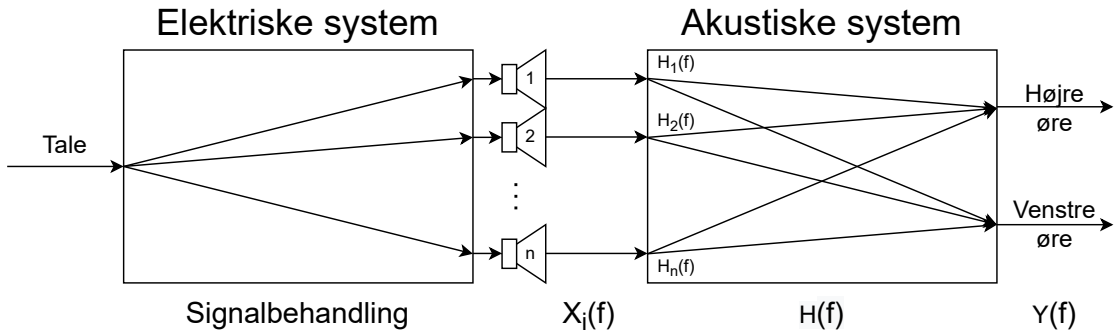
Figur 1.1: Eksempel på en typisk sportsvest på en head and torso simulator. Vest udlånt af Vokalo.

I henhold til placeringmuligheder af højtalere, tages der udgangspunkt i et bånd rundt omkring kraven som værende de optimale positioner, grundet proksimiteten til ørene. For størstedelen af fronten og bagsiden er størrelsen af enheden ikke en hæmmende faktor, i forhold til over skulderne, hvor stroppens bredde er begrænsende. På sportsvesten, udlånt af Vokalo, er skulderstroppens bredde 45 mm på det smalleste sted, målt fra inderside af forstærkning til inderside af forstærkning. Derved vil de største højtalere over skulderne kunne have en diameter på omkring 40 mm. Dette vil dog potentielt give andre problemer i henhold til komfort for spilleren, da højtaleren risikerer at være for bred i forhold til spillerens trapezius (muskel, der forbinder kranium/rygrad med skulder), og kan komme til at "vippe" over musklen, rykke vesten fremover eller bagved musklen, så vesten sidder forkert/ubehageligt, eller ødelægge/knække højtaleren ved en kollision. I den sammenhæng vil det kunne give mening at bruge rektangulære højtalere, for eksempel to 40 $\times$ 20 mm højtalere monteret ved siden af hinanden.

I forhold til montering af højtalere andre steder på vesten er den største begrænsende faktor komfort. Der vælges at begrænse til højtalerenheder med en maksimum diameter på 40 mm. Dette gøres, selvom der er mulighed for større enheder, for potentielt at bruge den samme enhed på samtlige positioner.

1.4 Overføringsfunktioner og målinger

For at kunne lave et system til personlig lyd, er det nødvendigt at undersøge hvad der kræves for at kunne approksimere den transmitterede lyd. Til dette opstilles en generel model for et eventuelt system, der kan ses på figur 1.2.



Figur 1.2: Generel systemmodel.

Som det kan ses på figur 1.2, er det nødvendigt at kende forholdet, eller overføringsfunktionerne, mellem ørene og de individuelle højtalerpositioner. For at opnå overføringsfunktionerne for de individuelle højtalerpositioner, udføres der forskellige måleforsøg. Alle målingerne udføres med samme generelle opstilling: En head and torso simulator (HATS) med mikrofon indbygget i øret, som vesten trækkes nedover. I stedet for en højtaler på vesten bruges en miniature-mikrofon, der monteres på de forskellige målepositioner på vesten. En højtaler bruges som en reference, monteret i samme højde som øret, i en afstand af 1 m fra centrum af HATS'ens hoved. Der vælges at bruge en Brüel & Kjær 4128 HATS, frem for en GRAS KEMAR, der også er tilgængelig, fordi selvom KEMAR'en potentielt set er mere "anatomisk korrekt" er torsoen markant mindre end på B&K 4128, der antages at være mere retvisende for den gennemsnitlige spiller.

Det ønskede resultat fra disse målinger er overføringsfunktionerne mellem vesten og øret. I denne sammenhæng udføres der tre forsøg:

- Referencens position
- Hovedets orientering
- Mikrofonens position

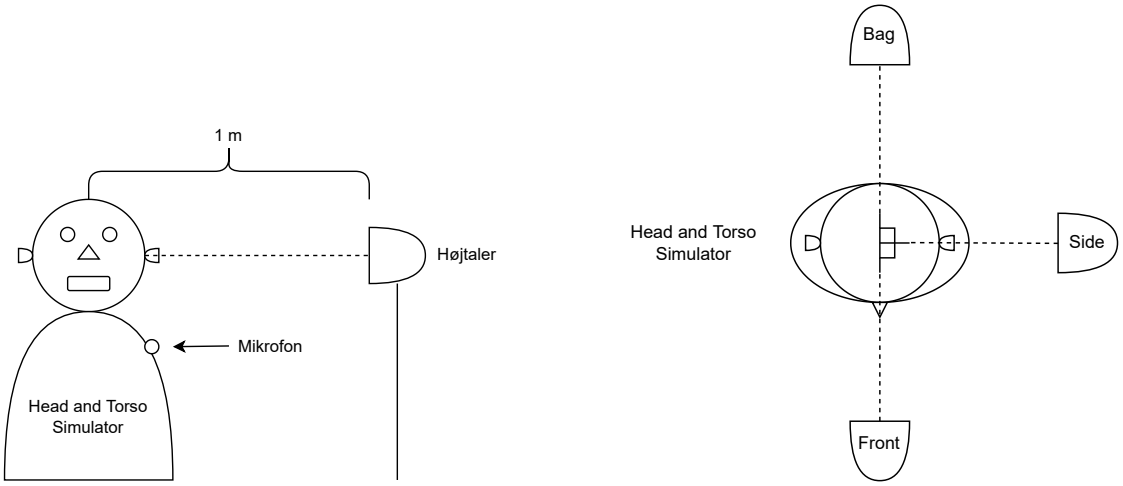
Til alle tre forsøg er der følgende antagelser: Der antages højre/venstre symmetri i alle målinger. Derfor måles der kun på den ene side af dukken. Endvidere antages det også, at både vesten og mikrofonen er "akustisk usynlige", altså at de ikke har nogen indvirkning på målingerne, så målinger af hovedorientering og mikrofonposition kan måles uafhængig af hinanden, og mikrofonen kan flyttes frit rundt på vesten.

1.4.1 Måleforsøg 1: Referencens position

Målerapporten kan ses i appendiks A.1.

Det første forsøg udføres for at undersøge om hvor vidt vinklen, den indfaldne reference kommer fra, har en indflydelse på den resulterende overføringsfunktion. I denne sammenhæng måles der fra tre forskellige positioner: forfra (0° azimut), fra siden (90° azimut) og bagfra (180° azimut). Baseret på disse målinger afgøres det om det er nødvendigt med mere end ét referencepunkt til de efterfølgende målinger.

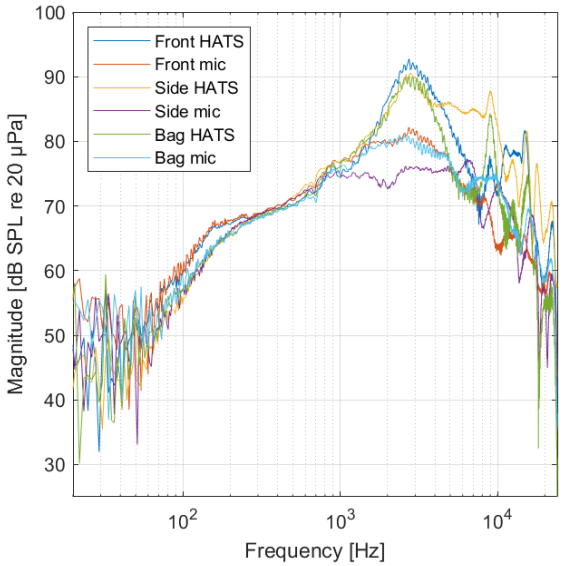
Måleopstillingen opstilles som illustreret på figur 1.3a. Højtalerplaceringer kan ses på figur 1.3b.



(a) Måleopstilling. (b) Højtalerpositioner.

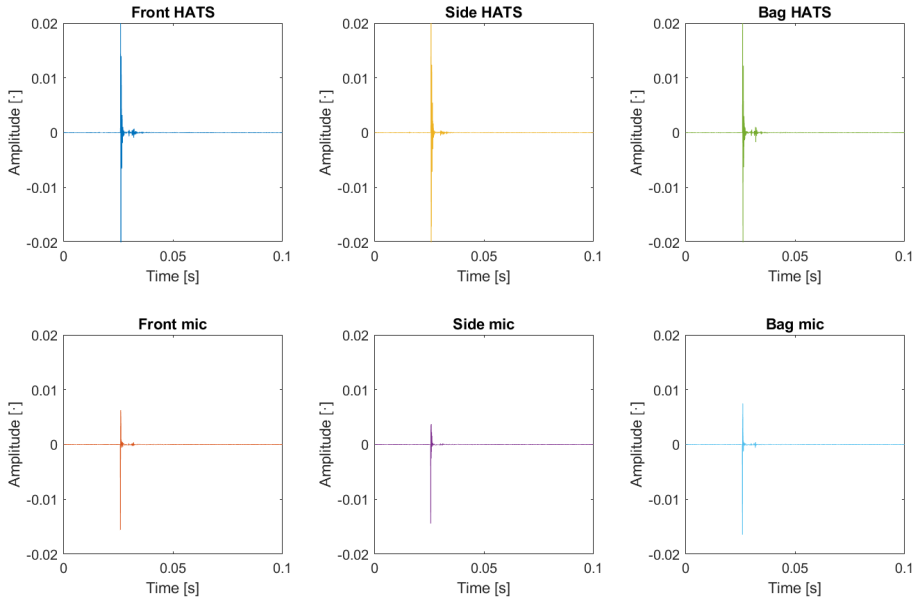
Figur 1.3: Illustrationer af måleopstilling.

Frekvensresponsene, midlet over fem individuelle målinger for de forskellige positionskombinationer, kan ses på figur 1.4.



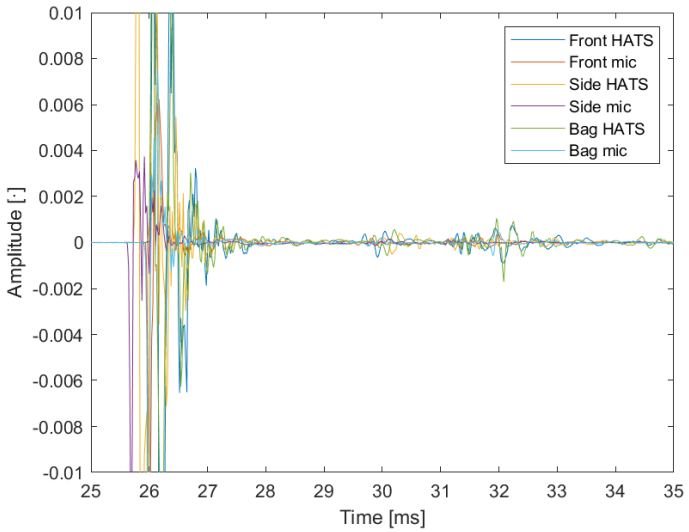
Figur 1.4: Midlede frekvensrespons fra de tre højtalerpositioner for både mikrofon og HATS.

Som det kan ses på figur 1.4, er der ved de højere frekvenser (over 1 kHz) for nogle af frekvensresponsene, specielt for "Bag HATS", markante fejlbidrag. Der fokuseres derfor på de midlede impulsrespons for de forskellige målinger.



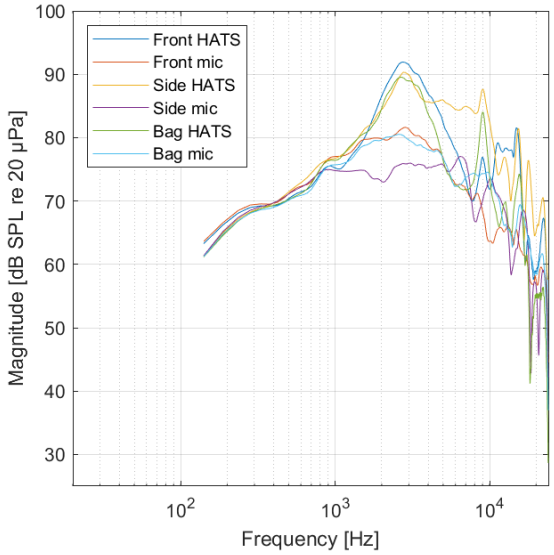
Figur 1.5: De individuelle midlede impulsrespons for de forskellige kombinationer.

På figur 1.5, kan der ses, især for HATS responsene, et bidrag fra første refleksion, efter det initierende impuls. Tidsmæssigt virker det til, at impulserne kommer for sent i forhold til den "virkelige verden" ($\approx$ 25 ms, tilsvarende $\approx$ 10 m). Zoomes der ind på området omkring det initierende impuls og de første refleksioner, som kan ses på figur 1.6, kan det ses at impulserne forekommer nærmest samtidigt, med en variation, der kan forklares med forskellen i den difrakterde afstand, lyden bevæger sig. Der antages derfor, at den "unaturlige" forsinkelse kommer fra optagelsessystemet og er tilnærmelsesvis konstant fra måling til måling. Den første refleksion forekommer efter $\approx$ 29,5 ms.



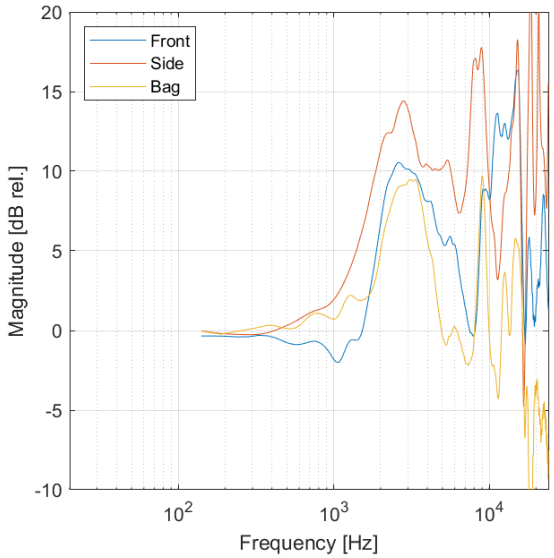
Figur 1.6: De midlede impulsrespons for de forskellige målinger, zoomet ind omkring initierende impuls og de første refleksioner.

Da refleksionerne ikke er relevante for det endelige produkt, tages der kun udgangspunkt i data op til 29,5 ms (1024 punkter). Udregnes frekvensresponsene for den reducerede data fås responsene, der kan ses på figur 1.7.



Figur 1.7: Midlede frekvensrespons fra de tre højtalerpositioner for både mikrofon og HATS, udregnet fra de reducerede impulser (1024 punkter).

Overføingsfunktionerne fra mikrofonen på vesten og HATS'en udregnes herefter ved kompleks division af FFT'erne af de reducerede impulsrespons (HATS divideret med vest). Overføringsfunktionerne kan ses på figur 1.8.



Figur 1.8: Overføringsfunktionerne fra vestens mikrofon til HATS'en for de tre højtalerpositioner.

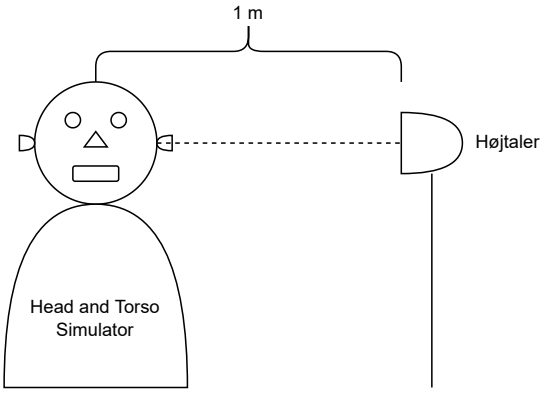
Som det kan ses på figur 1.8, er der op til $\approx$ 500 Hz similariteter i de tre overføringsfunktioner, hvorefter de begynder at afvige fra hinanden. Der kan derfor ikke antages, at det er tilstrækkeligt med kun én højtalerposition til målingerne og det derfor bliver nødvendigt at lave de efterfølgende målinger med flere højtalerpositioner. Der vælges at benytte de samme tre positioner til de efterfølgende målinger.

1.4.2 Måleforsøg 2: Hovedets orientering

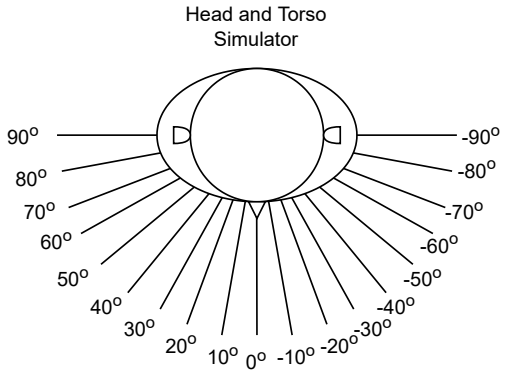
Målerapporten kan ses i appendiks A.2.

I det andet forsøg måles de forskellige respons fra forskellige orienteringer af HATS'ens hoved. Der måles i 10° opløsning fra -90° til 90° (negativ mod uret, positiv med uret), for samlet 19 forskellige orienteringer. Negative hovedorienteringer bliver noteret med et "M" foran vinklen, for eksempel -30° vil blive noteret som "M30".

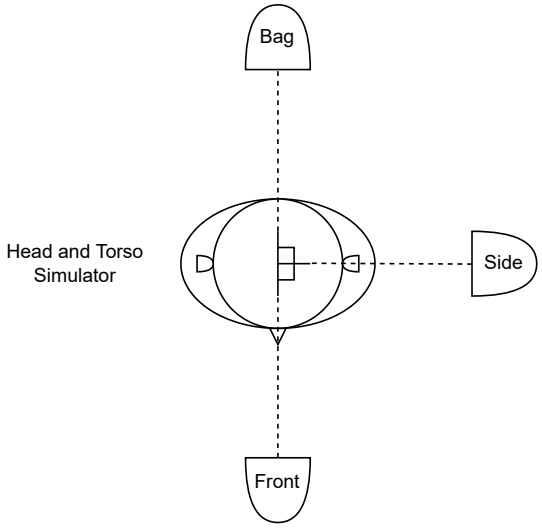
Måleopstillingen opstilles som illustreret på figur 1.9a, hovedorienteringer kan ses på figur 1.9b og højtalerplaceringer kan ses på figur 1.9c.



(a) Måleopstilling.



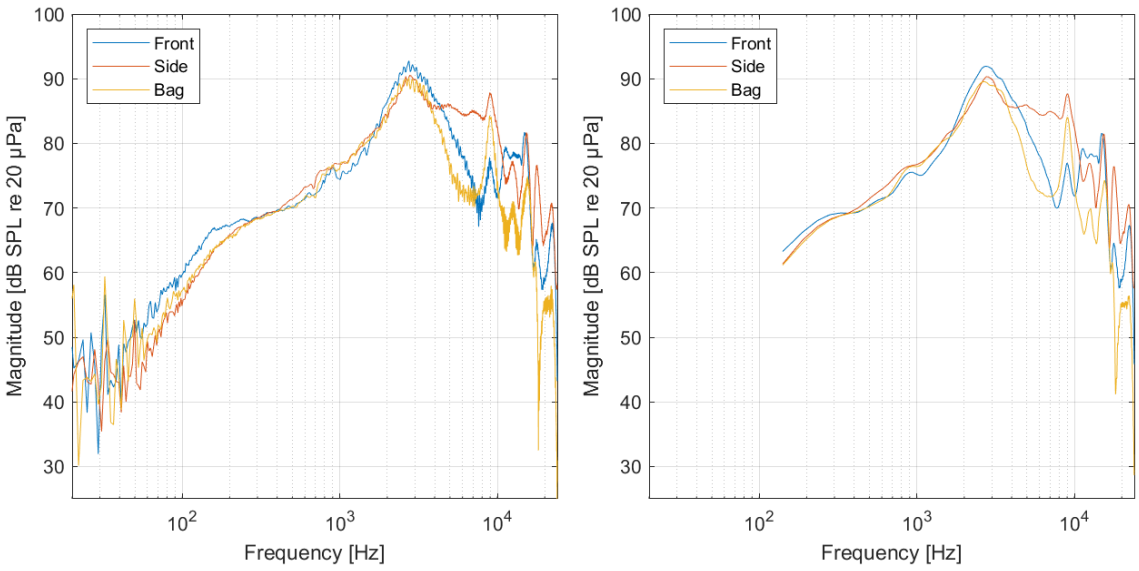
(b) Hovedorienteringer.



(c) Højtalerpositioner.

Figur 1.9: Illustrationer af måleopstilling.

Ligesom for målingerne i kapitel 1.4.1, er der uønskede bidrag fra de efterfølgende refleksioner, som fjernes ved at reducere responset til kun det initierende impuls og udføre en FFT på det resulterende data. Et eksempel på dette kan ses på figur 1.10 (hovedorientering 0°).



(a) Ikke reduceret.

(b) Reduceret.

Figur 1.10: Sammenligning af frekvensrespons, baseret på impulsresponslængde. Hovedorientering 0°.

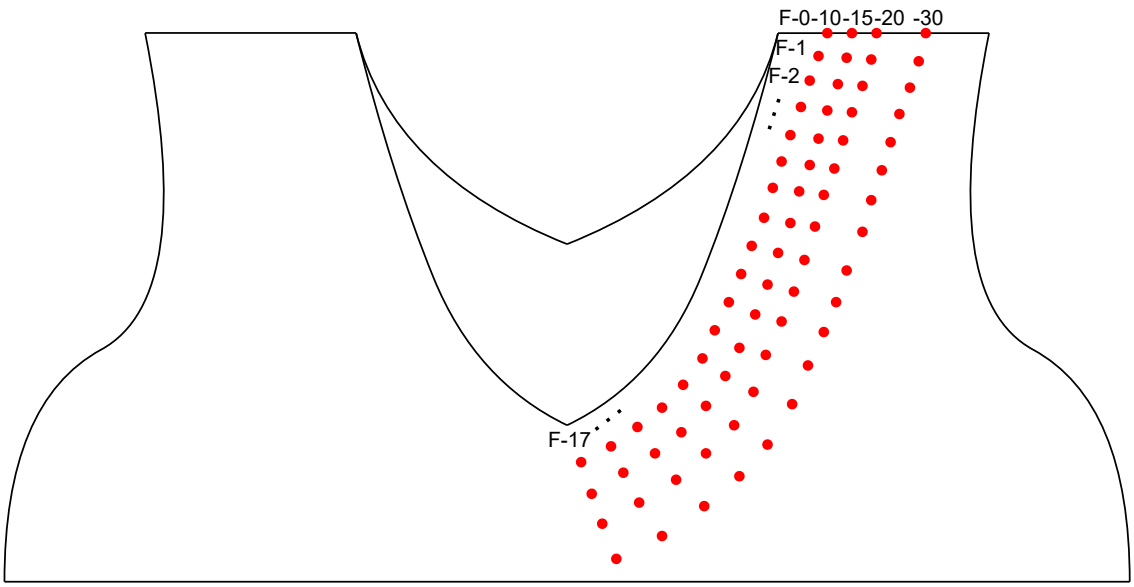
1.4.3 Måleforsøg 3: Mikrofonens position

Målerapporten kan ses i appendiks A.3.

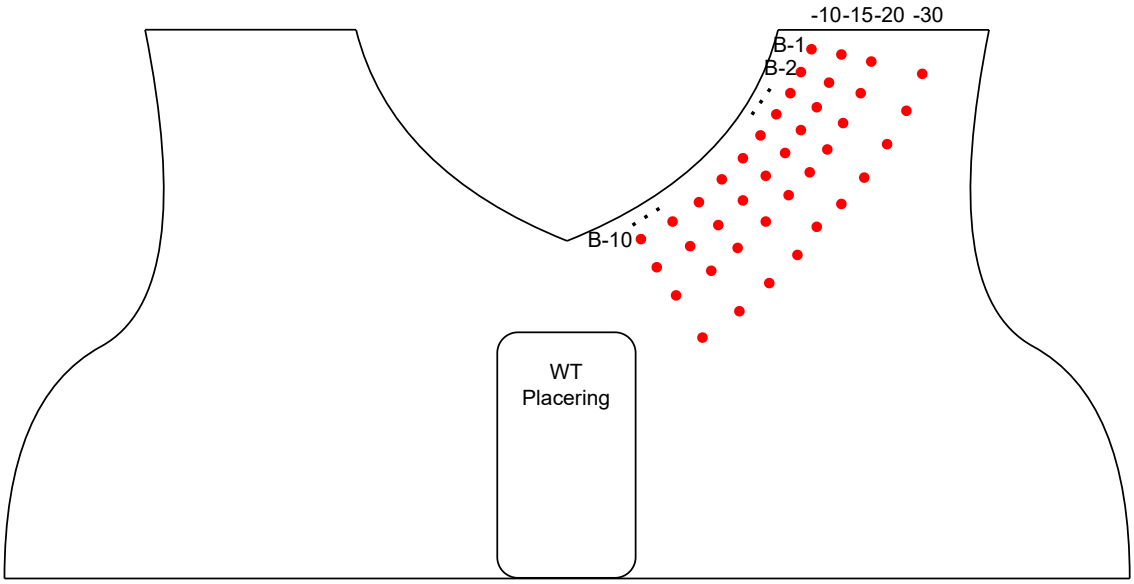
Det sidste forsøg måler responsene for de forskellige potentielle højtalerpositioner på vesten. Der måles henholdsvis på fronten af vesten, på bagsiden/ryggen af vesten og på positioner, tilsvarende hvor WT'en sidder på vesten. Alle positioner, der er målt på fronten, samt øverst på skulderen ved syningen, er noteret med et "F", positionerne på bagsiden med "B" og positionerne på WT'en med "WT".

Der måles med en afstand på 10 mm mellem hver punkt ned langs kraven, både på fronten og bagsiden. På fronten måles der fra syningen på toppen af skulderen og til bunden af kraven (170 mm), og på bagsiden fra skuldersyningen til kanten af WT'ens placering (100 mm). Afstanden fra skuldersyningen indikeres som det efterfølgende tal i cm, det vil sige at målinger på fronten 70 mm nede, noteres som "F-7".

Da der tages udgangspunkt i en maksimum diameter på 40 mm for højtalerenhederne, samt montering på vesten så tæt på kraven som muligt, måles der ortogonalt på kraven i en afstand af 10, 15, 20 og 30 mm fra kraven, for at få responset fra centrum af en højtaler, med en diameter på henholdsvis 20, 30 og 40 mm, samt to 20 mm diameter højtalere ved siden af hinanden. Dette gøres for at få fleksibilitet mellem højtalerpositioner. Dette noteres som det sidste tal, det vil sige at målinger på fronten 70 mm nede og i en afstand af 20 mm fra kraven, noteres som "F-7-20". Målepunkterne for vesten, markeret med rød, kan ses på figur 1.11.



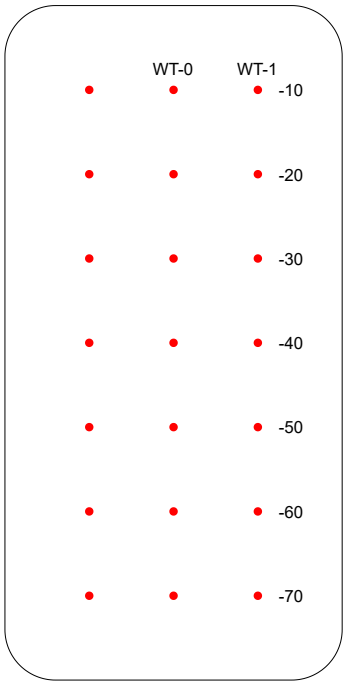
(a) Front.



(b) Bagside.

Figur 1.11: Placering af målepunkter på vesten.

For målingerne relaterende til WT-positionen, vælges der at lave målinger med 10 mm mellem hver punkt over et areal på 80 × 40 mm (antaget størrelse af enheden), tilsvarende forskellige konfigurationer af 20 og 40 mm diameter højtalerenheder. Ligesom for vesten noteres målepunktets placering med to numre, det første er afstand fra midten i bredden opgjort i cm, og det andet er afstanden fra toppen af enheden, opgjort i mm. Målepunkterne for WT-positionerne kan ses på figur 1.12.

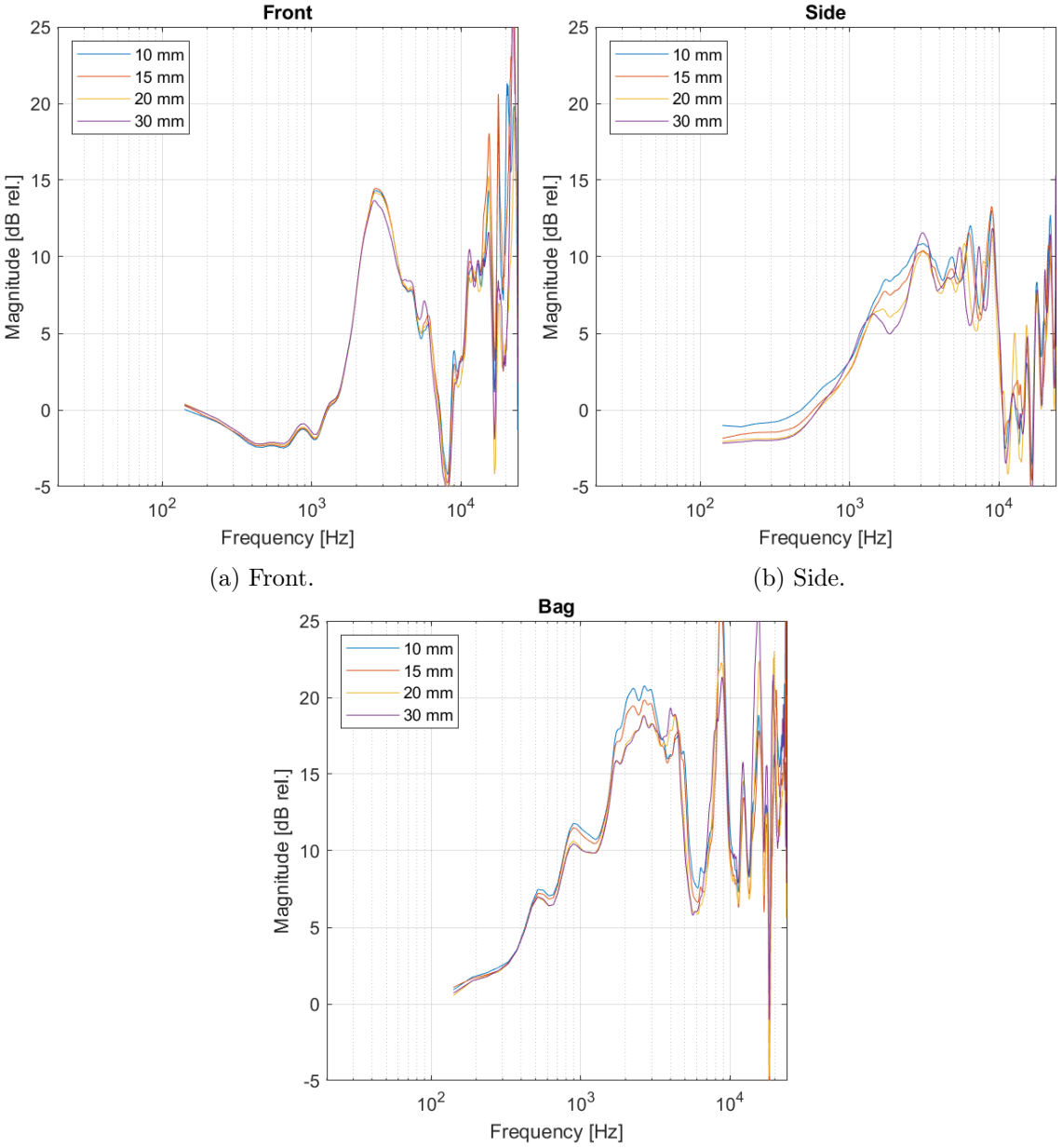


Figur 1.12: Målepositioner på WT.

Ligesom for begge de foregående måleforsøg, er der uønskede frekvensbidrag, stammende fra refleksioner i impulsresponene. På samme måde bruges der kun data fra det initierende impuls til at fjerne de uønskede bidrag.

1.4.4 Efterbehandlinger af målinger.

Baseret på de udførte målinger er det nu muligt at udregne de relative overføringsfunktioner for højtalerposition (repræsenteret ved mikrofonmålingerne på vesten) og øret. Dette gøres ved kompleks division af FFT'en af impulsresponsene, med HATS'en mikrofon divideret med vestens mikrofon. Efterfølgende udregnes overføringsfunktionen ved at tage den absolutte værdi af FFT-punkterne og omregne det til dB relativ. Et eksempel på et plot (F-7, hovedorientering 0°) kan ses på figur 1.13.



(a) Front.

(b) Side.

(c) Bag.

Figur 1.13: Overføringsfunktioner for F-7, hovedorientering 0°.

1.5 Delkonklussion og endelig problemformulering

I dette kapitel er der blevet undersøgt den eksisterende lovgivning i forhold til brugen af elektronisk udstyr, deriblandt kommunikationssystemer, under en fodboldkamp, samt hvilke lovmæssige regler der er inden for sikkerhed relaterende til disse og hvad der er på markedet på nuværende tidspunkt. I sammenhæng med et endeligt produkt er der undersøgt mulige højtalerplaceringer på spilleren samt der er udført målinger for at kunne lave overføringsfunktioner til valg af positioner til produktet.

Baseret på dette opstilles en endelig problemformulering:

Kan der, på bagrund af øverføringsfunktioner for forskellige højtalerpositioner, laves et kommunikationssystem til brug i træningssituationer, der giver forståelig og personlig lyd?

Systemdesign 2

I dette kapitel udarbejdes der hvilke potentielle højtalerkonfigurationer, der kan danne grundlag for det endelige produkt, samt hvilken signalbehandling, der potentielt kan udføres i forhold til optimering af personlig lydkvalitet.

Der vil blive opstillet forskellige cases i henhold til forskellige løsningsstrategier for højtalerkonfigurationer. Case 1 vil omhandle placeringer af højtalere på vesten, hvor case 2 omhandler placeringer på selve WT'en.

Efter målingerne, beskrevet i kapitel 1.4, er blevet udført, har Vokalo, ved hjælp af en ekstern partner, valgt en højtaler til produktet. Vokalo har valgt en OWS-111535TA fra Ole Wolff, med ydre dimensioner på 15 mm $\times$ 11 mm [17]. Der vil blive taget udgangspunkt i denne enhed under designet.

2.1 Case 1: Vest

For potentielle højtalerkonfigurationer til vesten tages der udgangspunkt i en konfiguration med fire højtalere på hver side af symmetriaksen (højre/venstre, 8 højtalere i alt). Dette gøres for potentielt set at kunne lave et system, hvor der kan implementeres beamforming til yderlig optimering af lydkvaliteten/den personlige lyd. Dette giver nogle kombinatoriske problemer, idet der er 112 forskellige placeringsmuligheder, resulterende i 149.059.680 konfigurationsmuligheder (antaget at to højtalere ikke kan have samme position).

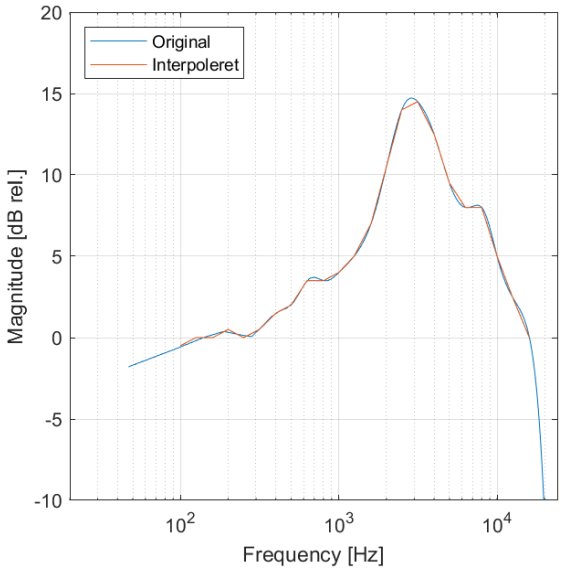
Foruden dette, er der andre begrænsende faktorer for placeringen af højtalere, givet den valgte højtalertypes geometri. Dette er blandt andet, at en højtaler, placeret på en "-15" position, ikke kan have en højtaler placeret på hverken "-10" eller "-20" i samme række, eller de to nærmeste rækker (f.eks. hvis "F-4-15" er valgt, kan der ikke være en højtaler i "F-3-10", "F-3-15", "F-3-20", "F-4-10", "F-4-20", "F-5-10", "F-5-15" eller "F-5-20", grundet overlap). Derfor benyttes følgende antagelser om placeringerne:

- Højtalerne er monteret med længden langs kraven ("F/B-X") og bredden langs skuldersyningen ("-XX").
- To højtalere kan ikke have samme position.
- Der skal være 1 række mellem to højtalere, hvis der er under 10 mm mellem højtalerne (f.eks. "F-3-10" og "F-5-15" er mulig, ikke "F-4-15").
- Der skal være minimum 10 mm mellem to højtalere, hvis de er i samme række (f.eks. "F-4-10" og "F-4-20" er mulig, ikke "F-4-15").

Den sidste antagelse er reelt set stridende med virkeligheden, idet det vil resultere i at to højtalere overlapper. Der vælges dog stadig at benytte det, idet ellers ville det kun være muligt at have to højtalere i samme række, hvis den ene af dem er "-30" og den anden ikke er "-20". Med dette vil det være muligt at have tre højtalere i samme række, hvor de to "yderste" ("-10" og "-30") vil være forskudt med 1 mm hver.

2.1.1 Valg af højtalerkonfigurationer baseret på similaritet til target-curve

For at give et udgangspunkt til valg af potentielle højtalerplaceringer, tages der udgangspunkt i mean square error (MSE) mellem overføringsfunktionerne og en diffus-feltsrespons, baseret på DS/IEC TS 60318-7:2017 [18]. Der vælges at bruge en diffus-feltsrepons som target-curve, da det er et frekvensrespons, der bruges som standard mange steder og tilnærmelsesvis giver en opfattet lineær frekvenskarakteristik hos lytteren [19]. Diffus-feltsreponsene fra [18] er opgjort i 1/3 oktavbånd, hvor overføringsfunktionerne er baseret på en 1024 punkts FFT. For at få diffus-feltresponsene på samme længde, vælges der at interpolere med MATLAB funktionen `interp1`, med `'spline'` som interpolationsmetode for at få en target-curve. Den oprindelige diffus-feltsrespons og den interpolerede, der bruges som target curve, kan ses på figur 2.1.



Figur 2.1: Diffus-feltsrespons.

For at undgå, at de højeste frekvenskomponenter har størst indflydelse på de udregnede MSE-værdier, udregnes MSE per 1/3 oktavbånd, baseret på diffus-feltskarakteristikken. Endvidere tages der kun udgangspunkt i 1/3 oktavbånds MSE'er op til centerfrekvens 8 kHz, for yderligere at minimere de højfrekvente bidrag, og fordi frekvensbidrag over dette ikke yderligere øger taleforståelse [20, Ch. 10 2B]. Ligeledes tages der ikke udgangspunkt i de tre første 1/3 oktavsbånd (under centerfrekvens 200 Hz), grundet en kombination af støjgulvet fra målingerne og opløsningen ved lave frekvenser (160 Hz og 200 Hz vil benytte samme bin).

Der antages, at i størstedelen af tiden under en fodboldkamp vil hovedet på en given spiller være orienteret inden for ± 30°, og oftest omkring 0°. Der vil derfor tages udgangspunkt i overføringsfunktionerne for "Deg 0", "Deg 30" og "Deg M30". Der tages udgangspunkt i overføringsfunktionerne fra referencehøjtaleren placeret til siden. Dette gøres grundet den tilnærmelsesvise proksimitet til både fronten og bagsiden af vesten og reduktion af skyggeeffekter fra kroppen. De potentielle højtalerpositioner vælges ud fra de mindste gennemsnit af de 1/3 oktavbåndsvægtede MSE-værdier, hvor positionen er blandt de mindste 5 MSE-værdier for alle tre orienteringer. De noterede MSE-værdier for positionerne er baseret på "Deg 0".

På fronten af vesten er højtalerpositionen med den laveste gennemsnitlige MSE-værdi (herefter benævnt som MSE) "F-4-10", med en MSE på 3,5, efterfulgt af "F-3-15" (3,86) og "F-4-15" (4,88). På bagsiden er højtalerpositionen med den laveste MSE "B-3-30" (4,43), efterfulgt af "B-1-20" (4,49) og "B-2-20" (4,8). Vælges de fire højtalerpositioner fra både front og bagside med laveste MSE, vil det resultere i positionerne "F-4-10", "F-3-15", "B-3-30" og "B-1-20". Denne konfiguration stridder imod de tidligere antagelser, da "F-4-10" og "F-3-15" vil overlappe. Fastholdes "F-4-10", er positionen på fronten med laveste MSE, der ikke stridder imod antagelserne, "F-1-20" (8,05). Endvidere kan der vælges at udskifte de to placeringer på fronten for "F-5-10" (4,91) og "F-3-10" (5,29), da de henholdsvis har fjerde og femte laveste MSE, og er de eneste to af de fem laveste MSE, der ikke overlapper.

Tages der kun udgangspunkt i fronten, kan positionerne "F-5-10", "F-3-10", "F-1-20" og "F-12-30" (8,17) benyttes. En konfiguration af positioner på fronten, placeret tættere på hinanden, vil være "F-5-10", "F-3-10", "F-1-20" og "F-0-30" (9,39). Tilsvarende, vælges der en konfiguration af højtalerpositioner kun på bagsiden, der ikke overlapper, vil "B-3-30", "B-1-20", "B-3-20" (5,23) og "B-1-30" (6,33) kunne benyttes.

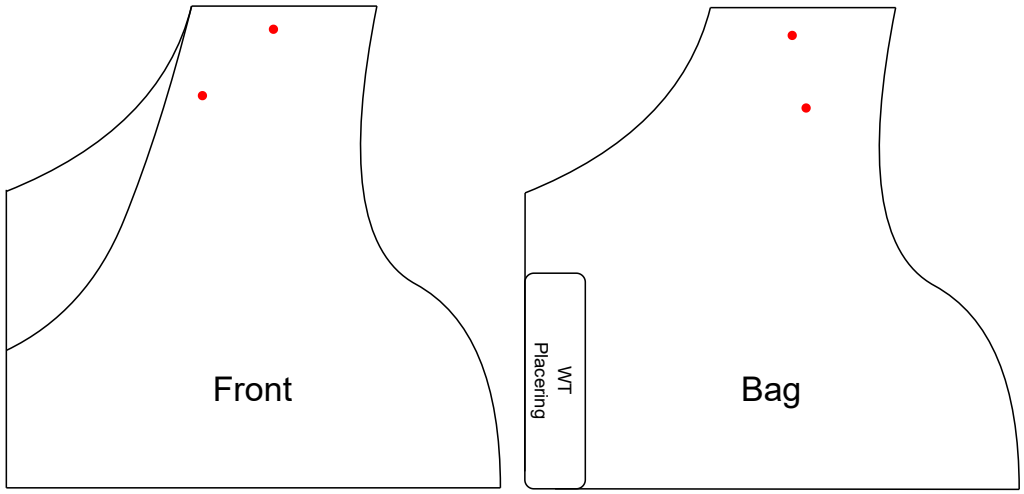
I tabel 2.1 kan de forskellige højtalerkonfigurationer, der testes, ses.

Konfig.	Højtalerposition			
1	F-1-20	F-4-10	B-1-20	B-3-30
2	F-3-10	F-5-10	B-1-20	B-3-30
3	F-1-20	F-3-10	F-5-10	F-12-30
4	F-0-30	F-1-20	F-3-10	F-5-10
5	B-1-20	B-1-30	B-3-20	B-3-30

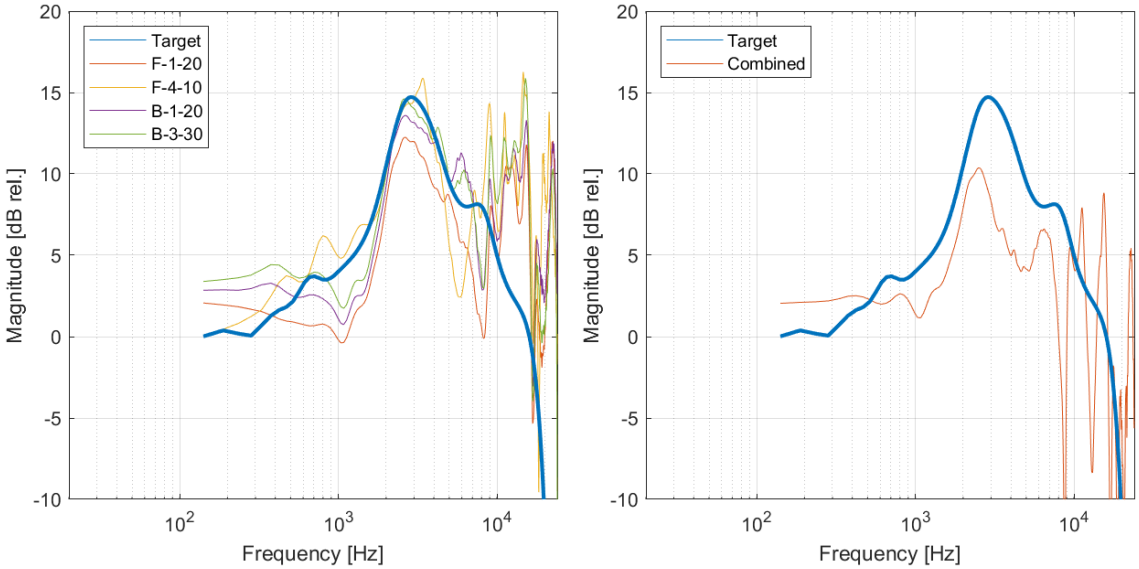
Tabel 2.1: Højtalerkonfigurationer.

Konfiguration 1

For at undersøge om hvor vidt en højtalerkonfiguration er brugbar, sammenlignes den på samme måde som de individuelle placeringer med diffus-feltsresponset. Den samlede overføringsfunktion for højtalerkonfigurationen udregnes ved at midle over de fire FFT'er fra højtalerpositionernes impulsrespons og omregne det til et frekvensrespons. Der tages kun udgangspunkt i hovedorientering "Deg 0" på nuværende tidspunkt. På figur 2.2 kan højtalerpositionerne for konfiguration 1, bestående af "F-1-20", "F-4-10", "B-1-20" og "B-3-30", ses, samt de individuelle overføringsfunktioners og den samlede overføringsfunktions frekvensrespons.



(a) Højtalerpositioner.



(b) Individuelle overføringsfunktioner.

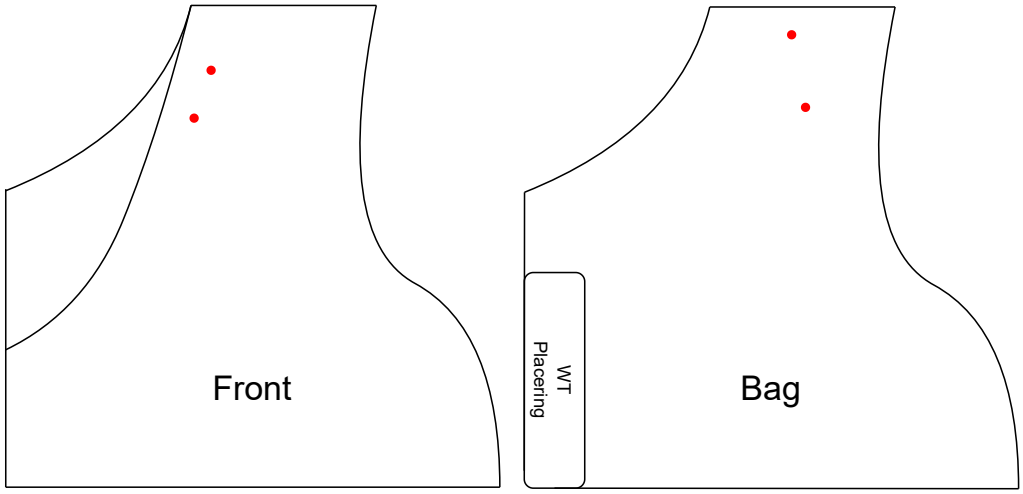
(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.2: Konfiguration 1 ("F-1-20", "F-4-10", "B-1-20" og "B-3-30").

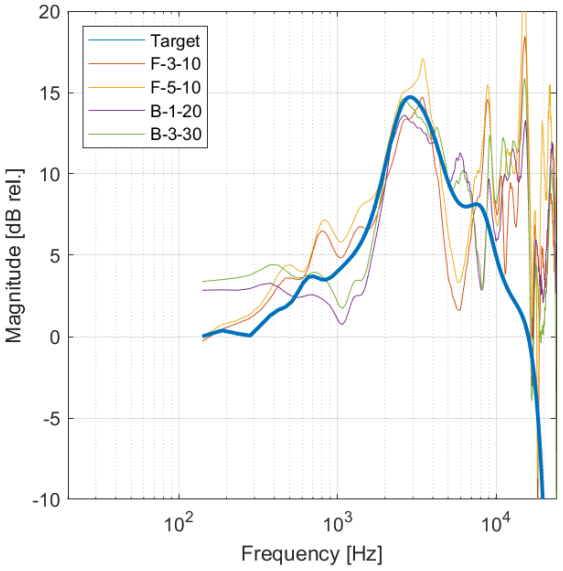
Tages der udgangspunkt i frekvensresponset for den samlede overføringsfunktion, der kan ses på figur 2.2c, er der nogenlunde overensstemmelse med diffus-feltsresponset til cirka 7 kHz, omend der er en niveauforskel på over 10 dB. Der er også et markant dyk, med efterfølgende kamfiltereffekt ved 8,5 kHz, men det antages ikke at have en større effekt på taleforståelsen, samt signalet med stor sandsynlighed vil blive lavpas-filtreret ved omkring 10 kHz. Udregnes MSE'en på den samme måde som for de individuelle overføringsfunktioner, fås en værdi på 18,89. Medregnes MSE'en for centerfrekvens 8 kHz ikke, bliver den reduceret til 11,93. Det antages for nuværende at konfiguration 1 kan bruges til det endelige produkt.

Konfiguration 2

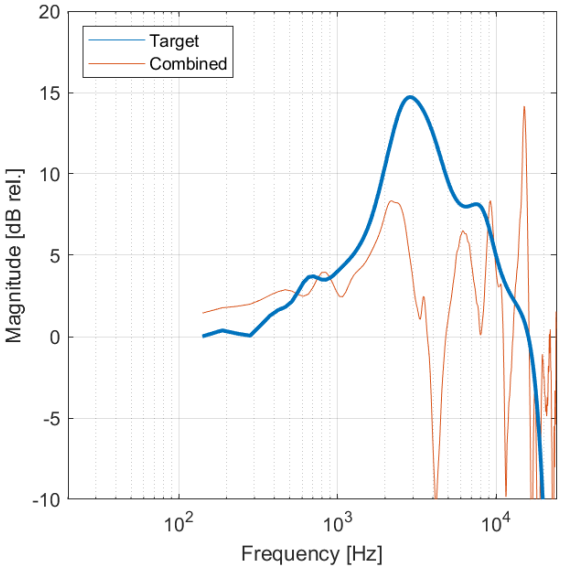
På figur 2.3 kan højtalerpositionerne for konfiguration 2, bestående af "F-3-10", "F-5-10", "B-1-20" og "B-3-30", ses, samt de individuelle overføringsfunktioners og den samlede overføringsfunktions frekvensrespons.



(a) Højtalerpositioner.



(b) Individuelle overføringsfunktioner.



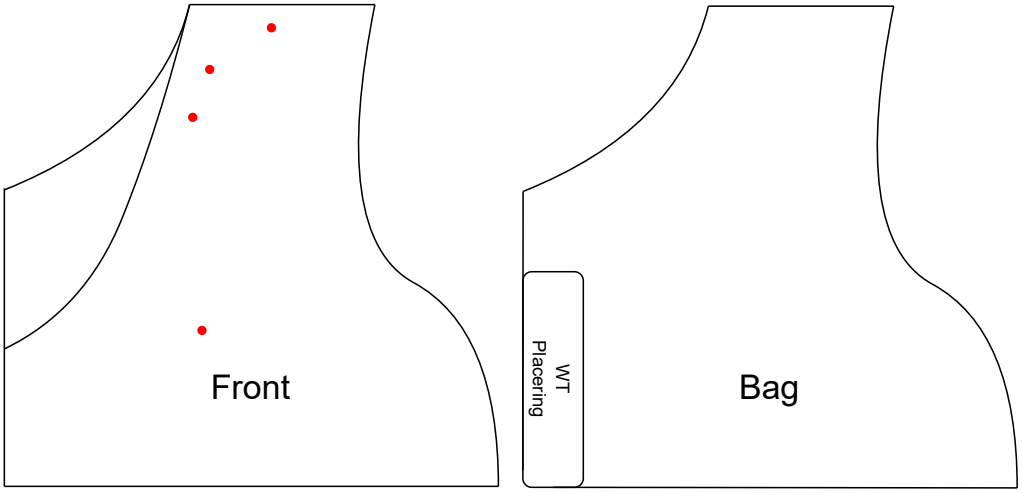
(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.3: Konfiguration 2 ("F-3-10", "F-5-10", "B-1-20" og "B-3-30").

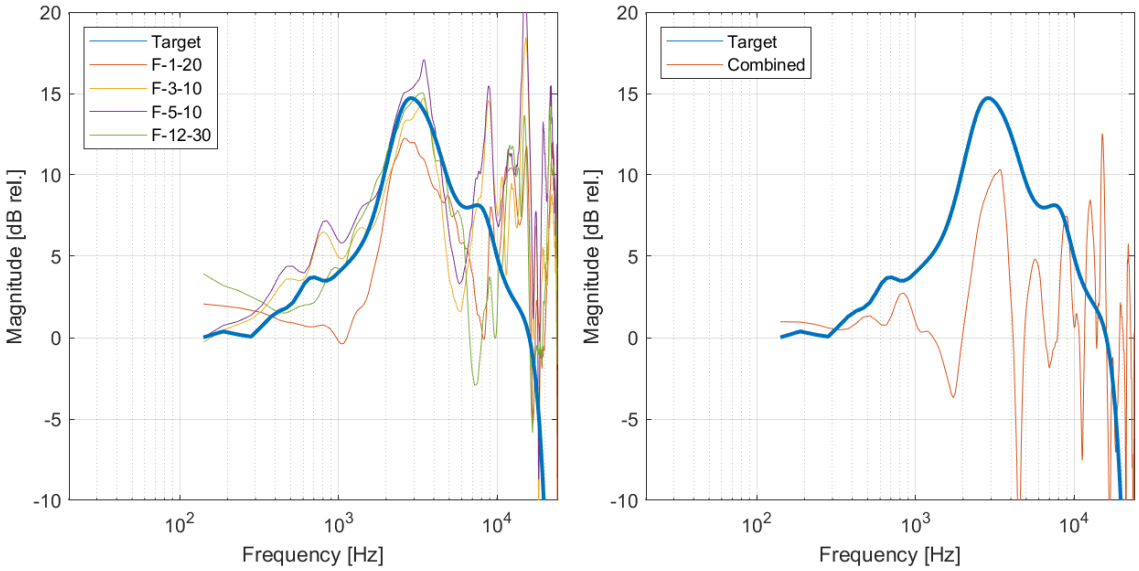
Selvom de individuelle overføringsfunktioner tilnærmelsesvis stemmer overens med diffus-feltsresponset, som det kan ses på figur 2.3b, kan det samme ikke siges om den samlede overføringsfunktion, der kan ses på figur 2.3c. Hvor diffus-feltsreponset har sit maksimum ved omkring 3 kHz, rammer overføringsfunktionen et lokalt minimum, for at nå et nyt minimum, der potentielt er det globale minimum, ved 4 kHz. Den udregnede MSE er på 38,02. Ud fra dette antages det ikke, at konfiguration 2 kan bruges til det endelige produkt.

Konfiguration 3

På figur 2.4 kan højtalerpositionerne for konfiguration 3, bestående af "F-1-20", "F-3-10", "F-5-10" og "F-12-30", ses, samt de individuelle overføringsfunktioners og den samlede overføringsfunktions frekvensrespons.



(a) Højtalerpositioner.



(b) Individuelle overføringsfunktioner.

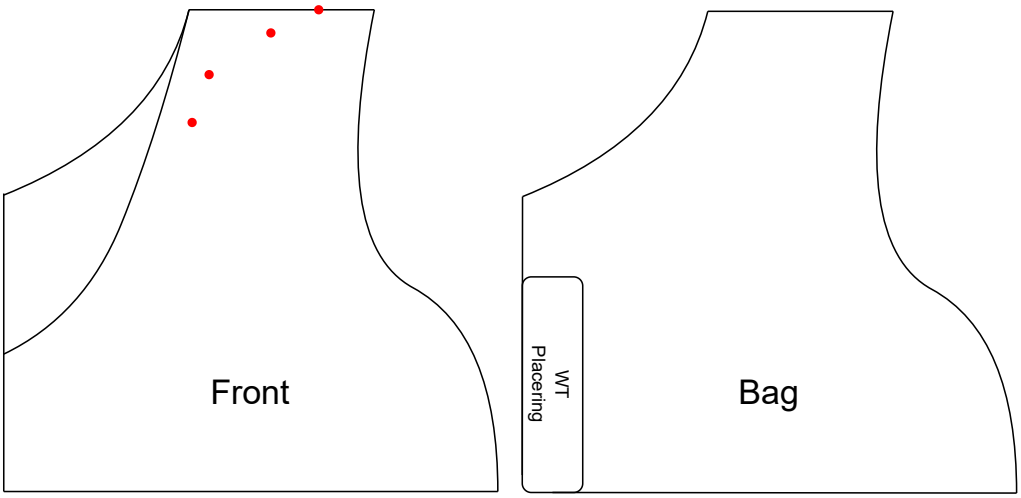
(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.4: Konfiguration 3 ("F-1-20", "F-3-10", "F-5-10" og "F-12-30").

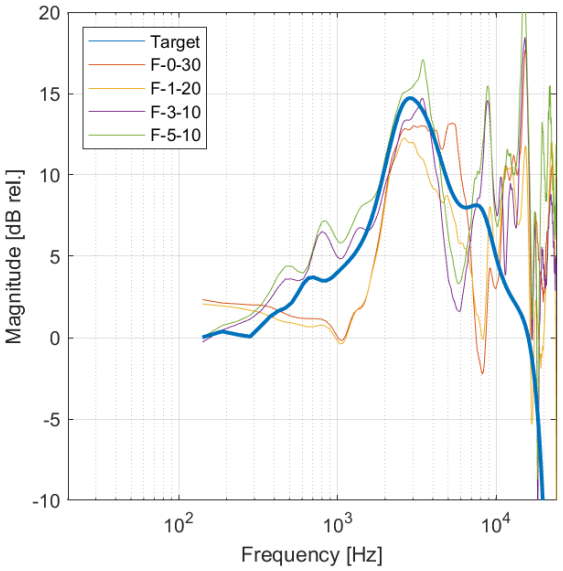
Ligesom for konfiguration 2 (figur 2.3), kan der på figur 2.4 ses, at der er store afvigelser for den samlede overføringsfunktion i forhold til diffus-feltsresponset. Dette, sammen med en MSE på 44,45, gør, at det antages at konfiguration 3 ikke kan bruges til det endelige produkt.

Konfiguration 4

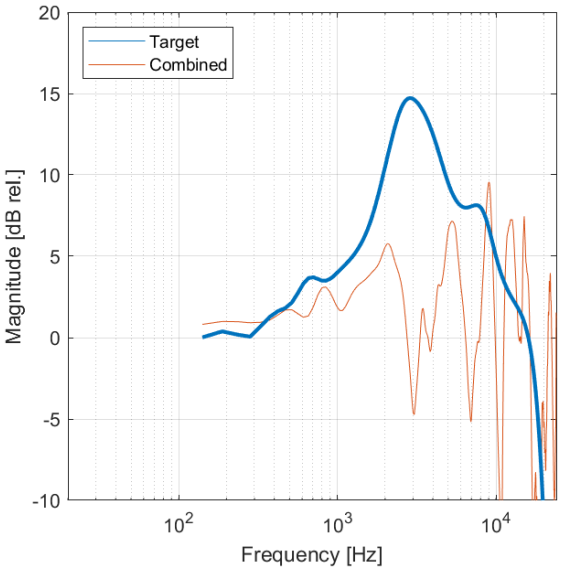
På figur 2.5 kan højtalerpositionerne for konfiguration 4, bestående af "F-0-30", "F-1-20", "F-3-10" og "F-5-10", ses, samt de individuelle overføringsfunktioners og den samlede overføringsfunktions frekvensrespons.



(a) Højtalerpositioner.



(b) Individuelle overføringsfunktioner.



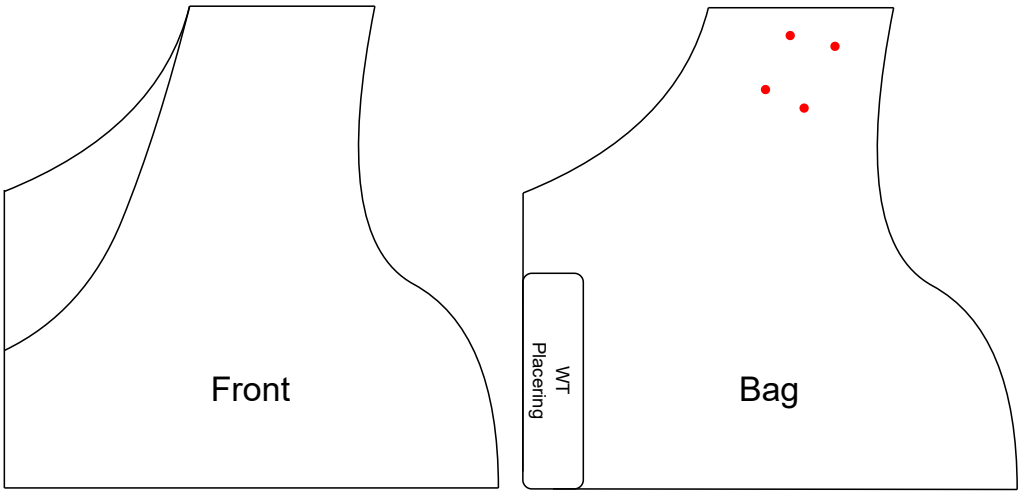
(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.5: Konfiguration 4 ("F-0-30", "F-1-20", "F-3-10" og "F-5-10").

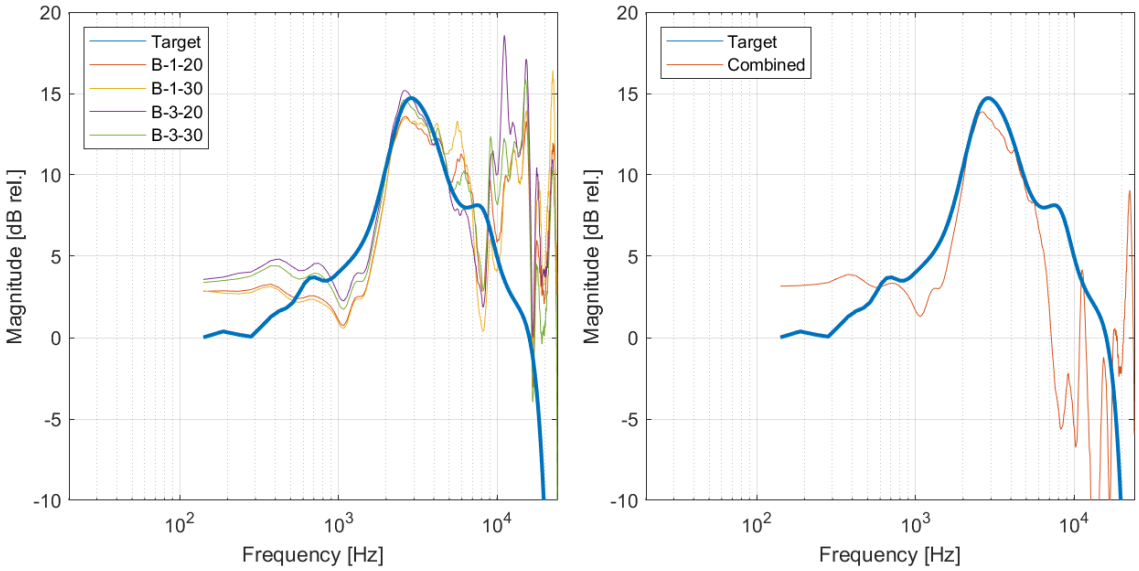
Som det kan ses på figur 2.5c, er der nærmest ingen similaritet imellem overføringsfunktionens og diffus-feltets frekvensrespons. Dette, sammen med en MSE på 81,72, gør, at det antages at konfiguration 4 ikke kan bruges til det endelige produkt.

Konfiguration 5

På figur 2.6 kan højtalerpositionerne for konfiguration 5, bestående af "B-1-20", "B-1-30", "B-3-20" og "B-3-30", ses, samt de individuelle overføringsfunktioners og den samlede overføringsfunktions frekvensrespons.



(a) Højtalerpositioner.



(b) Individuelle overføringsfunktioner.

(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.6: Konfiguration 5 ("B-1-20", "B-1-30", "B-3-20" og "B-3-30").

Som det kan ses på figur 2.6c, har konfiguration 5 den frekvensrespons der stemmer mest overens med diffus-feltsresponset inden for 500-5000 Hz, der har den største indflydelse på taleforståeligheden. Konfiguration 5 har det samme problem som konfiguration 1 (figur 2.2), med en kamfiltereffekt, der begynder tidligere for konfiguration 5 end konfiguration 1. Udregnes MSE'en fås 12,14. Hvis MSE-værdien fra centerfrekvens 8 kHz ikke medregnes, fås en værdi på 4,6, hvilket er markant mindre end for konfiguration 1. Hvor stor påvirkning dette mere markante dyk har på taleforståelsen vides ikke på nuværende tidspunkt, og derfor antages det, at konfiguration 5 kan bruges i det endelige produkt. Det vides dog ikke hvilken af konfiguration 1 og 5, der anbefales mest.

Overordnede resultater

I tabel 2.2, kan de forskellige højtalerkonfigurationer ses, samt hvilke, der anbefales til videre brug.

Konfig.	Højtalerposition				Anbefales
1	F-1-20	F-4-10	B-1-20	B-3-30	✓
2	F-3-10	F-5-10	B-1-20	B-3-30	×
3	F-1-20	F-3-10	F-5-10	F-12-30	×
4	F-0-30	F-1-20	F-3-10	F-5-10	×
5	B-1-20	B-1-30	B-3-20	B-3-30	✓

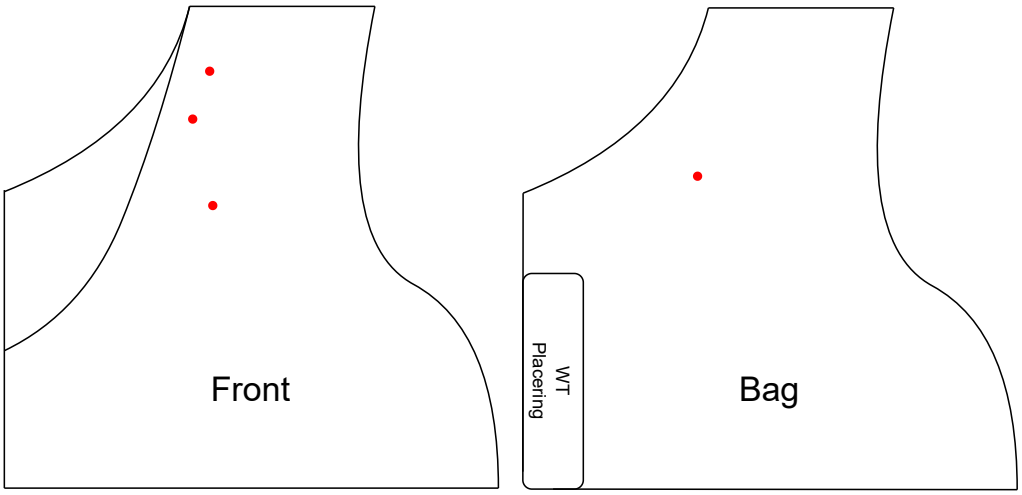
Tabel 2.2: Højtalerkonfigurationer.

2.1.2 Valg af højtalerkonfigurationer baseret på forsøg

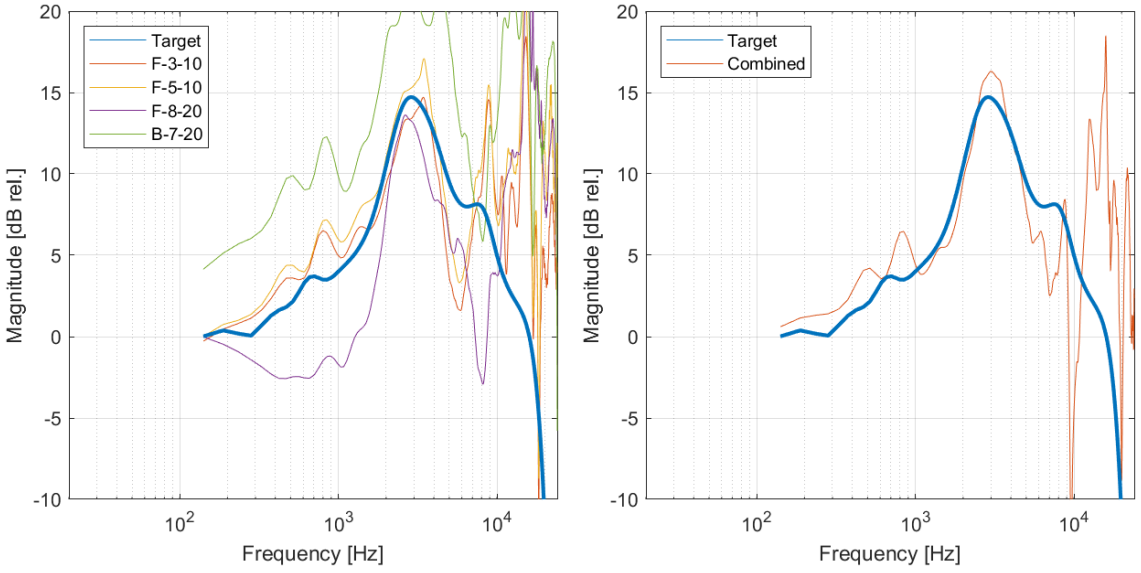
Baseret på resultaterne i kapitel 2.1.1, kan det antages, at en konfiguration bestående udelukkende af de de overføringsfunktioner med de laveste MSE-værdier, ikke nødvendigvis giver en samlet overføringsfunktion med den laveste MSE. Dette er primært grundet de konstruktive/destruktive interferenser fra de komplekse midlinger af overføringsfunktionerne.

Der er derfor to måder at undersøge konfigurationer med lavere MSE: manuelt finde konfigurationer ved trial and error, eller forsøge samtlige konfigurationer og undersøge hvilke, der er "realistikse", ud fra antagelserne for positionerne.

Ved trial and error forsøg er den laveste MSE fundet ved en konfiguration bestående af "F-3-10", "F-5-10", "F-8-20" og "B-7-20", med en MSE på 2,85. Overføringsfunktionerne og positionerne for kombinationen kan ses på figur 2.7.



(a) Højtalerpositioner.



(b) Individuelle overføringsfunktioner.

(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.7: Konfiguration "trial and error" ("F-3-10", "F-5-10", "F-8-20" og "B-7-20").

Da det er en tidskrævende opgave, at manuelt afprøve individuelle konfigurationer i håbet om at finde resultater med lignende eller lavere MSE, vælges der at lave en "brute force" løsning, ved at teste samtlige konfigurationer. Da der er 112 målte placeringsmuligheder giver det reelt set 112^4 muligheder, eller 157.351.936 konfigurationer. Da mange af disse er duplikater (f.eks "F-3-10", "F-5-10" og "F-5-10", "F-3-10" vil være den samme konfiguration) og andre ikke mulige kombinationer, ifølge de benyttede antagelser (f.eks. 4 × "F-0-10"), reduceres udregningen til $\binom{112}{4}$ kombinationer, eller 6.210.820 forskellige konfigurationer, en reducering med en faktor 25.

For ikke at få samtlige kombinationer, vælges der kun at gemme dem, med de laveste MSE. Da den laveste opnåede MSE ved manuel søgning er 2,85, vælges der at sætte en grænseværdi i nærheden af denne værdi. Der vælges at bruge en grænseværdi på 3, da det er det nærmeste heltal. Med denne grænseværdi, fås der, ud fra de 6.210.820 kombinationer, 1290 konfigurationer med en MSE lavere end 3, af dem er 10 lavere end 2. De 10 konfigurationer, samt deres MSE, kan ses i tabel 2.3.

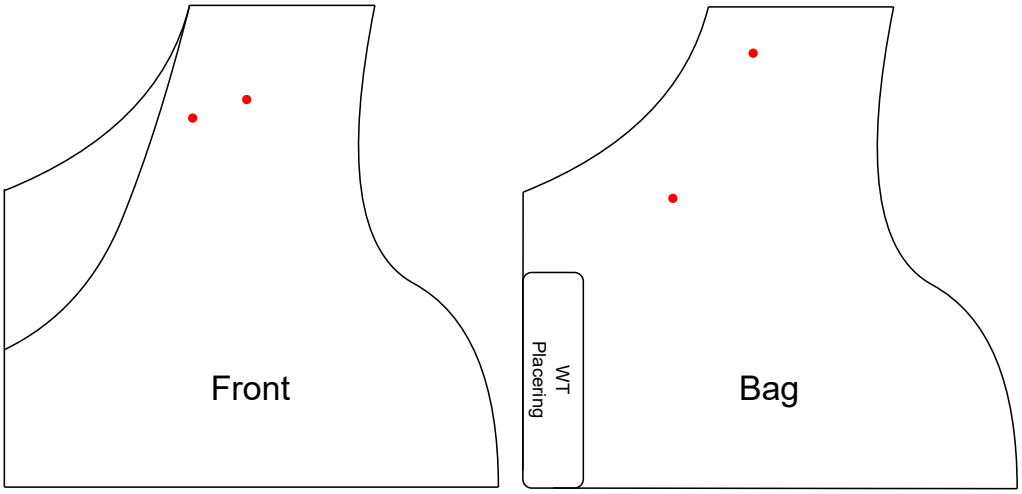
Konfig.	Højtalerposition				MSE
1	F-4-20	F-5-10	B-2-15	B-8-20	1,72
2	F-4-20	F-5-10	B-1-15	B-8-20	1,87
3*	F-4-15	F-4-20	B-2-15	B-8-20	1,89
4	F-3-30	F-5-10	B-2-15	B-8-20	1,90
5	F-4-30	F-5-10	B-2-15	B-8-20	1,90
6*	F-3-15	F-4-10	B-7-15	B-7-20	1,94
7*	F-3-15	F-4-10	B-7-10	B-7-20	1,95
8*	F-3-15	F-4-10	B-7-20	B-8-10	1,96
9*	F-3-15	F-4-10	B-6-10	B-7-20	1,98
10	F-2-15	F-4-20	F-5-10	B-8-20	1,99

Tabel 2.3: "Brute force" højtalerkonfigurationer med de 10 laveste MSE. Konfigurationer markeret med * stridder imod benyttede antagelser.

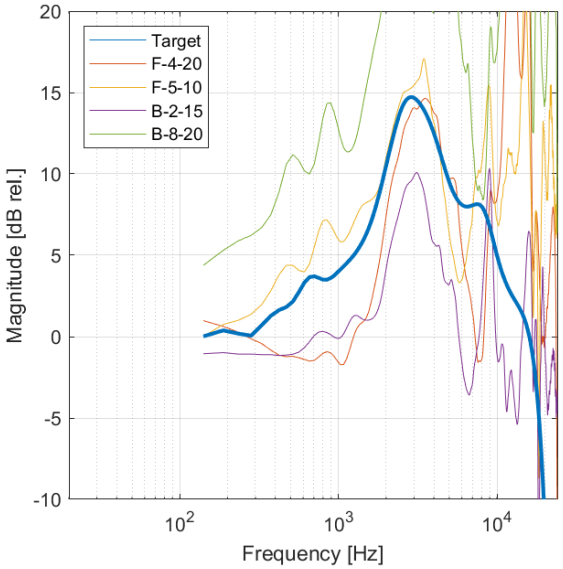
Af de 10 konfigurationer, kan konfiguration 3, 6, 7, 8 og 9 ikke benyttes, idet de alle stridder imod den tredje antagelse: *"Der skal være 1 række mellem to højtalere, hvis der er under 10 mm mellem højtalerne"*. Disse problemer opstår alle af en kombination af højtalere, der ligger i en "-15" position, med enten en "-10" eller "-20" position ved siden af sig.

Alle 1290 konfigurationer med en MSE under 3 består af positioner på både fronten og bagsiden. Ønskes der konfigurationer af højtalere kun på enten fronten eller bagsiden testes kombinationerne igen for disse isoleret, med udvidede grænseværdier (henholdsvis 5 og 4 for front og bagside). Konfigurationerne med laveste MSE, der ikke stridder imod de benyttede antagelser, er henholdsvis "F-1-30", "F-4-15", "F-8-15" og "F-11-10" for fronten (4,13) og "B-2-10", "B-6-10", "B-7-20" og "B-7-30" for bagsiden (3,44).

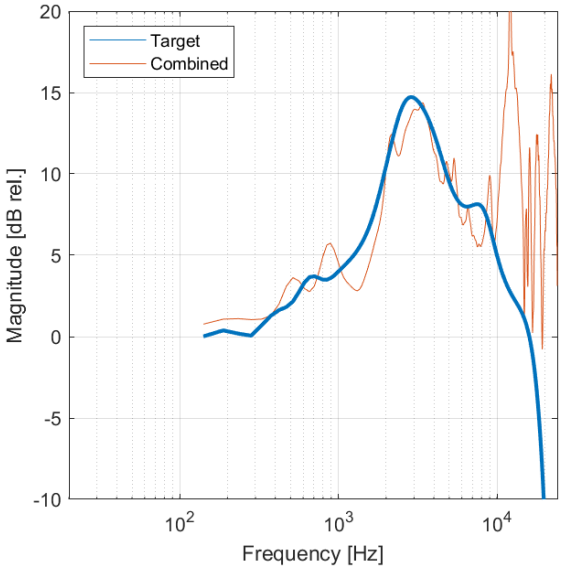
Overføringsfunktionerne, samt positionerne, for de syv mulige konfigurationer kan ses på figur 2.8 - 2.14.



(a) Højtalerpositioner.

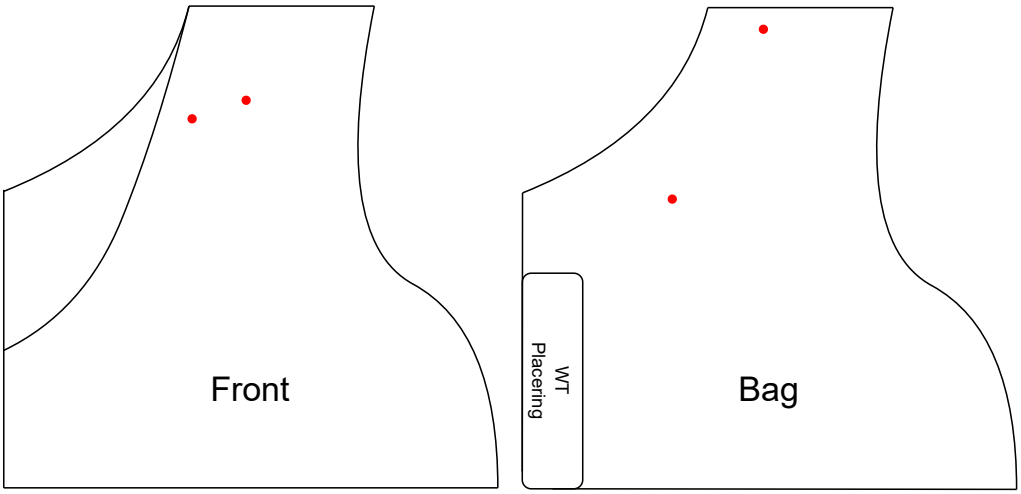


(b) Individuelle overføringsfunktioner.

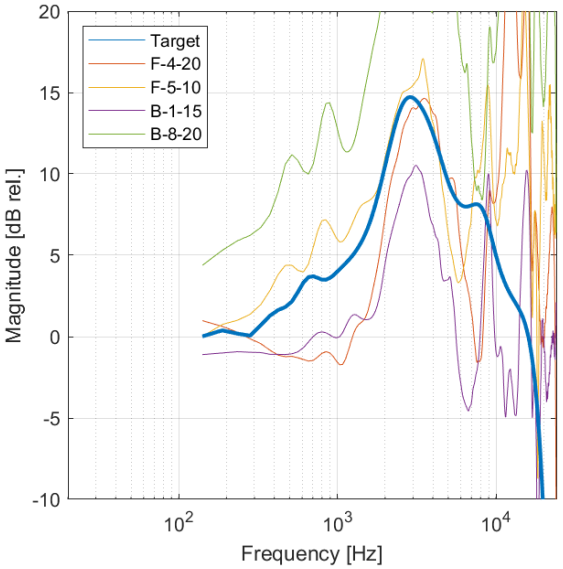


(c) Samlede overføringsfunktion.

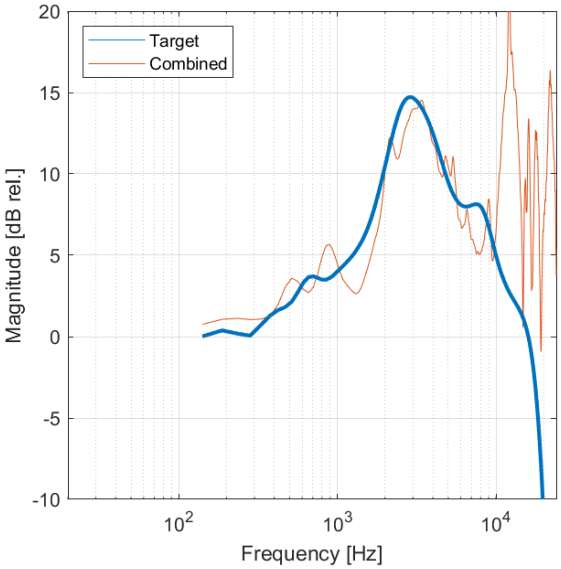
Figur 2.8: "Brute force" konfiguration 1 ("F-4-20", "F-5-10", "B-2-15" og "B-8-20").



(a) Højtalerpositioner.

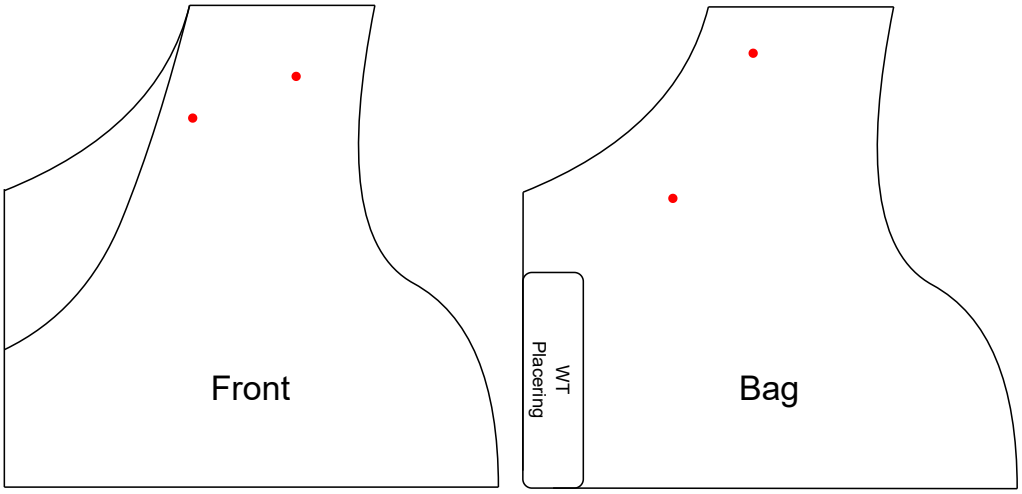


(b) Individuelle overføringsfunktioner.

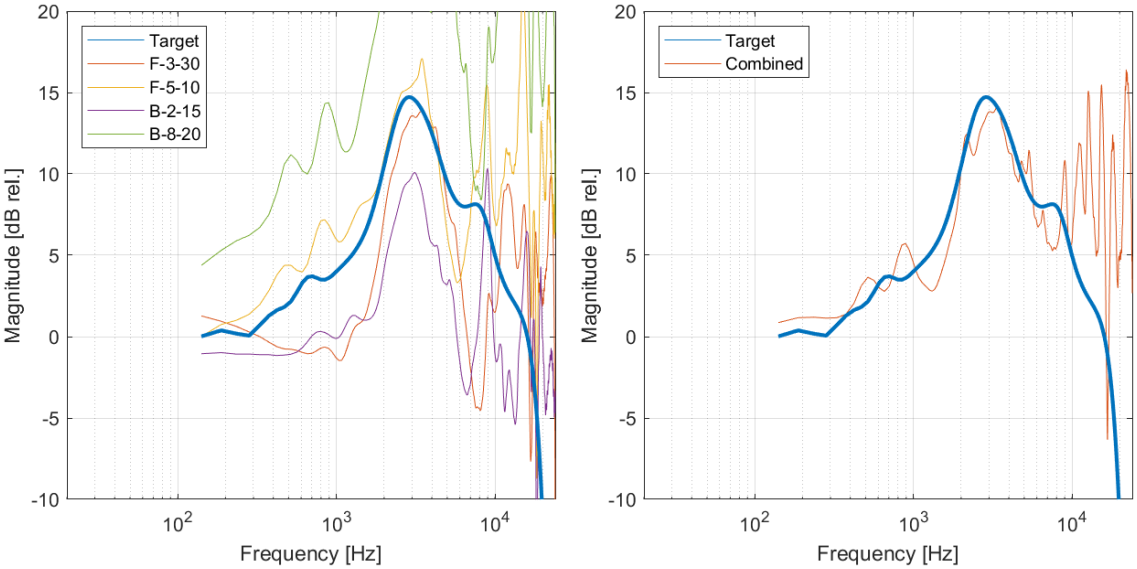


(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.9: "Brute force" konfiguration 2 ("F-4-20", "F-5-10", "B-1-15" og "B-8-20").



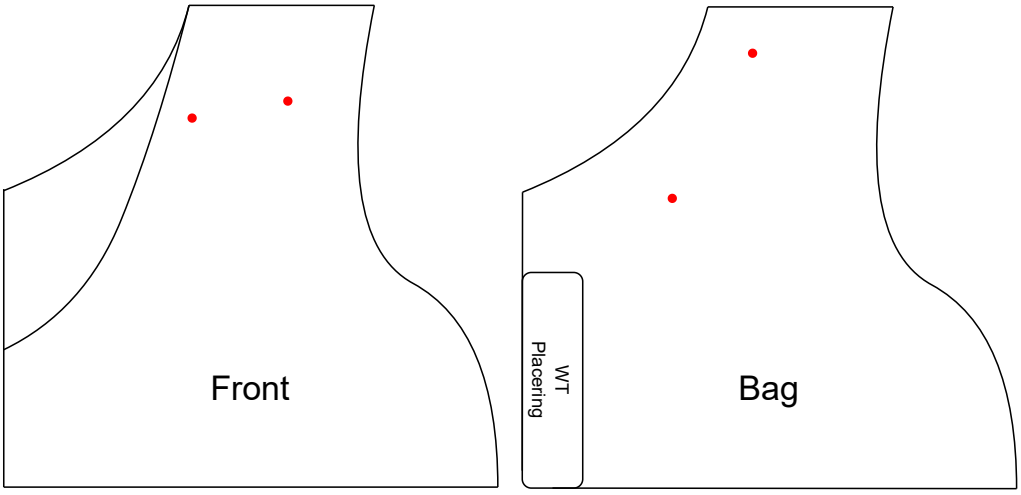
(a) Højtalerpositioner.



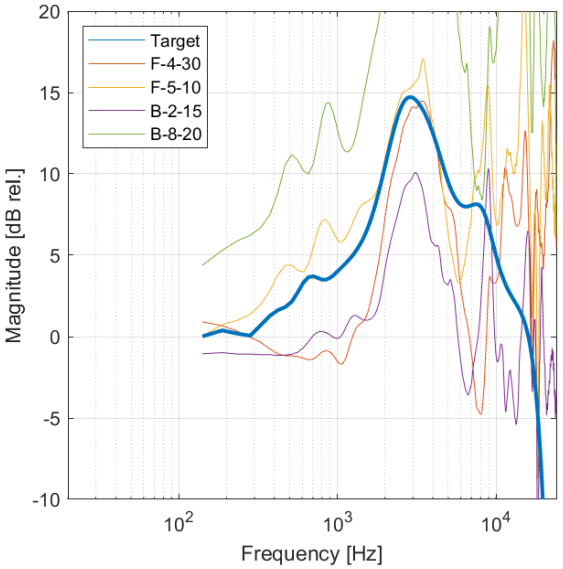
(b) Individuelle overføringsfunktioner.

(c) Samlede overføringsfunktion.

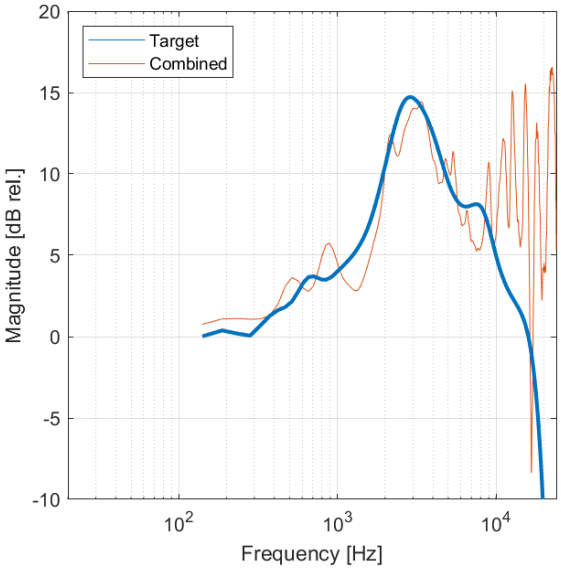
Figur 2.10: "Brute force" konfiguration 4 ("F-3-30", "F-5-10", "B-2-15" og "B-8-20").



(a) Højtalerpositioner.

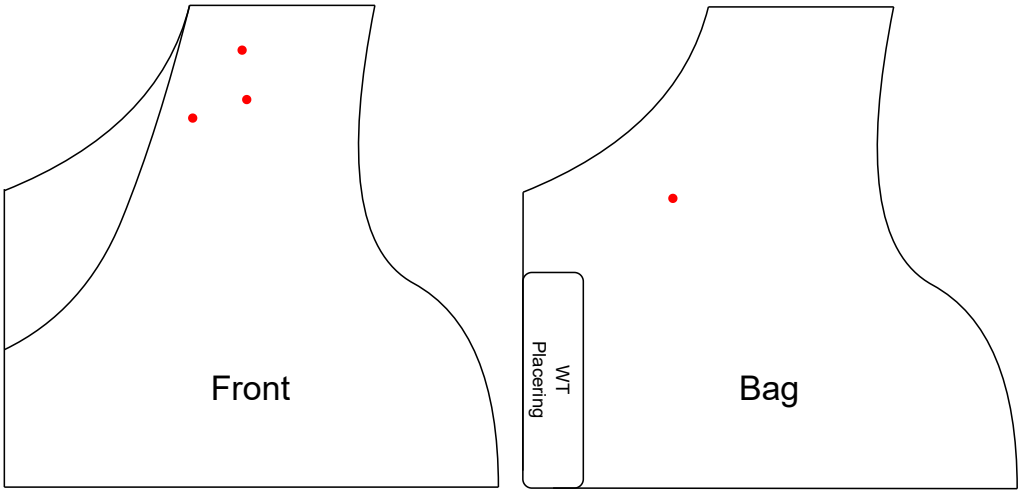


(b) Individuelle overføringsfunktioner.

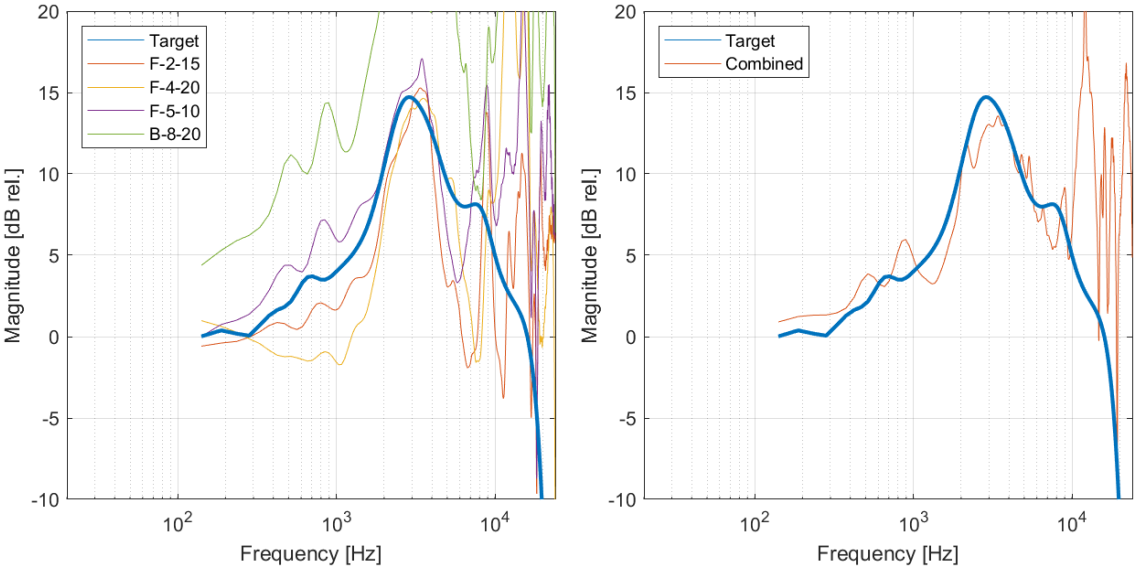


(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.11: "Brute force" konfiguration 5 ("F-4-30", "F-5-10", "B-2-15" og "B-8-20").



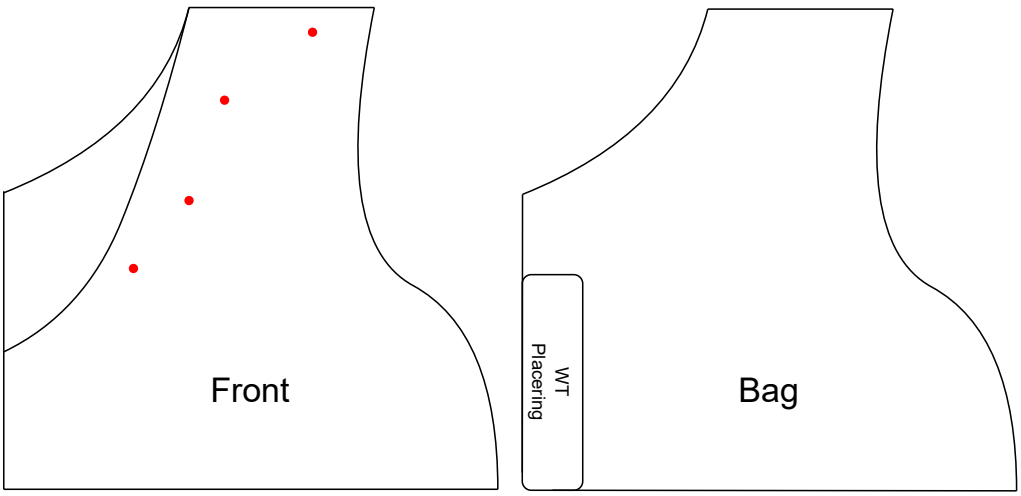
(a) Højtalerpositioner.



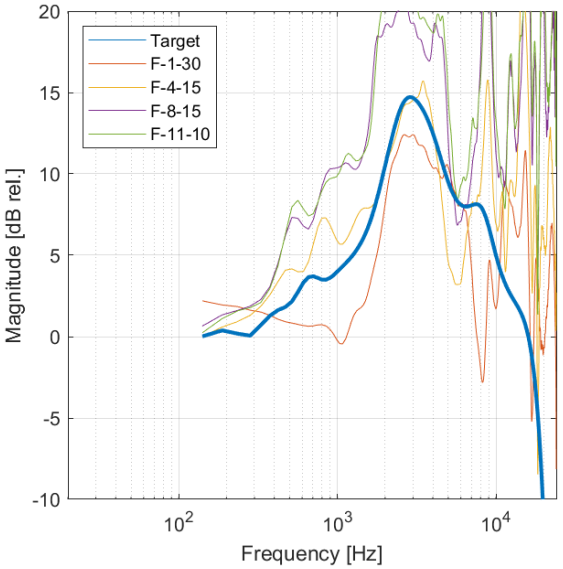
(b) Individuelle overføringsfunktioner.

(c) Samlede overføringsfunktion.

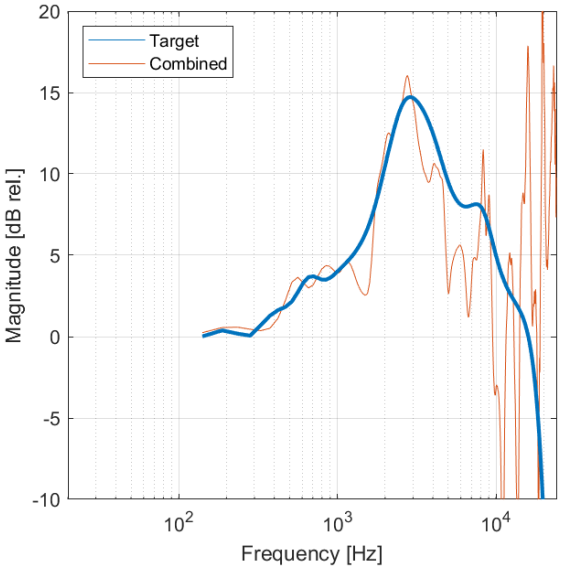
Figur 2.12: "Brute force" konfiguration 10 ("F-2-15", "F-4-20", "F-5-10" og "B-8-20").



(a) Højtalerpositioner.

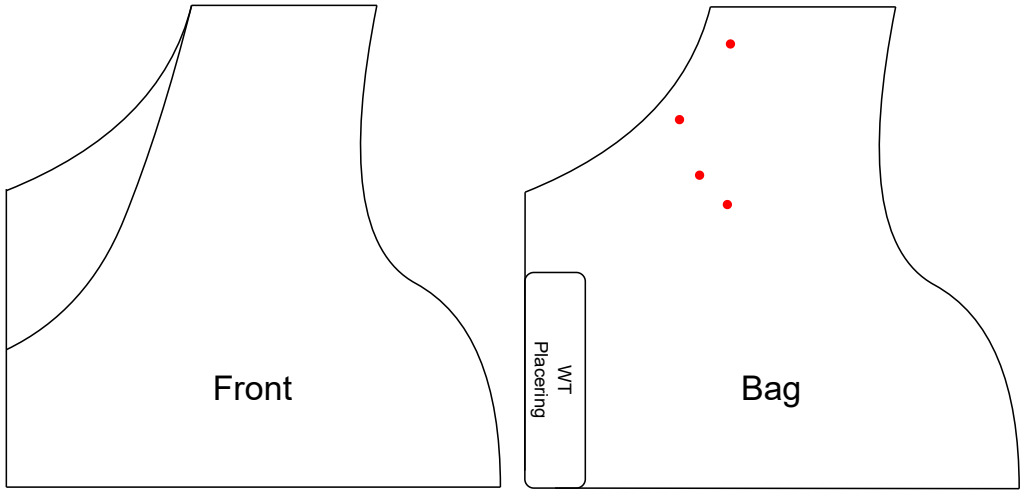


(b) Individuelle overføringsfunktioner.

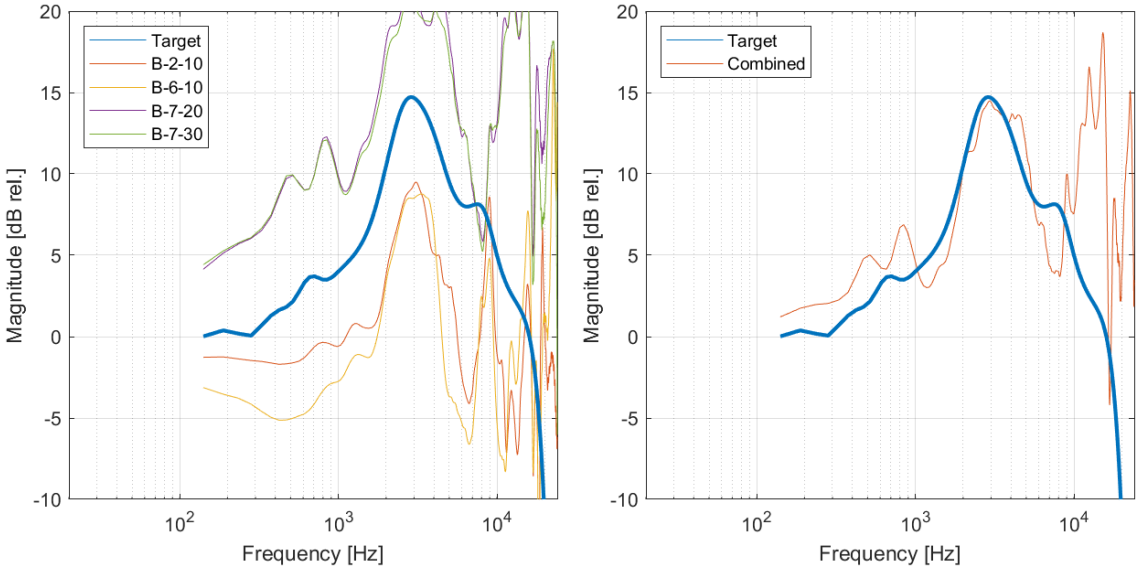


(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.13: "Brute force" konfiguration "Front" ("F-1-30", "F-4-15", "F-8-15" og "F-11-10").



(a) Højtalerpositioner.



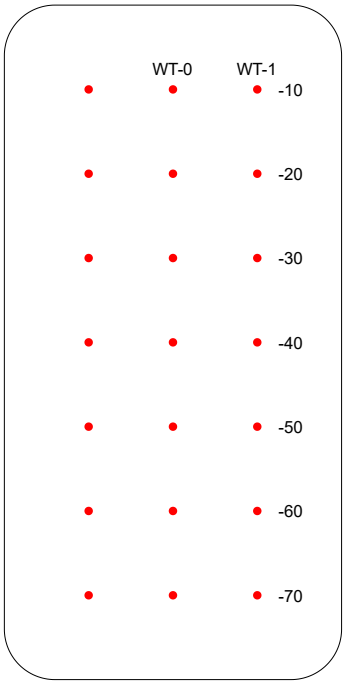
(b) Individuelle overføringsfunktioner.

(c) Samlede overføringsfunktion.

Figur 2.14: "Brute force" konfiguration "Bag" ("B-2-10", "B-6-10", "B-7-20" og "B-7-30").

2.2 Case 2: WT

I forhold til placeringer af højtalere på WT'en, tages der udgangspunkt i målepositionerne, beskrevet i kapitel 1.4.3. Målepunkterne kan også ses på figur 2.15.

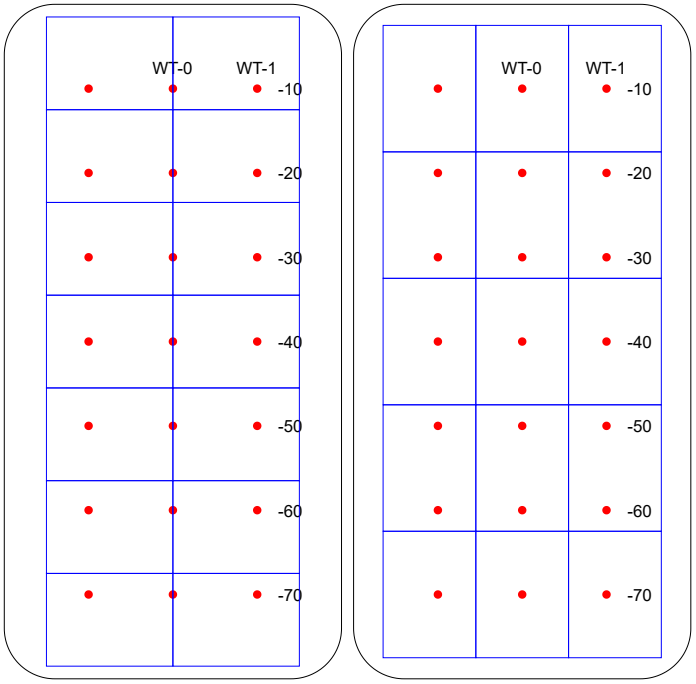


Figur 2.15: Målepositioner på WT.

Ud fra målepunkterne er der to potentielle højtalerkonfigurationer, baseret på at udnytte hele arealet på WT'en (antaget 80 × 40 mm): 7 × 2 enheder, hvor højtalerne er placeret langs WT-positionerne længde mod længde, eller 5 × 3 enheder, hvor højtalerne er placeret langs WT-positionerne bredde mod bredde. Da målepositionerne på WT'en er målt med 10 mm og den valgte højtalerenhed er 15 mm i længden og 11 mm i bredden, vil det betyde, at de individuelle højtalere må "forskydes" i forhold til målepositionen.

For 7 × 2 konfigurationen, antages position "-40" (den midterste) holdt "fast", og hvor de andre højtalere forskydes med henholdsvis 1, 2 og 3 mm, i forhold til de respektive målepunkter. Der kan også vælges at fastholde position "-20" og "-60", og derved kun forskyde de andre højtalere med 1 mm, dog på bekostning af en højtaler i position "-40".

For 5 × 3 konfigurationen kan positionerne "-10", "-40" og "-70" fastholdes. Dette betyder dog, at hverken af de mellemliggende positioner ("-20", "-30" og "-50", "-60" henholdsvis) passer i forhold til mulige placeringer, hvorved der må laves en approksimation af de positioner. Dette gøres ved at midle over FFT'erne af impulsresponsene parvist ("-20", "-30" og "-50", "-60" henholdsvis) for at approksimere positionerne "-25" og "-55", der bagefter kan bruges til at udregne overføringsfunktionerne. De potentielle højtalerkonfigurationer kan ses på figur 2.16.



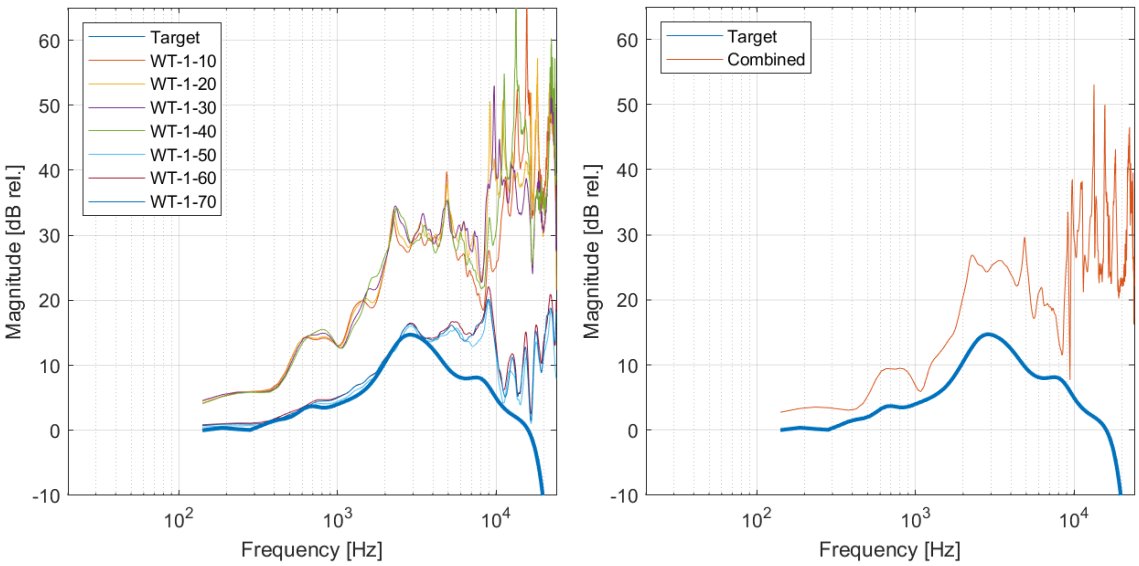
(a) 7 × 2 konfiguration. (b) 5 × 3 konfiguration.

Figur 2.16: Målepositioner på WT, samt højtalerplaceringer i blå.

For WT placeringen tages der udgangspunkt i overføringsfunktionerne fra referencehøjtaleren placeret bagved. Dette gøres, da der er en direkte udbredelseskarakteristik til højtalerpositionerne på WT'en, og derved minimal potentiel skygge fra kroppen.

2.2.1 7 × 2 konfiguration

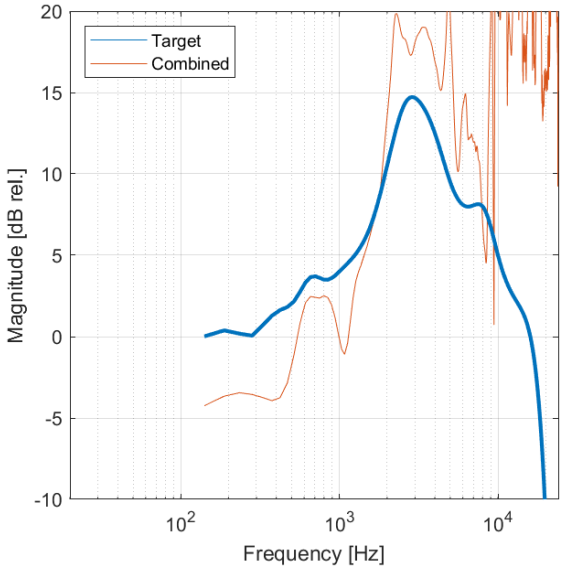
I forhold til Case 1 (kapitel 2.1) forsøges der med samtlige syv enheder på én gang. Udregningen af den samlede overføringsfunktion udføres på samme måde, ved at midle over FFT'erne fra de forskellige højtalerpositioners overføringsfunktioner, for bagefter at omregne det til dB rel. På figur 2.17 kan de individuelle og samlede overføringsfunktioner ses, samt diffus-feltsresponset som reference.



(a) Individuelle. (b) Samlede.

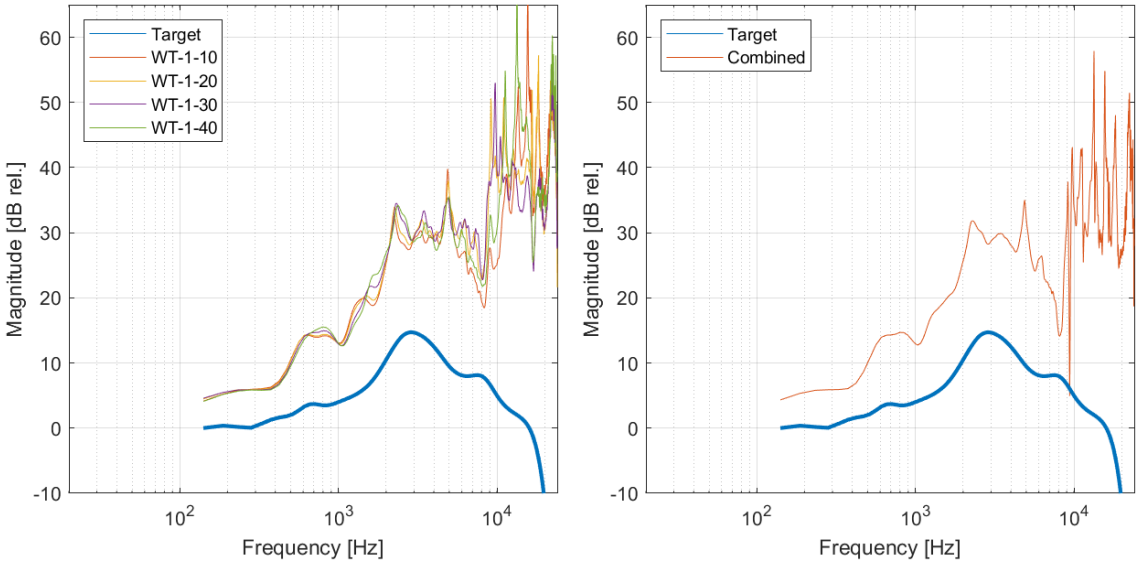
Figur 2.17: Overføringsfunktioner for WT 7 × 2 konfiguration, med alle syv højtalere ("WT-1-10", "WT-1-20", "WT-1-30", "WT-1-40", "WT-1-50", "WT-1-60" og "WT-1-70").

Tages der udgangspunkt i figur 2.17b kan det ses, at frekvensresponset for den samlede overføringsfunktion stemmer tilnærmelsesvis overens med diffus-feltsresponset op til cirka 8 kHz, omend forskudt. Tages der udgangspunkt i MSE, fås en værdi på 65,71. Der forsøges derfor at implementere en "forskydningsfaktor" på MSE-udregningen, hvor hver MSE udregnes med en fast værdi fratrukket samtlige punkter på frekvensresponset. Gøres dette fås den laveste MSE ved -7 dB, med en værdi på 17,27. Dette kan indikere, at den samlede overføringsfunktion stemmer overens med diffus-feltsresponset og en konfiguration med alle syv højtalere potentielt kan anbefales som løsning. På figur 2.18 kan det "forskudte" frekvensrespons for den samlede overføringsfunktion ses.



Figur 2.18: Samlede overføringsfunktion for WT 7 × 2 konfiguration, med alle syv højtalere ("WT-1-10", "WT-1-20", "WT-1-30", "WT-1-40", "WT-1-50", "WT-1-60" og "WT-1-70"), forskudt -7 dB.

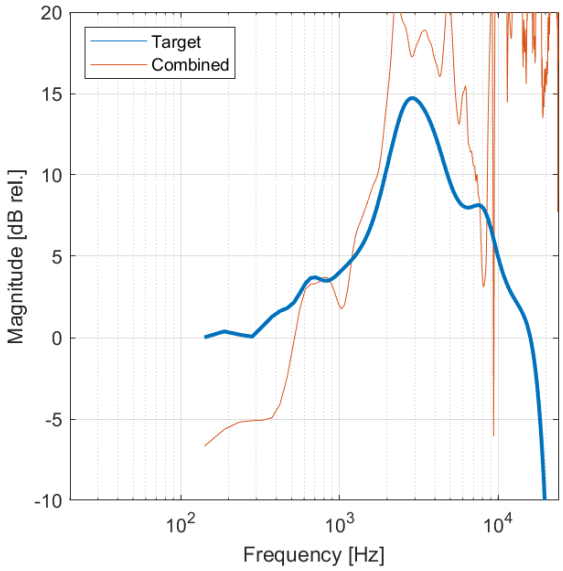
Som det kan ses på figur 2.17a, er der to grupperinger af frekvensrespons: "-10" - "-40" og "-50" - "-70". Der undersøges derfor om der er potentielle "forbedringer" ved at vælge én af disse to. Der testes først de fire øverste højtalerpositioner, hvis individuelle og samlede overføringsfunktioner kan ses på figur 2.19.



(a) Individuelle. (b) Samlet.

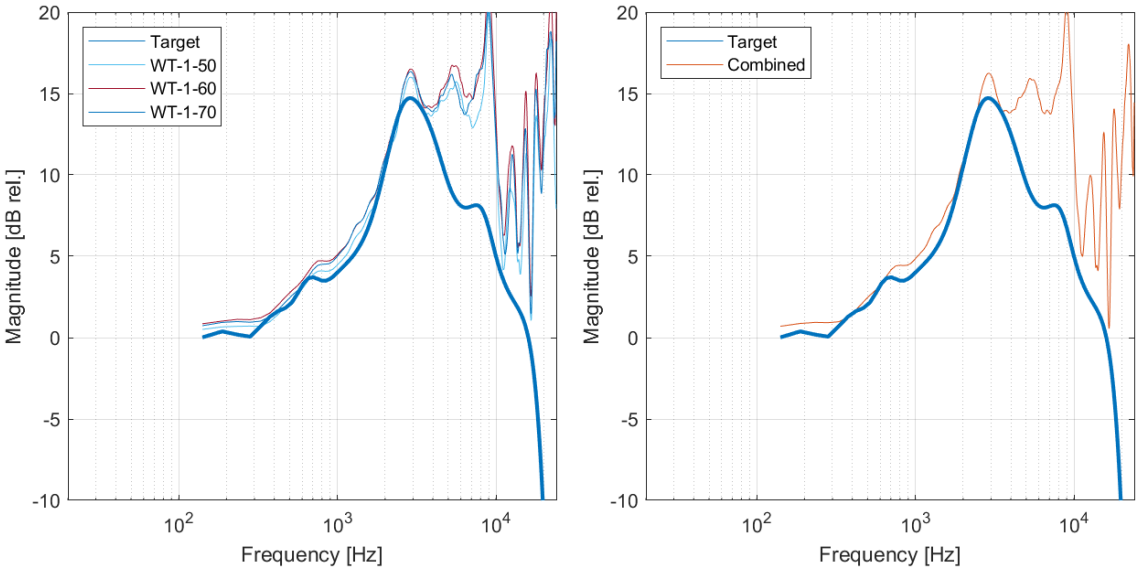
Figur 2.19: Overføringsfunktioner for WT 7 × 2 konfiguration, med første fire højtalere ("WT-1-10", "WT-1-20", "WT-1-30" og "WT-1-40").

Sammenlignes figur 2.19 med resultatet for alle syv højtalere (figur 2.17), virker det endnu engang til at der kan være en potentiel brugbar konfiguration, der er forskudt, da der er similariteter mellem overføringsfunktionen og diffus-feltsresponset. Til gengæld er MSE-værdien på 152,42. Ligesom for ved alle syv højtalere forskydes overføringsfunktionen og MSE-værdierne udregnes på ny. Overføringsfunktionen skal forskydes med -11 dB for at få den laveste MSE, der er 22,95. Der er derfor ingen indikationer for, at en konfiguration med de øverste fire højtalerpositioner skulle være bedre end alle syv højtalere. Den samlede overføringsfunktion for de fire øverste højtalere, forskudt med -11 dB kan ses på figur 2.20.



Figur 2.20: Samlede overføringsfunktion for WT 7 × 2 konfiguration, med fire øverste højtalere ("WT-1-10", "WT-1-20", "WT-1-30" og "WT-1-40"), forskudt -11 dB.

Bagefter udregnes overføringsfunktionen for de tre nederste højtalerpositioner, der kan ses på figur 2.21.



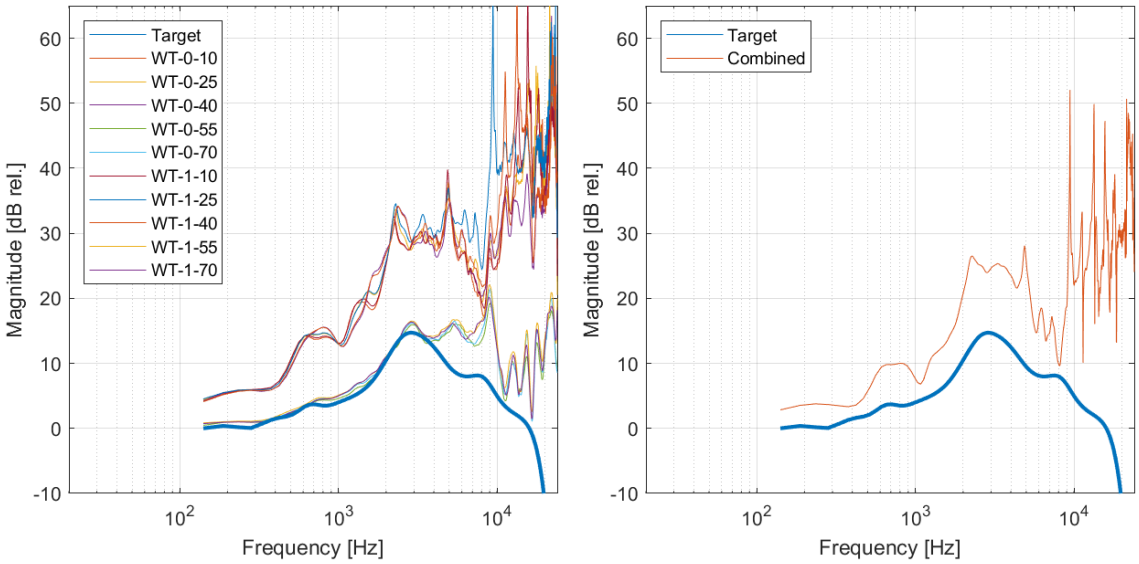
(a) Individuelle. (b) Samlet.

Figur 2.21: Overføringsfunktioner for WT 7 × 2 konfiguration, med tre nederste højtalere ("WT-1-50", "WT-1-60" og "WT-1-70").

Som det kan ses på figur 2.21b, er der op til cirka 3,5 kHz overensstemmelse mellem den samlede overføringsfunktion og diffus-feltsresponset, hvilket også indikeres af en MSE på 9,65. Der er dog en markant niveauforskel over 3,5 kHz, der med stor sandsynlighed vil kræve lavpasfiltrering af de individuelle signaler.

2.2.2 5 × 3 konfiguration

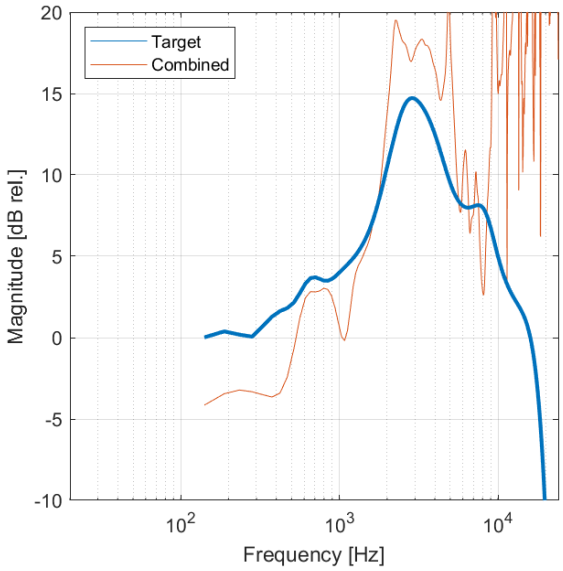
Til 5 × 3 konfigurationen benyttes både "WT-0" og "WT-1" positionerne med henholdsvis "-10", "-40" og "-70", samt de to approksimerede positioner "-25" og "-55", for samlet at bruge 10 højtalerpositioner. På figur 2.22 kan de individuelle og samlede overføringsfunktioner ses, samt diffus-feltsresponset som reference.



(a) Individuelle. (b) Samlet.

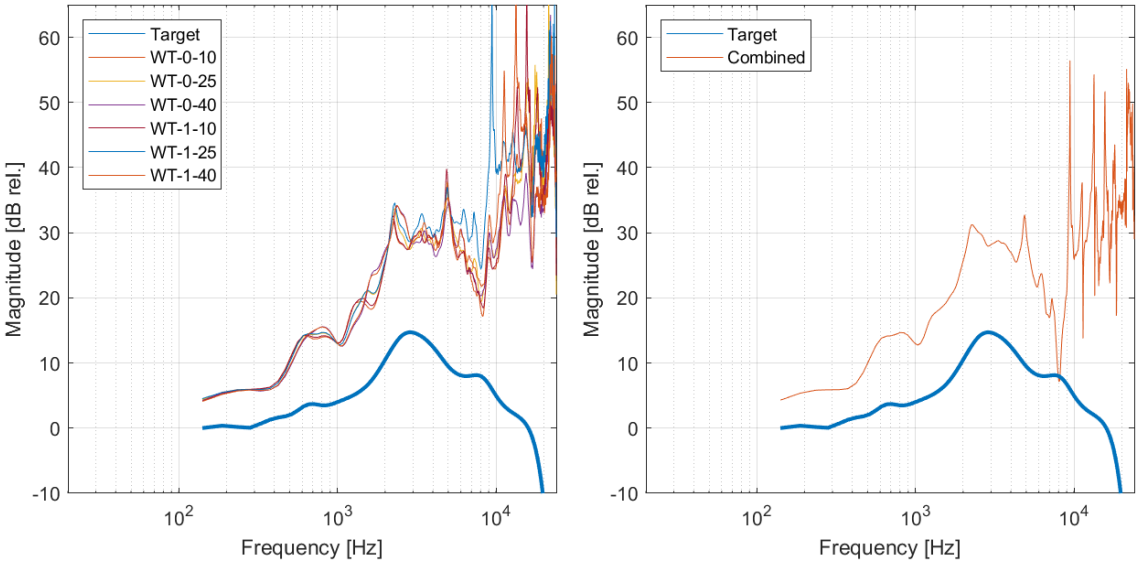
Figur 2.22: Overføringsfunktioner for WT 5 × 3 konfiguration, med alle 10 højtalere ("WT-0-10", "WT-0-25", "WT-0-40", "WT-0-55", "WT-0-70", "WT-1-10", "WT-1-25", "WT-1-40", "WT-1-55" og "WT-1-70").

Ligesom for 7 × 2 konfigurationen (kapitel 2.2.1), kan der på figur 2.22b ses en profil for den samlede overføringsfunktion, der minder om diffus-feltsresponset, men forskudt. Derfor forsøges der med en forskydningsfaktor til udregningen af MSE. Uden forskydningen fås en MSE på 71,22, og ved en forskydning på -7 dB, fås den laveste MSE på 12,8. Den forskudte overføringsfunktion kan ses på figur 2.23.



Figur 2.23: Samlede overføringsfunktion for WT 5 × 3 konfiguration, med alle 10 højtalere ("WT-0-10", "WT-0-25", "WT-0-40", "WT-0-55", "WT-0-70", "WT-1-10", "WT-1-25", "WT-1-40", "WT-1-55" og "WT-1-70"), forskudt -7 dB.

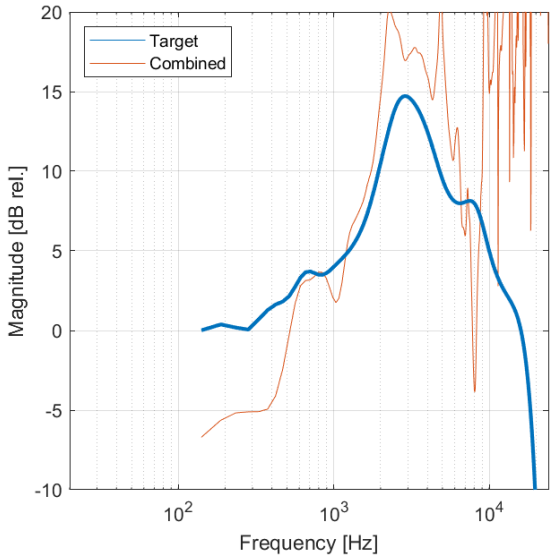
Ligesom for 7 × 2 konfigurationen, er der på figur 2.22a to tydelige grupperinger af de individuelle frekvensrespons, i dette tilfælde bestående af de tre øverste rækker ("--10", "-25" og "-40") og de to nederste rækker ("-55" og "-70"). Derfor undersøges disse grupperinger individuelt. På figur 2.24 kan overføringsfunktionerne for de tre øverste rækker ses.



(a) Individuelle. (b) Samlet.

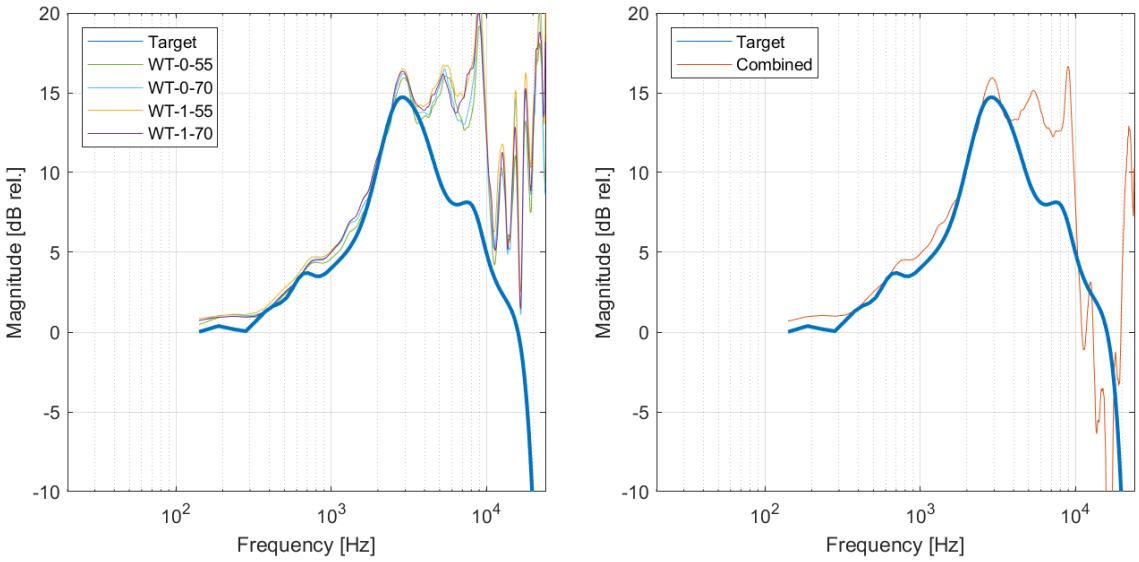
Figur 2.24: Overføringsfunktioner for WT 5 × 3 konfiguration, med tre øverste højtalerrækker ("WT-0-10", "WT-0-25", "WT-0-40", WT-1-10", "WT-1-25" og "WT-1-40").

MSE'en for den samlede overføringsfunktion på figur 2.24b er på 153,71. Benyttes forskydningsfaktoren, fås den laveste MSE ved -11 dB på 19,43. Den samlede overføringsfunktion forskudt for de tre øverste højtalerrækker kan ses på figur 2.25.



Figur 2.25: Samlede overføringsfunktion for WT 5 × 3 konfiguration, med tre øverste højtalerrækker ("WT-0-10", "WT-0-25", "WT-0-40", WT-1-10", "WT-1-25" og "WT-1-40"), forskudt -11 dB.

Overføringsfunktionerne for grupperingen bestående af de to nederste rækker ("-55" og "-70") kan ses på figur 2.26.



(a) Individuelle. (b) Samlet.

Figur 2.26: Overføringsfunktioner for WT 5 × 3 konfiguration, med to nederste højtalerrækker ("WT-0-55", "WT-0-70", "WT-1-55" og "WT-1-70").

Ligsom for de tre nederste højtalere i 7 × 2 konfigurationen (figur 2.21), kan der ses på figur 2.26b, at der op til cirka 4 kHz rimelig god overensstemmelse mellem den samlede overføringsfunktion og diffus-feltsresponset. MSE'en for overføringsfunktionen er 5,8.

Baseret på de to konfigurationsmuligheder, anbefales de to, bestående af de nederste højtalere ("WT-1-50", "WT-1-60" og "WT-1-70" for 7 × 2 konfigurationen, "WT-0-55", "WT-0-70", "WT-1-55" og "WT-1-70" for 5 × 3 konfigurationen).

2.3 Undersøgelse af orienteringsændring

På baggrund af kapitel 2.1 og 2.2 er der fundet 12 potentielle konfigurationer af højtalere, der kan ses i tabel 2.4, samt deres MSE.

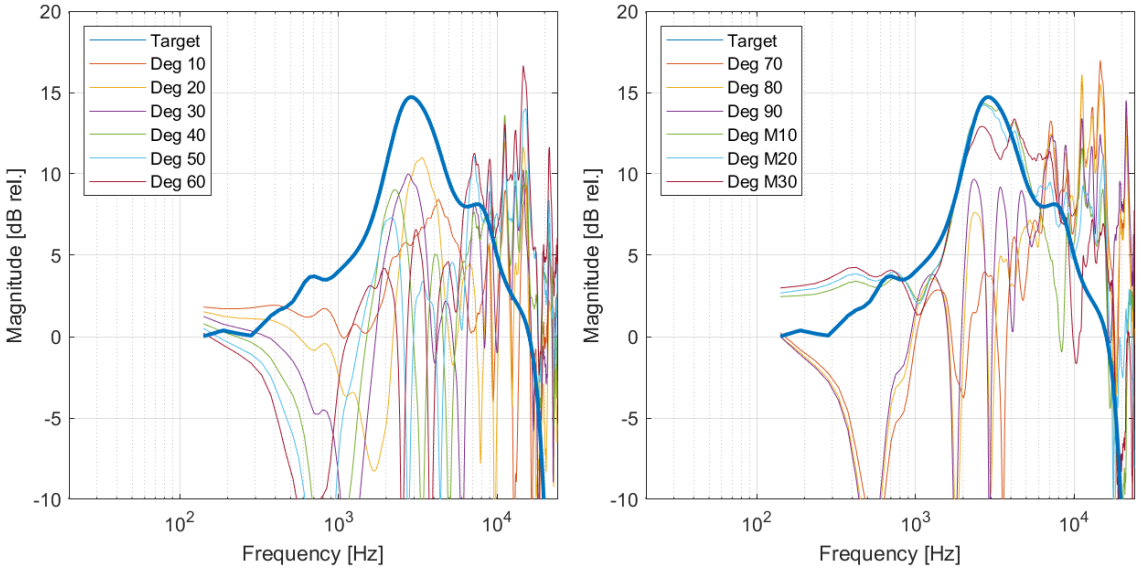
Konfig.	Højtalerposition				MSE
1	F-1-20	F-4-10	B-1-20	B-3-30	18,89 (11,93)
2	B-1-20	B-1-30	B-3-20	B-3-30	12,14 (4,6)
3	F-3-10	F-5-10	F-8-20	B-7-20	2,85
4	F-4-20	F-5-10	B-2-15	B-8-20	1,72
5	F-4-20	F-5-10	B-1-15	B-8-20	1,87
6	F-3-30	F-5-10	B-2-15	B-8-20	1,90
7	F-4-30	F-5-10	B-2-15	B-8-20	1,90
8	F-2-15	F-4-20	F-5-10	B-8-20	1,99
9	F-1-30	F-4-15	F-8-15	F-11-10	4,13
10	B-2-10	B-6-10	B-7-20	B-7-30	3,44
11	WT-1-50	WT-1-60	WT-1-70		9,65
12	WT-0-55	WT-0-70	WT-1-55	WT-1-70	5,8

Tabel 2.4: Højtalerplaceringskonfigurationer fra kapitel 2.1 og 2.2, samt deres MSE (i parentes hvis opgjort med færre 1/3 oktavsbånd). Nummereret efter første forekomst i rapporten.

Der er på nuværende tidpunkt kun undersøgt hvordan overføringsfunktionernes frekvensrespons ser ud med en hovedorientering på 0° (Deg 0). Det kan desværre ikke antages at spillerne under en kamp ikke drejer hovedet, så derfor er det nødvendigt at undersøge, hvor meget frekvensresponsene bliver påvirket ved forskellige orienteringer, og hvor meget de afviger fra diffus-feltsresponset.

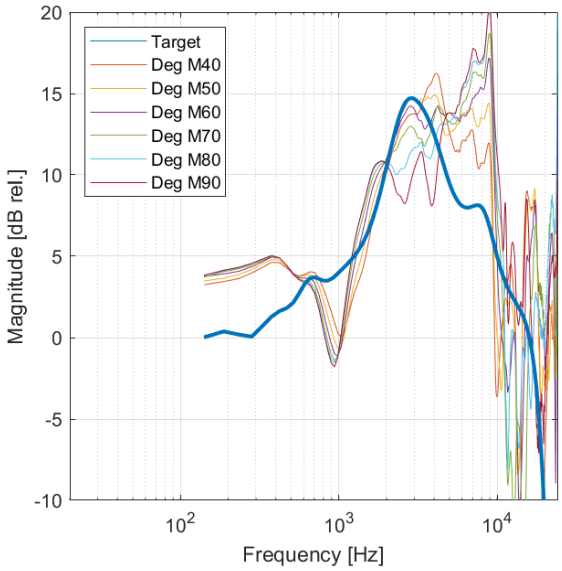
For hver af de 12 konfigurationer udregnes overføringsresponsene, ligesom i kapitel 2.1 og 2.2, for de resterende 18 orienteringer. Ligeledes udregnes der en MSE for hver orientering, samt et gennemsnit af disse, for at finde den konfiguration der er "mindst" følsom over for ændringer i orientering. De forskellige overføringsfunktioner kan ses på figur 2.27 - 2.37, og MSE-værdierne kan ses i tabel 2.5, 2.6 og 2.7.

Konfiguration 1



(a) Deg 10 - 60.

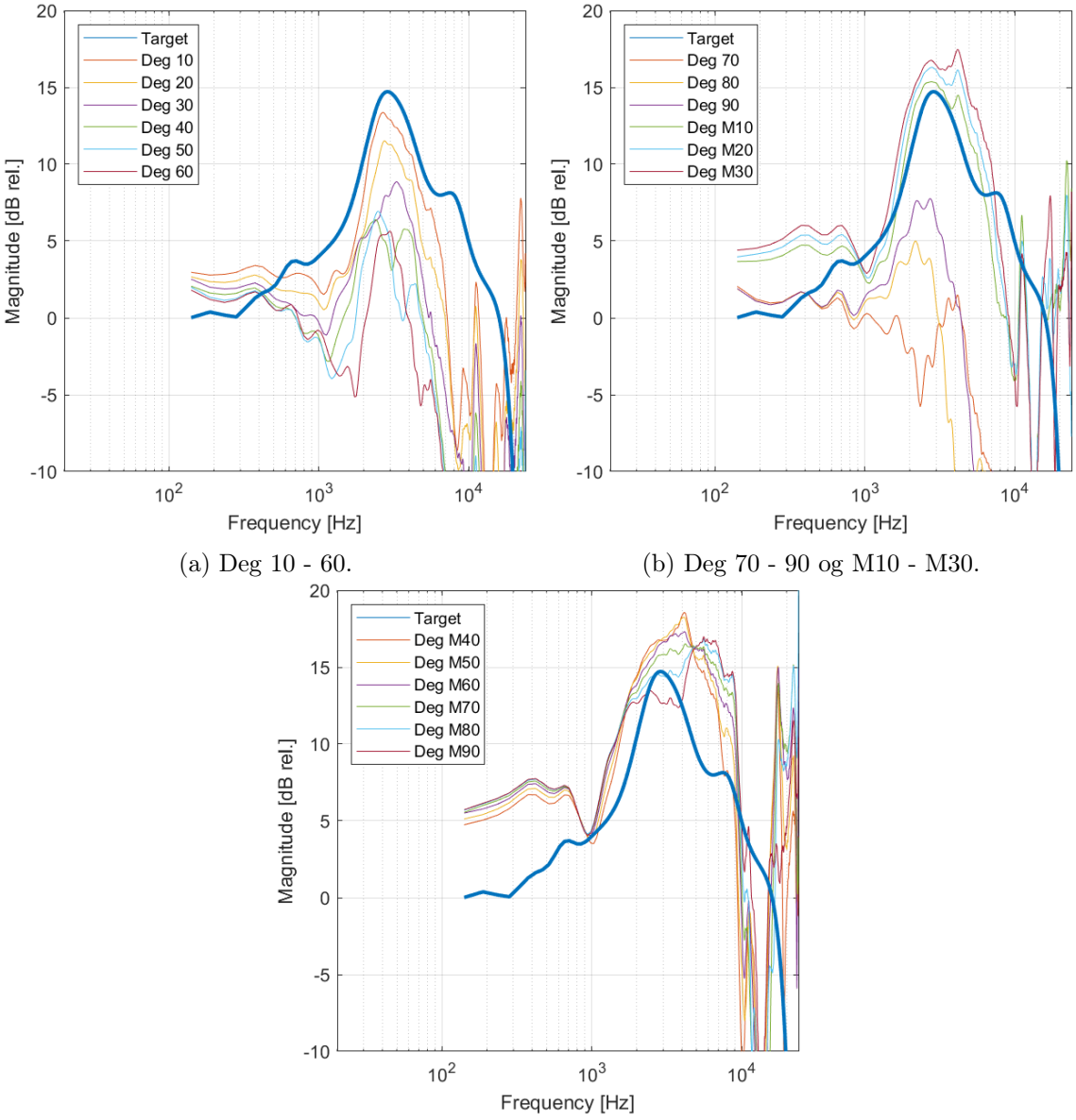
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.27: Overføringsfunktioner for konfiguration 1, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 2



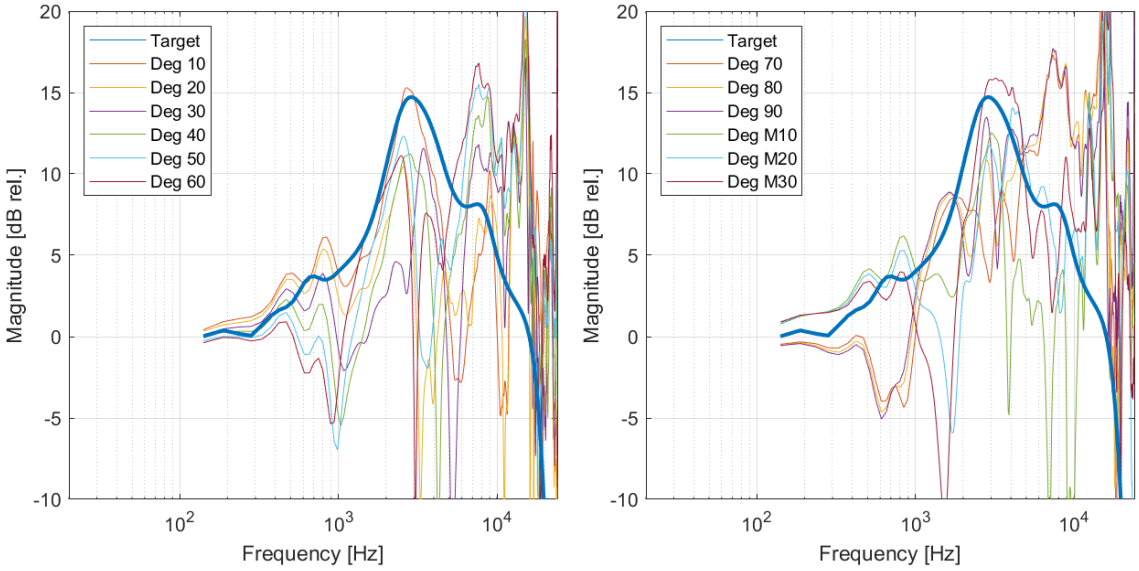
(a) Deg 10 - 60.

(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.

(c) Deg M40 - M90.

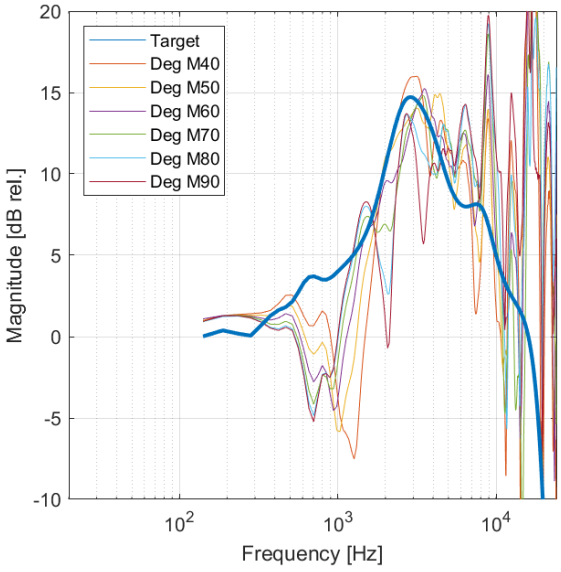
Figur 2.28: Overføringsfunktioner for konfiguration 2, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 3



(a) Deg 10 - 60.

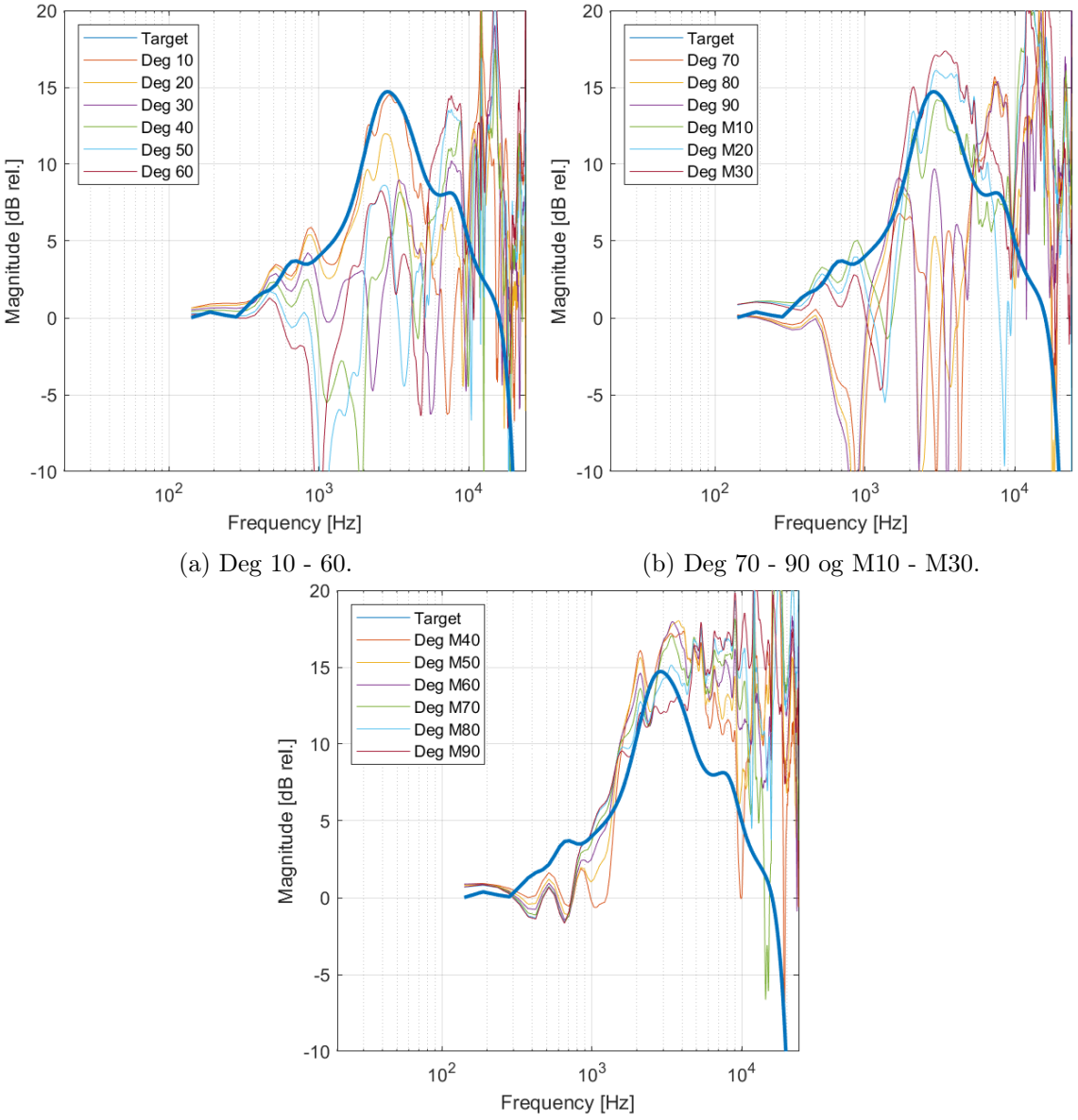
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.29: Overføringsfunktioner for konfiguration 3, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 4



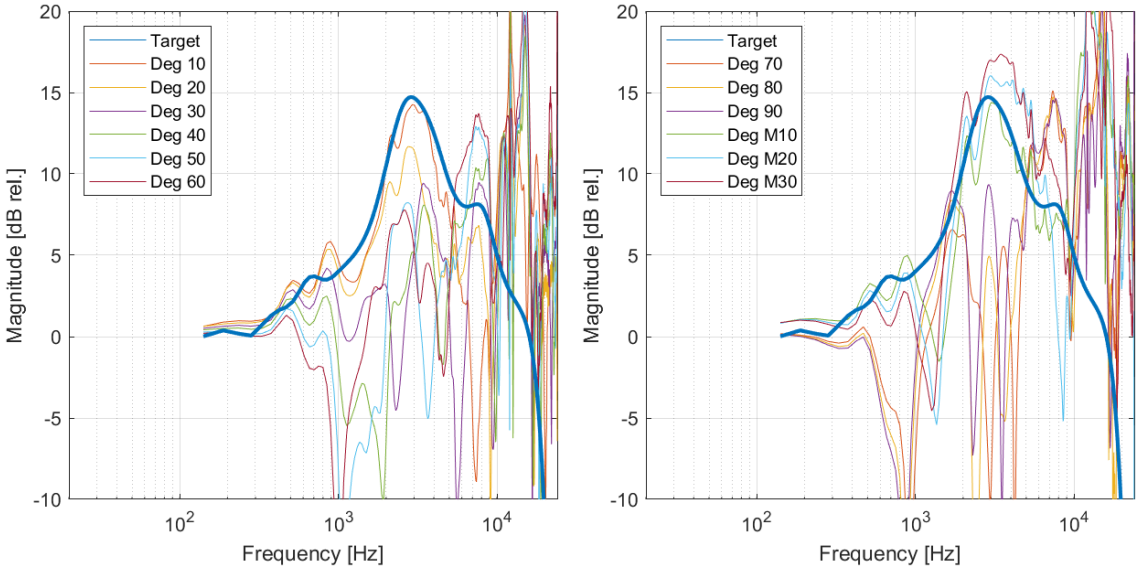
(a) Deg 10 - 60.

(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.

(c) Deg M40 - M90.

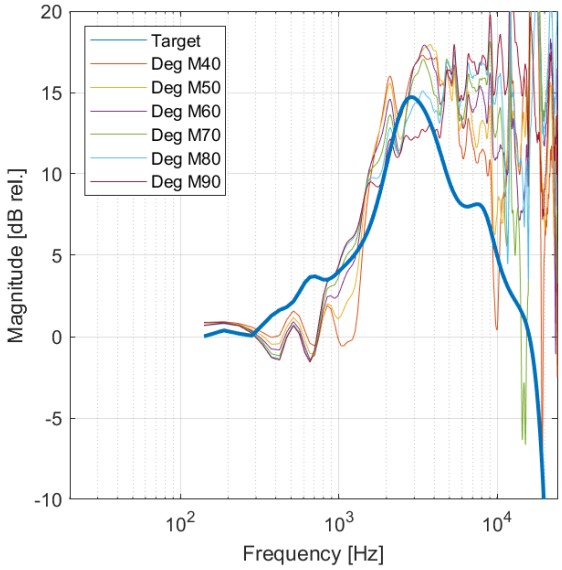
Figur 2.30: Overføringsfunktioner for konfiguration 4, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 5



(a) Deg 10 - 60.

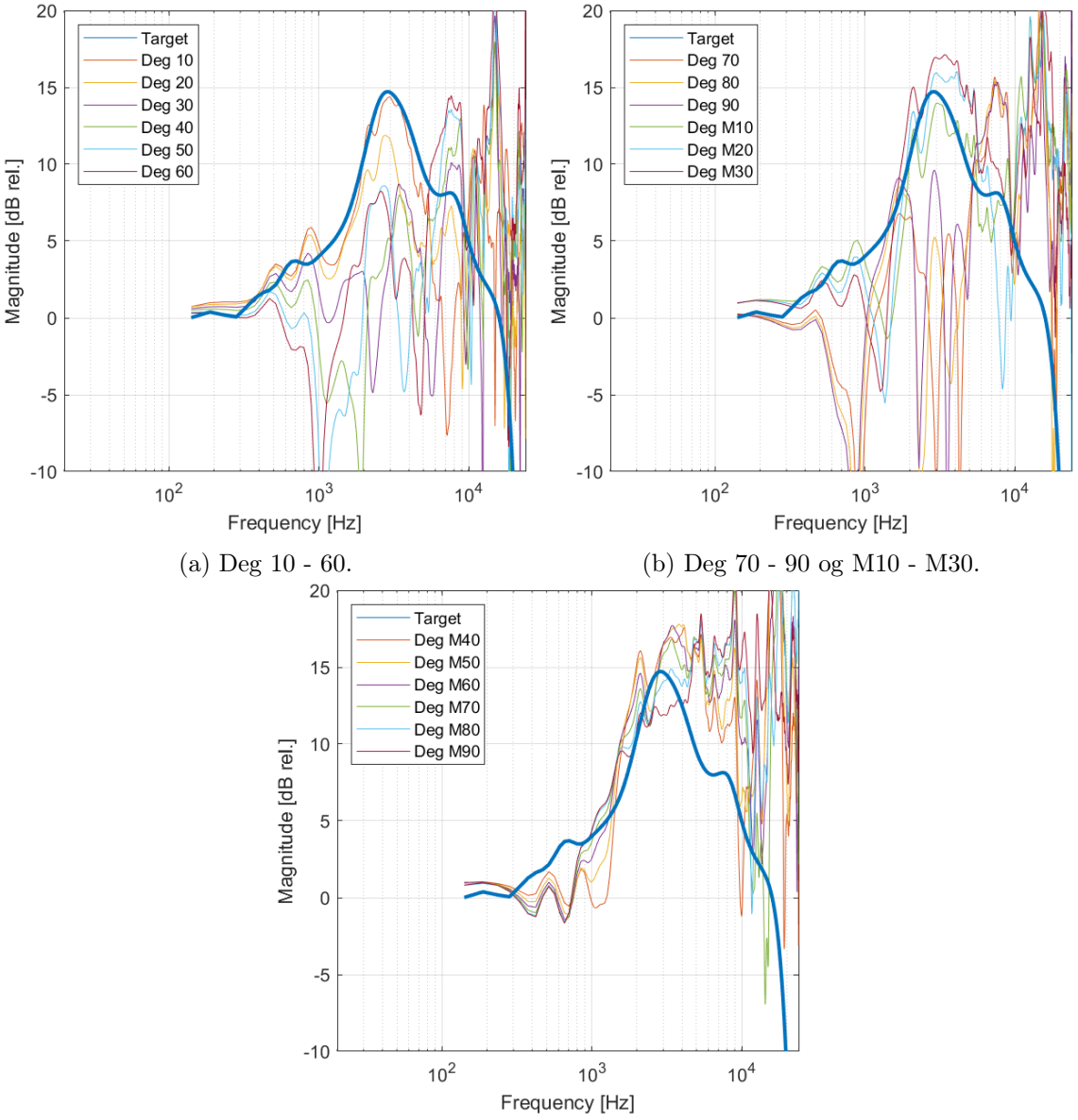
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.31: Overføringsfunktioner for konfiguration 5, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 6



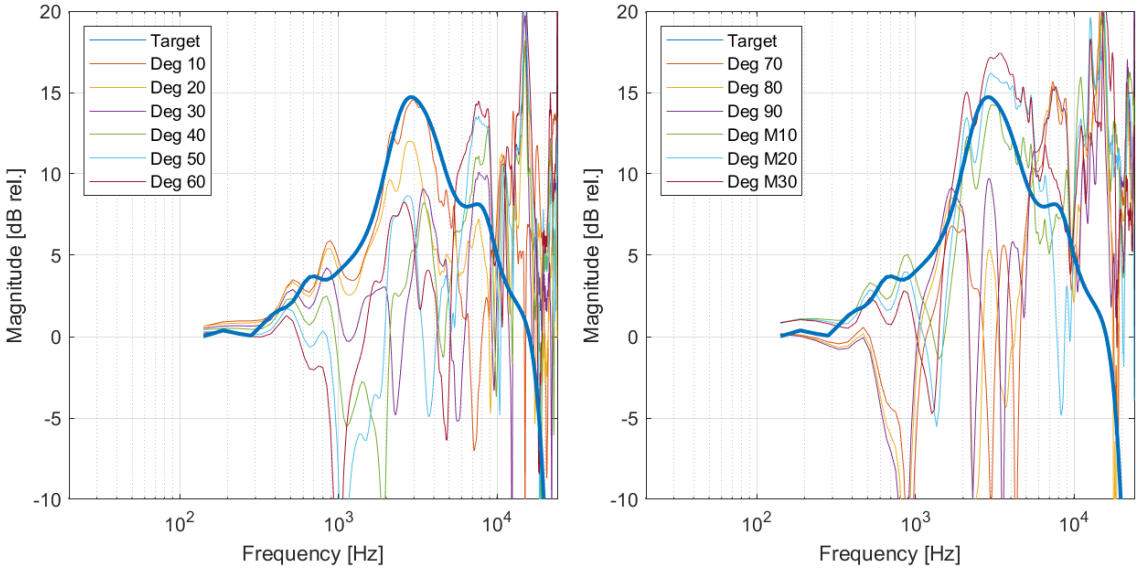
(a) Deg 10 - 60.

(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.

(c) Deg M40 - M90.

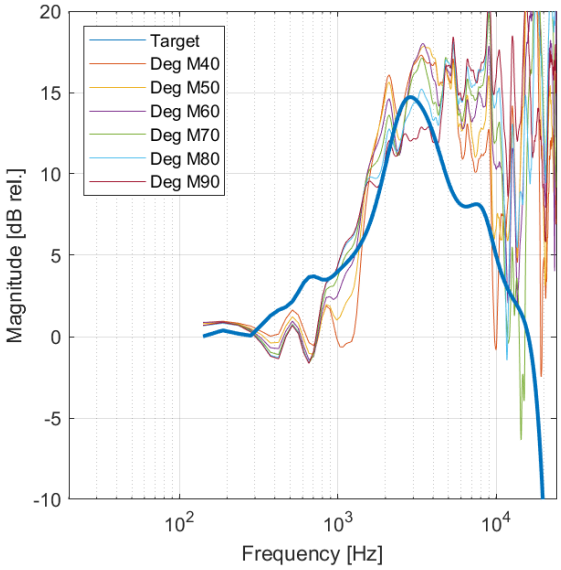
Figur 2.32: Overføringsfunktioner for konfiguration 6, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 7



(a) Deg 10 - 60.

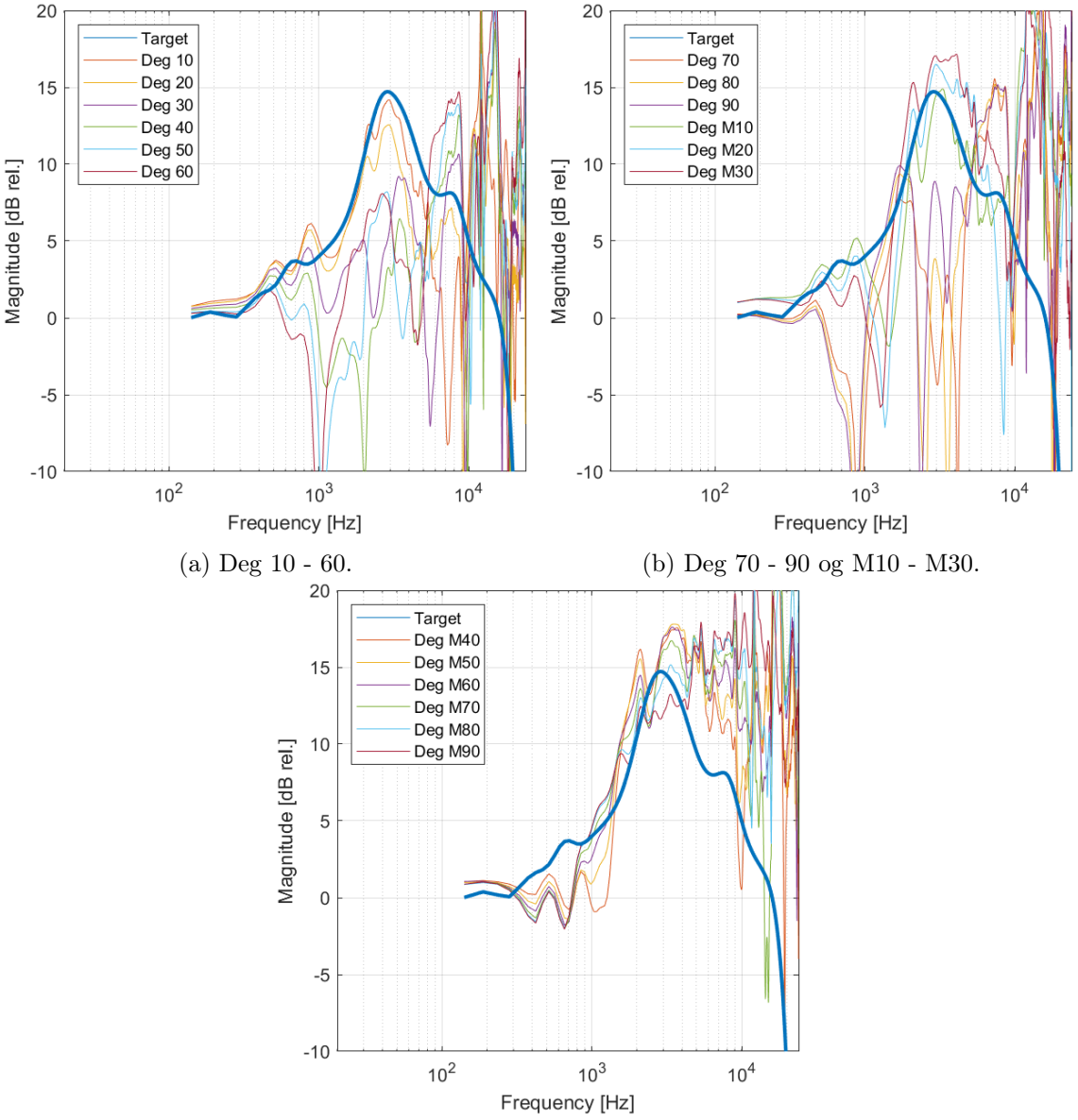
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.33: Overføringsfunktioner for konfiguration 7, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 8



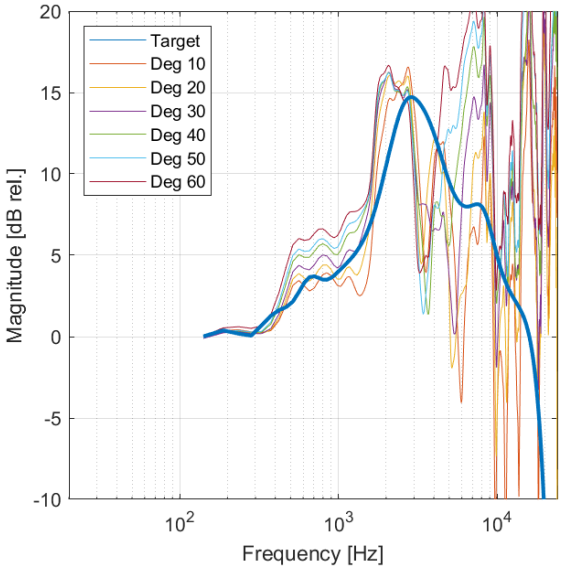
(a) Deg 10 - 60.

(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.

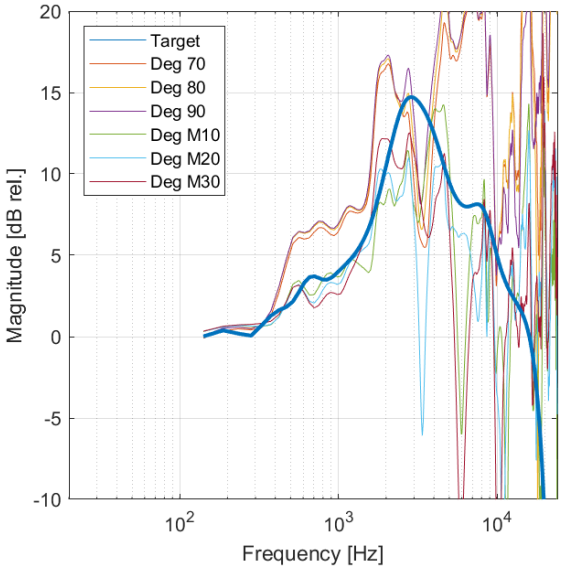
(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.34: Overføringsfunktioner for konfiguration 8, for forskellige hovedorientringer.

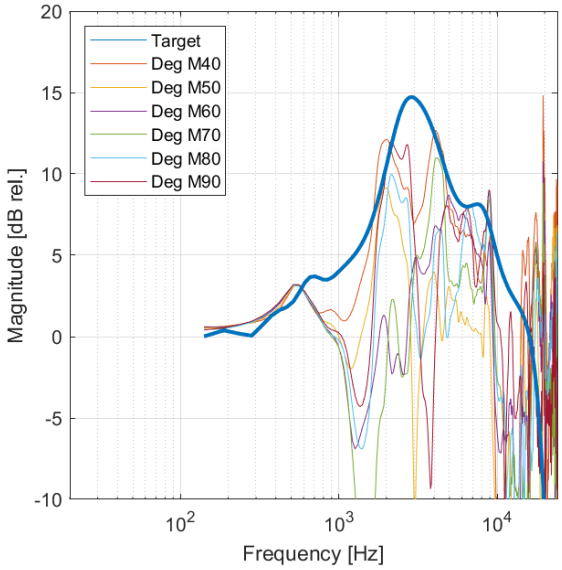
Konfiguration 9



(a) Deg 10 - 60.



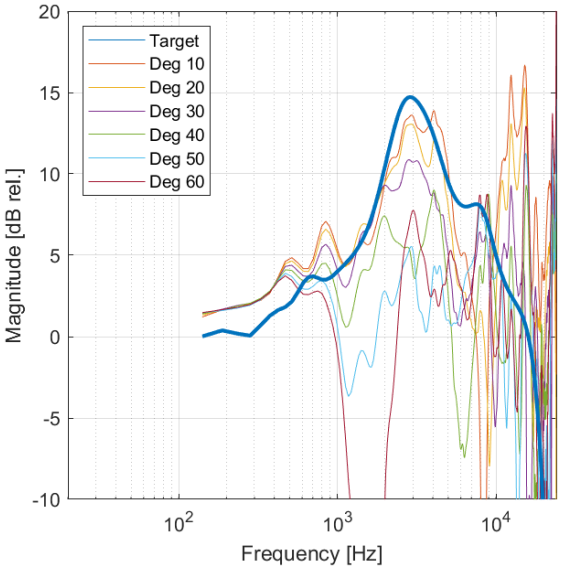
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



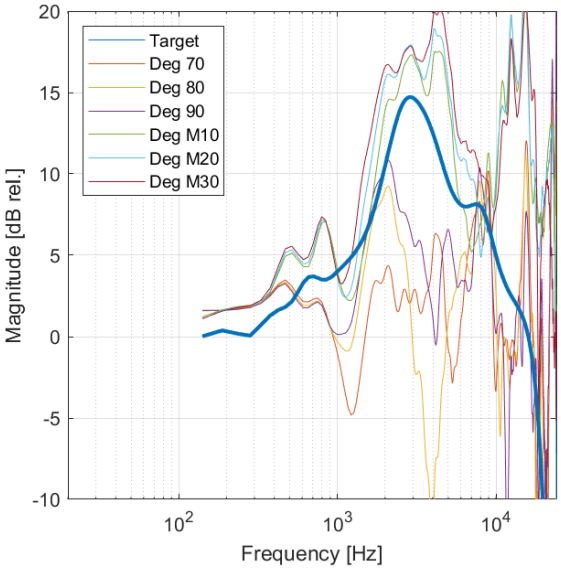
(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.35: Overføringsfunktioner for konfiguration 9, for forskellige hovedorientringer.

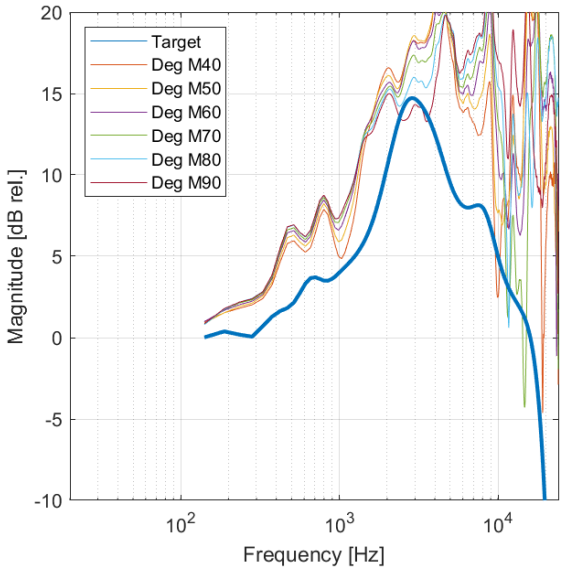
Konfiguration 10



(a) Deg 10 - 60.



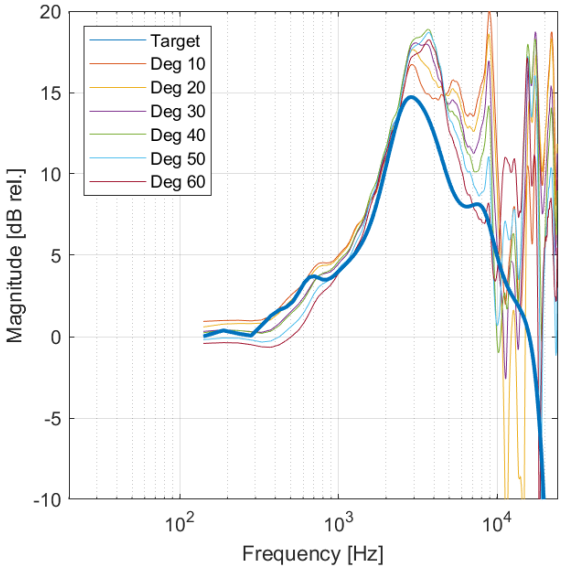
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



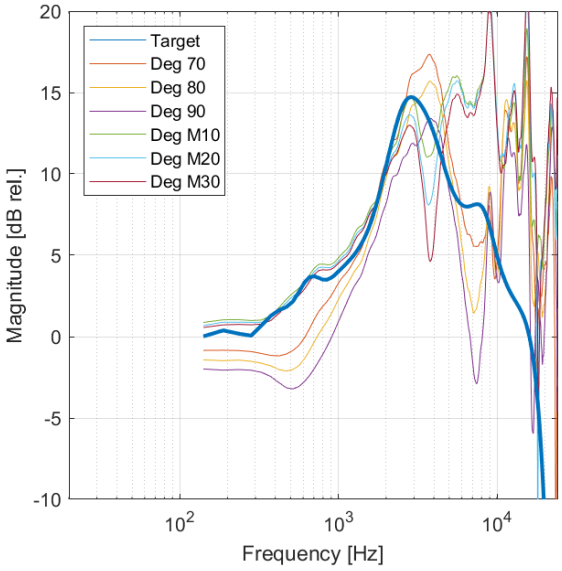
(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.36: Overføringsfunktioner for konfiguration 10, for forskellige hovedorientringer.

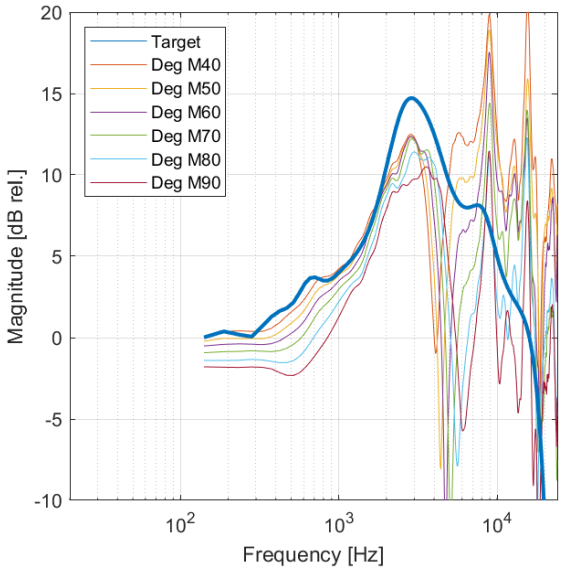
Konfiguration 11



(a) Deg 10 - 60.



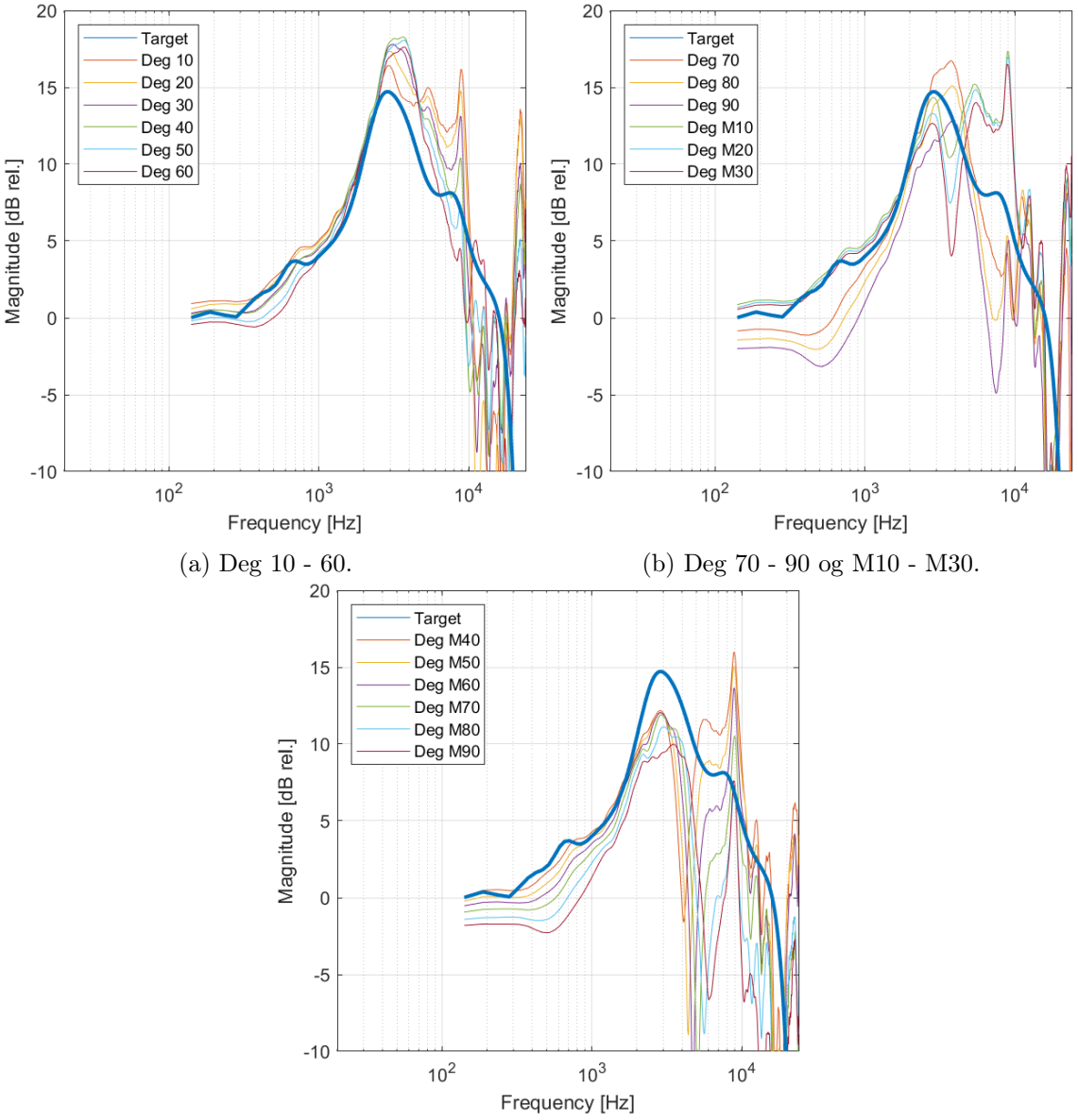
(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.



(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.37: Overføringsfunktioner for konfiguration 11, for forskellige hovedorientringer.

Konfiguration 12



(a) Deg 10 - 60.

(b) Deg 70 - 90 og M10 - M30.

(c) Deg M40 - M90.

Figur 2.38: Overføringsfunktioner for konfiguration 12, for forskellige hovedorientringer.

Konfig.	Deg 10	Deg 20	Deg 30	Deg 40	Deg 50	Deg 60
1	22,09	52,54	71,87	101,57	121,38	93,29
2	15,43	23,56	38,7	67,84	99,84	107,82
3	10,75	36,01	36,74	31,79	31,41	28,6
4	10,4	7,61	37,38	51,25	65,07	54,56
5	12,77	8,84	39,31	49,98	65,88	50,44
6	11,56	7,68	36,83	51,3	65,65	55,12
7	11,06	7,86	36,38	51,4	65,8	54,55
8	12,07	6,31	27,34	54,16	51,25	49,17
9	8,31	9,79	11,48	17,21	22,46	27,2
10	20,65	8,93	8,35	29,78	38,02	99,34
11	9,63	8,74	7,17	6,52	5,01	4,06
12	5,78	5,14	4,19	4,21	3,65	3,66

Tabel 2.5: De udvalgte højtalerkonfigurationers MSE for forskellige orientringer. Deg 10 - 60.

Konfig.	Deg 70	Deg 80	Deg 90	Deg M10	Deg M20	Deg M30
1	74,07	70,74	63,86	4,12	2,51	4,63
2	111,63	142,15	83,83	7,63	9,12	12,54
3	24,84	21,69	20,63	27,78	18,72	20,51
4	70,38	75,14	65,4	4,73	13,2	8,98
5	73,1	77,56	57,34	4,67	11,65	8,93
6	70,36	75,34	68,08	5	12,06	8,93
7	71,67	75,2	65,01	4,93	12,21	8,89
8	67,53	86,15	54,37	5,36	13,68	9,95
9	29,44	31,55	31,95	9,4	15,66	19,29
10	39,08	57,17	18,45	6,13	9,38	14,24
11	4	7,32	15,37	10,32	10,5	11,05
12	4,49	8,98	18,76	6,6	7,16	8,23

Tabel 2.6: De udvalgte højtalerkonfigurationers MSE for forskellige orientringer. Deg 70 - 90 og M10 - M30.

Konfig.	Deg M40	Deg M50	Deg M60	Deg M70	Deg M80	Deg M90	Gns.
1	7,47	9,93	12,66	15,11	18,04	20,91	41,35
2	16,82	19,6	21,55	22,84	24,02	24,54	45,35
3	14,8	11,36	10,66	12,18	15,24	19,38	20,84
4	10,32	11,24	11,99	12,83	13,55	14,52	28,43
5	10,24	11,14	11,95	12,78	13,52	14,48	28,23
6	10,58	11,54	12,28	13,19	13,96	14,98	28,75
7	10,48	11,45	12,26	13,18	13,92	14,92	28,58
8	10,85	11,59	12,26	13,1	13,87	14,88	27,15
9	6,59	42,9	44,55	69,68	34,45	33,74	24,72
10	21,03	24,76	27,09	28,65	29,62	29,44	27,03
11	12,37	15,14	16,34	17,68	19,05	20,88	11,09
12	10,66	14,75	17,29	20,09	22,51	24,38	10,33

Tabel 2.7: De udvalgte højtalerkonfigurationers MSE for forskellige orientringer. Deg M40 - M90, samt gennemsnit for alle orienteringer.

Ud fra de gennemsnitlige MSE-værdier, baseret på alle 19 orienteringer, der kan ses i tabel 2.7, har de to konfigurationer med de højeste MSE-værdier for 0°, konfiguration 1 og 2, også de højeste gennemsnit for samtlige konfigurationer, med henholdsvis 41,35 og 45,35. Derimod har de to konfigurationer, baseret på WT'en, de laveste, med henholdsvis 11,09 for den 7 × 2 baserede (konfig. 11) og 10,33 for den 5 × 3 baserede (konfig. 12).

Da der antages, at hovedet under en kamp primært vil være orienteret mellem ± 30°, udregnes de gennemsnitlige MSE for orienteringerne "Deg M30" - "Deg 30", der kan ses i tabel 2.8.

Konfig.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MSE	25,23	17,02	21,91	12	12,56	12	11,89	10,96	11,15	10,16	9,58	6,13

Tabel 2.8: De udvalgte højtalerkonfigurationers gennemsnitlige MSE for Deg M30 - 30.

Ligesom for de overordnede gennemsnitlige MSE, har de to WT-baserede konfigurationer de laveste MSE-værdier for de begrænsede orienteringer med henholdsvis 9,58 (konfig. 11) og 6,13 (konfig. 12). Baseret på disse resultater er disse to konfigurationer potentielt set de mest oplagte til det endelige produkt, med konfiguration 12 nok at foretrække blandt disse to. Det skal dog siges, at spillerne, der benytter produktet, kan instrueres i at orientere sig ligeud, når de kan høre, at der bliver talt til dem. Derfor kan konfiguration 4-8 anbefales i lige så høj en grad, hvis ikke mere, hvis der er større interesse i tydelig taleforståelse i en enkelt orientering, kontra samtlige mulige orienteringer. Ligeledes kan konfiguration 3, 9 og 10 også anbefales, men ikke nødvendigvis i lige så høj grad som de føromtalte konfigurationer. Konfiguration 1 og 2 kan ikke anbefales.

2.4 Beamforming

NB! Der vil i dette afsnit ikke komme en konkret beamformingsløsning til de forskellige højtalerkonfigurationer, men kun gennemgås nogle af de grundlæggende principper og tanker for en eventuel implementering i det endelige produkt.

I kapitel 2.1 og 2.2 er der undersøgt og fundet potentielle højtalerkonfigurationer, der i kapitel 2.3 er blevet undersøgt for ændringer i frekvensrespons ved forskellige hovedorienteringer. Ét område, der endnu ikke er blevet belyst, og har en potentiel vigtig betydning for det endelige produkt, er den "personlige" lyd.

Én potentiel løsning er at afspille al lyd ved et så "lavt" niveau, at det ikke er muligt for modstanderne at høre det. Der er ved denne løsning et større problem i, at spilleren, der bruger produktet, potentielt set ikke selv kan høre det. En anden løsning vil være at implementere et beamformingsystem, baseret på den valgte konfiguration.

Den grundlæggende ide bag beamforming er, hvordan et signal kan opnå maksimal signalstyrke ved i et givent fokuspunkt. Til dette er der flere forskellige løsninger. I denne sammenhæng vil der blive fokuseret på tre forskellige beamforming-metoder: Bartlett, Capon og MUSIC (MUltiple SIgnal Classification). Disse tre metoder har alle det til fælles, at de kan implementeres på en arbitrær sensorkonfiguration, i dette tilfælde højtalerkonfiguration, hvilket gør, at alle tre vil kunne implementeres på hver af de potentielle konfigurationer nævnt i kapitel 2.3 [21].

Alle tre beamforming-metoder baseres på signalmodellen

$$x(t) = a(\theta)s(t-\tau) + n(t) \tag{2.1}$$

hvor $x(t)$ er et givent transmitteret signal for en given højtaler, $a(\theta)$ er en styringsvektor for en given vinkel, $s(t-\tau)$ er det ønsket transmitterede signal med en given tidsforsinkelse og $n(t)$ er støj, antaget af Gaussisk fordeling [21].

Styringsvektoren er baseret på hvilken konfiguration højtalerne sidder i, da det er denne vektor, der skal benyttes til at få signalerne til at ramme det ønskede fokuspunkt. Der vil i denne sammenhæng blive valgt en "referencehøjtaler", der angiver hvilken retning, der sendes i. Dette kan enten være én af de allerede eksisterende højtalere, hvorved den vil få en værdi på 1, eller der "skabes" en højtaler, der ligger som et midtpunkt for højtalerne [21]. Styringsvektorens indgange for L højtalere udtrykkes ved

$$\boldsymbol{a}(\theta) = \begin{bmatrix} a_1(\theta) \\ a_2(\theta) \\ \vdots \\ a_L(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(\theta)\ \exp\{j\frac{2\pi}{\lambda}\bar{\boldsymbol{e}}(\theta)\boldsymbol{r}_1\} \\ g_2(\theta)\ \exp\{j\frac{2\pi}{\lambda}\bar{\boldsymbol{e}}(\theta)\boldsymbol{r}_2\} \\ \vdots \\ g_L(\theta)\ \exp\{j\frac{2\pi}{\lambda}\bar{\boldsymbol{e}}(\theta)\boldsymbol{r}_L\} \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

hvor $g(\theta)$ er direktiviteten for en given højtaler, λ er bølgelængden, $\bar{\boldsymbol{e}}(\theta)$ er den relative vinkelforskel for referencen og $\boldsymbol{r}$ er den relative afstand til referencen. Hvis en af de eksisterende højtalerne er valgt som reference, bliver $\boldsymbol{r} = 0$ og derfor kan udtrykket for den indgang reduceres til $g(\theta)$. Da det antages at den samme type højtaler bruges i alle positioner og at de har samme direktivitet, reduceres indgangen yderligere til 1 [21].

For alle tre beamforming-metoder benyttes spatiale covariansmatrix

$$\boldsymbol{R} = \mathbb{E}[\boldsymbol{x}(t)\boldsymbol{x}^{\mathrm{H}}(t)] \tag{2.3}$$

Forventningsværdien $\mathbb{E}$ kan oftes ikke udregnes da signalet ikke kendes på forhånd. Derfor benyttes et estimat i stedet

$$\widehat{\boldsymbol{R}} = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} \boldsymbol{x}_l(t)\boldsymbol{x}_l^{\mathrm{H}}(t) \tag{2.4}$$

Effekten af Bartlett-algoritmen kan udtrykkes som

$$\widehat{P}_B(\theta) = \frac{\boldsymbol{a}(\theta)^{\mathrm{H}}\widehat{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}(\theta)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.5}$$

Effekten af Capon-algoritmen kan udtrykkes som

$$\widehat{P}_C(\theta) = \frac{1}{\boldsymbol{a}(\theta)^{\mathrm{H}}\widehat{\boldsymbol{R}}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.6}$$

For at kunne benytte Capon-algoritmen, kræver det at $\widehat{\boldsymbol{R}}$ har fuld rank, hvilket vil sige at alle rækker skal være lineært uafhængige. Da der for systemet er som minimum seks højtalere og to ønskede fokuspunkter (højre og venstre øre), antages der, at det er muligt at opnå fuld rank [21].

Effekten af MUSIC-algoritmen kan udtrykkes som

$$\widehat{P}_C(\theta) = \frac{1}{\boldsymbol{a}(\theta)^{\mathrm{H}}\widehat{\boldsymbol{U}}_n\widehat{\boldsymbol{U}}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.7}$$

hvor $\boldsymbol{U}_n$ er en matrice af $L - M$ støjegenvektorer, hvor M er antallet af ønskede signaler, tilsvarende de to ønskede fokuspunkter for systemet, og som udregnes ved

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{U}_s\boldsymbol{\Lambda}_s\boldsymbol{U}_s^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{U}_n\boldsymbol{\Lambda}_n\boldsymbol{U}_n^{\mathrm{H}} \tag{2.8}$$

hvor $\boldsymbol{U}_s$ er en matrice af M signalegenvektorer, $\boldsymbol{\Lambda}_s$ er en diagonalmatrice af M signalegenværdier og $\boldsymbol{\Lambda}_n$ er en diagonalmatrice af $L - M$ støjegenværdier [21].

Af de tre beamforming-metoder har MUSIC den teoretiske bedste opløsning, efterfulgt af Capon og Bartlett henholdsvis. Problemet med både MUSIC og Capon, i forhold til Bartlett, er, at de begge er afhængige af at $\boldsymbol{R}$ kan inverteres. Endvidere, givet de potentielle hovedorienteringer for spilleren, er det ikke nødvendigvis ønskværdigt med en "for smal" opløsning, da der er risiko for at spilleren ikke vil kunne høre noget, hvis hovedet er orienteret "forkert". De relativt store main lobes for Bartlett kan derfor være en fordel, hvor der potentielt set kan laves en løsning med kun ét fokuspunkt centralt i hovedet og udnytte den "spektrale lækage" til at dække begge ører. Det kan dog ikke anbefales at vælge Bartlett på nuværende tidspunkt over de to andre metoder.

Et potentielt problem ved implementeringen af beamforming for nogle af positionerne, primært for dem på ryggen ("WT" og "B"-positioner), er direktiviteten af højtalerne. I de tilfælde vil fokuspunkterne potentielt set ligge i en "negativ" retning i forhold til højtalernes udbredelseskarakteristik, hvor der potentielt set ikke kan rettes en beam.

2.5 Delkonklussion

I dette kapitel er der blevet set på forskellige højtalerkonfiguratinoer, der er fundet ved forskellige metoder, blandt andet ved de individuelle positioners overføringsfunktioner og ved "brute force" at udregne overføringsfunktionerne for alle ikke-gentagende konfigurationer. Disse er alle blevet holdt op imod en diffus-feltsrespons som reference og MSE-værdierne har dannet grundlag til udvælgelse, både for 0° hovedorientering og for samtlige orienteringer. Til sidst er der set på nogle forskellige beamforming-metoder samt eventuelle overvejelser ved implementering af disse.

Afsluttende analyse 3

I dette kapitel vil de endelige resultater fra systemdesignet blive præsenteret og vil, sammen med resten af rapportens indhold, blive diskuteret. Til sidst vil der konkluderes på rapportens resultater.

3.1 Resultater

I tabel 3.1 kan de anbefalede højtalerkonfigurationer fra kapitel 2 ses. Konfigurationerne står i rækkefølge efter deres første forekomst i rapporten.

Konfig.	Højtalerposition			
1	F-3-10	F-5-10	F-8-20	B-7-20
2	F-4-20	F-5-10	B-2-15	B-8-20
3	F-4-20	F-5-10	B-1-15	B-8-20
4	F-3-30	F-5-10	B-2-15	B-8-20
5	F-4-30	F-5-10	B-2-15	B-8-20
6	F-2-15	F-4-20	F-5-10	B-8-20
7	F-1-30	F-4-15	F-8-15	F-11-10
8	B-2-10	B-6-10	B-7-20	B-7-30
9	WT-1-50	WT-1-60	WT-1-70	
10	WT-0-55	WT-0-70	WT-1-55	WT-1-70

Tabel 3.1: De anbefalede højtalerkonfigurationer fra kapitel 2. Nummereret efter første forekomst i rapporten.

3.2 Diskussion

Der er på baggrund af kapitel 2 fundet 10 forskellige konfigurationer, der potentielt kan benyttes i et endeligt produkt. Der vælges ikke at udpege én af dem som værende "bedre" end de andre, eller rangere dem på nogen måde, udover deres MSE. Dette er gjort af to primære årsager, hvor den ene relaterer sig til den anden. Den ene årsag er, at det ikke har været muligt at validere konfigurationerne med fysiske målinger. En måde hvorpå der kan laves den delvis validering af konfigurationerne vil være med simuleringer, hvilket frembringer den anden årsag.

Der er fra projektets start arbejdet ud fra, at en eventuel løsning vil kunne findes ud fra antaget symmetri i måleopstillingen. Ud fra dette er der kun målt på positioner på den ene halvdel af HATS'ens torso. Grundet denne symmetri-antagelse har det været overset, at for at disse antagelser kan holde, er det nødvendigt med respons for begge ører. Der er derfor fejlagtigt kun målt respons for det ene øre, i samme side som målingerne på torsoen har været. Dette betyder blandt andet, at det ikke er muligt at lave binaurale simuleringer af talesignaler, foldet med de respektive impulsrespons for konfigurationernes overføringsfunktioner. Det betyder også, at de anbefalede konfigurationer potentielt set har en frekvensrespons på det andet øre, der gør konfigurationerne uegnede. Da der først er blevet gjort opmærksom på denne forglemmelse relativt sent i forløbet af rapporten, har det ikke har været muligt at udføre de manglende målinger, og det har været nødvendigt at færdiggøre resultaterne, baseret på det eksisterende datagrundlag. Derfor anbefales det også at tage de opnåede resultater med et gran salt inden de benyttes i et endeligt produkt og udføre eventuelle egne målinger eller personforsøg med konfigurationerne.

Vokalo har i løbet af projektets forløb valgt en højtalerenhed, der med stor sandsynlighed benyttes i et endeligt produkt. Denne enhed (Ole Wolff OWS-111535TA) har de ydre dimensioner af 15 × 11 mm. Disse dimensioner passer ikke specielt godt overens med de positioner, der er målt på. Dette har blandt andet betydet, at i forhold til konfigurationerne på vesten har det været nødvendigt med forskellige antagelser, for at sikre at højtalerne kan placeres uden de overlapper. I én af de antagelser, *"Der skal være minimum 10* mm *mellem to højtalere, hvis de er i samme række"* har det været nødvendigt at se bort for overlappet, for at kunne sikre så mange potentielle konfigurationer som muligt. Der vil potentielt være en fejl i forhold til de udregnede overføringsfunktioner ved de positioner, idet det vil være nødvendigt at forskyde højtalerne. Denne potentielle fejl forventes potentielt at være større for konfigurationerne på WT'en, især for 7 × 2 konfigurationen, idet de "yderste" positioner har en signifikant forskydelse (se figur 2.16a), ligesom det antages på figuren, at hvis højtalerne er placeret bredde mod bredde uden mellemrum, vil højtaleren være forskudt med op til 3 × 2,5 mm fra centrum. Dette kan dog afhjælpes, hvis der tages udgangspunkt i den anbefalede konfiguration, bestående af de tre "nederste" højtalere ("-50", "-60" og "-70") og med et mellemrum mellem enderne på højtalerne, hvorved "-50" og "-70" "kun" behøves at forskydes med 1 mm. Var den valgte højtaler kendt før målingerne, ville der være valgt målepunkter efter dette, der ville reducere eventuelt overlap, ligesom der med stor sandsynlighed ville være målt med højtaleren i stedet for.

I henhold til målingerne er der ikke taget hensyn til frekensresponsene for højtalerne eller mikrofonerne. I henhold til mikrofonen i HATS'en er HATS'en designet til at eftergive ørets respons, hvilket er ønskværdigt. I henhold til mikrofonen på vesten og højtalerne, er der antaget at de har et fladt frekvensrespons, hvilket ikke nødvendigvis er realistisk. Her heftes der ved, at ved lignende målinger, for eksempel HRTF-målinger og blokkeret ørekanalsmålinger, har dette udstyr været brugt og derfor er der valgt at benytte dette. Der vides dog ikke om hvorvidt der har været benyttes nogen form for korrektion i sammenhæng med disse målinger, for at opveje for eventuelle variationer i deres frekvensrespons.

Der har i sammenhæng med målingerne været brugt tre højtalere. Dette er gjort for hurtigere at kunne gennemføre målingerne. Da deres frekvensrespons har været antaget fladt, kan eventuelle forskelle i deres respons give variationer i de forskellige overføringsfunktioner. Det vil derfor potentielt set være mere korrekt kun at benytte én højtaler, så eventuelle "fejl" vil være de samme for hver måling. Det skal dog påpeges, at målingerne baseret på hver højtaler er blevet divideret med en måling baseret på samme højtaler, altså er ingen måling fra, for eksempel front, blevet divideret med en måling fra siden eller bag. Derfor antages det at eventuelle forskelle i de individuelle højtalere bliver udlignet.

I forhold til undersøgelsen af højtalerkonfigurationer, er der ikke taget hensyn til den valgte højtalers frekvensrespons eller udbredelseskarakteristik. Dette er ikke gjort, selvom frekvensresponset har været tilgængelig i tilsendt dokumentation. Der er valgt ikke at gøre dette, for at gøre resultaterne så generelle som muligt, men vil kunne implementeres ved manuelt at aflæse værdierne ved de forskellige frekvenser, potentielt ved hvert 1/3 oktavbånd som for diffus-feltsresponset, interpolere og addere det til de individuelle frekvensrespons for de samlede overføingsfunktioner, ud fra superpositionsprincippet. Der er også blevet tilbudt Thiele-Small parametre til simuleringer, men da det ikke har været muligt at lave dem, har det ikke været relevant. I den tilsendte dokumentation står der ikke noget om højtalernes udbredelseskarakteristik, så denne har det ikke været muligt at benytte i overvejelserne. Det er dog antaget, grundet højtalernes form, at udbredelsen set ovenfra ikke er cirkulær men nærmere elliptisk, hvilket har dannet grundlag for den foreslåede montering af højtalere på vesten (længde langs kraven), idet det potentielt vil hjælpe i en eventuel beamforming implementation.

3.3 Konklusion

Baseret på problemformuleringen: *"Kan der, på bagrund af øverføringsfunktioner for forskellige højtalerpositioner, laves et kommunikationssystem til brug i træningssituationer, der giver forståelig og personlig lyd?"* er der fundet 10 potentielle højtalerkonfigurationer, der kan ses i tabel 3.1. Der vælges ikke at anbefale en af disse over de andre, da det ikke har været muligt at validere resultaterne i tilfredsstillende grad.

Appendiks A

A.1 Målerapport: Referencens position

Denne målerapport er udført af gruppe 1077 den 22-03-2022 i anekoisk kammer, lokale B4-111 på Frederik Bajers Vej 7B.

Formål

Formålet med denne målerapport er at kunne undersøge, hvorvidt den indfaldne vinkel for referencelydkilden har indflydelse på overføringsfunktionerne, baseret på målinger på skulderen af en Head and Torso Simulator (HATS) og øret af HATS'en.

Testobjekt

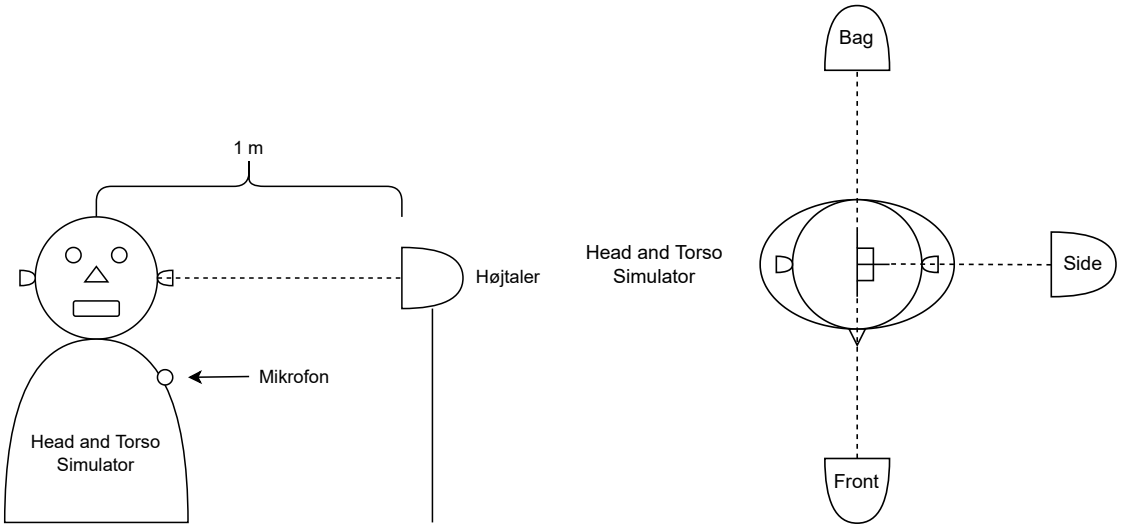
Der testes på en Head and Torso Simulator, hvorpå en mikrofon monteres på skulderen.

Anvendt udstyr

Antal	Komponent	Type	AAU nr.
1	Lydkort	RME Fireface UFX+	108204
2	Forstærker	Pioneer A-616	AUC 08249 AUC 08341
1	Mikrofon	Sennheiser KE4-211	N/A
1	Head and Torso Simulator	Brüel & Kjær 4128	08453
1	Lydniveauskalibrator	Brüel & Kjær 4230	08373
1	Spænningsforsyning	Brüel & Kjær 2804	06998
3	Højtaler	Vifa MD10	2017-21 2017-22 2017-24
1	Sportsvest	N/A	N/A

Måleopstilling

Måleopstillingen opstilles som illustreret på figur A.1a. Højtalerplaceringer kan ses på figur A.1b.



(a) Måleopstilling. (b) Højtalerpositioner.

Figur A.1: Illustrationer af måleopstilling.

Måleprocedure

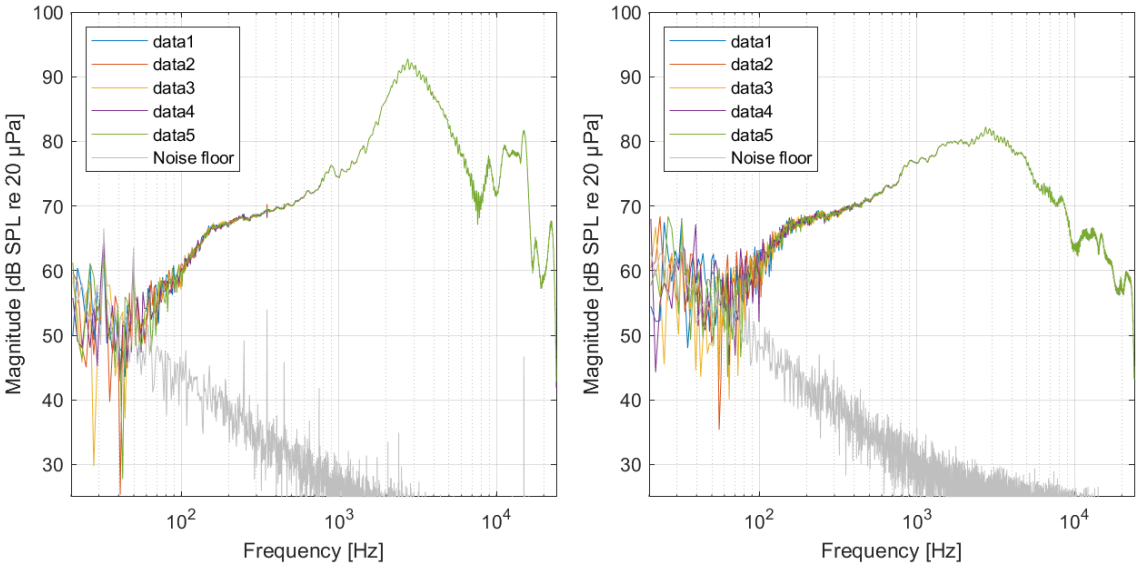
Vesten trækkes ned over torsoen på HATS'en og HATS'ens mikrofon kobles til lydkortet gennem spændingsforsyningen. Lydniveauskalibratoren sættes i øret på HATS'en og en referenceværdi findes til konvertering mellem digital værdi og dB SPL. Mikrofonen placeres på skuldersyningen, 10 mm fra den indvendige kantforstærkning, og forbindes til lydkortet. Lydniveauskalibratoren bruges ligeledes til at finde en referenceværdi til konvertering mellem digital værdi og dB SPL for mikrofonen.

Højtalerne placeres i samme højde som midten af øret på HATS'en, i en afstand af 1 m fra midten af HATS'ens hoved og i en orientering af 0°, set fra HATS'ens perspektiv (front), 90° (side) og 180° (bag). Højtalerne forbindes til lydkortet og en 1 kHz sinustone afspilles. Lydniveauerne justeres til en værdi, tilsvarende 75 dB SPL måles i HATSe'ns mikrofon.

I MATLAB åbnes applikationen "Impulse Response Measurer" og der udføres fem MLS impulsresponsmålinger for henholdsvis HATS'ens mikrofon og for mikrofonen på vesten fra fronthøjtaleren. Sidehøjtaleren vælges og fem målinger laves for henholdsvis HATS mikrofonen og vest-mikrofonen. Dette gentages for højtaleren bag.

Resultater

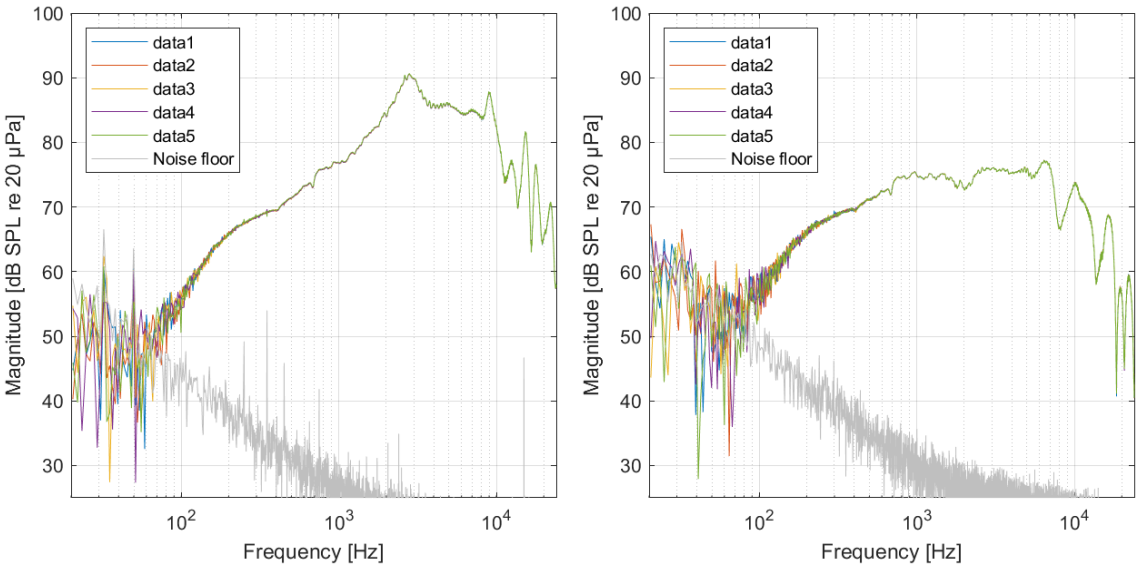
Front-højtaler



(a) HATS. (b) Mikrofon.

Figur A.2: Frekvensrespons fra front-højtaler.

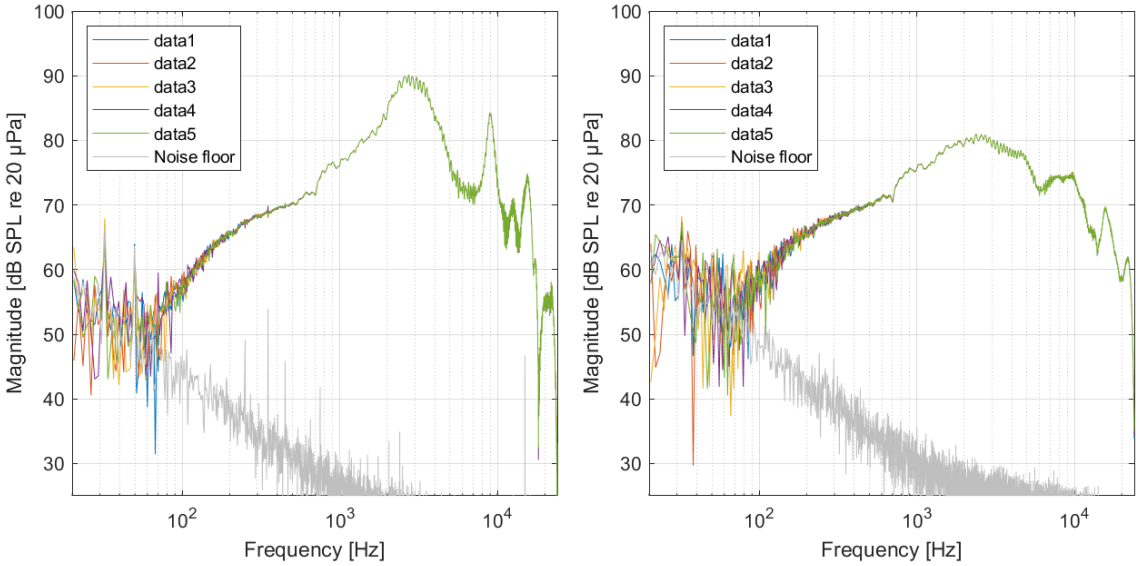
Side-højtaler



(a) HATS. (b) Mikrofon.

Figur A.3: Frekvensrespons fra side-højtaler.

Bag-højtaler



(a) HATS. (b) Mikrofon.

Figur A.4: Frekvensrespons fra bag-højtaler.

Måleusikkerhed

Der er kalibreret før målingerne er taget, hvor en reference mellem de 94 dB SPL fra kalibratoren og MATLABs interne lydniveausmåler på -16 dB SPL. Der er ikke blevet målt efterfølgende om kalibreringen stadigvæk stemmer overens med det målte niveau efter justeringen, ej heller er der testet om kalibreringen passer efter målingerne.

For at kunne placere HATS'en stabilt på en af platformene i det anekoiske kammer, er HATS'en placeret på et stativ. Det har ikke været muligt at låse HATS'ens rotation i forhold til beslaget, så efter opstilling har HATS'ens orientering været tjekket ved øjemål. Ligeledes er højtalerne placeret på et stativ for at være i samme højde som øret på HATS'en. Der har ikke været brugt en vinkelmåler for at tjekke om hvor vidt højtalerne har stået i korrekt orientering i forhold til HATS'en. Til gengæld har der ikke været flyttet på stativerne under målingerne så eventuel fejl i højtalerposition er den samme for hver måling.

Der er forsøgt isoleret eventuelle forbindelser mellem kabler og forsyninger inde i det anekoiske kammer for at undgå jord og reducere egenstøj. Ligeledes er beslagene, HATS'en er monteret på, forsøgt dæmpet med vat for at undgå fejlbidrag.

A.2 Målerapport: Hovedets orientering

Denne målerapport er udført af gruppe 1077 den 22-03-2022 i anekoisk kammer, lokale B4-111 på Frederik Bajers Vej 7B.

Formål

Formålet med denne målerapport er at undersøge og måle de resulterende frekvensrespons på baggrund af hovedets orientering i forhold til torsoen på en HATS.

Testobjekt

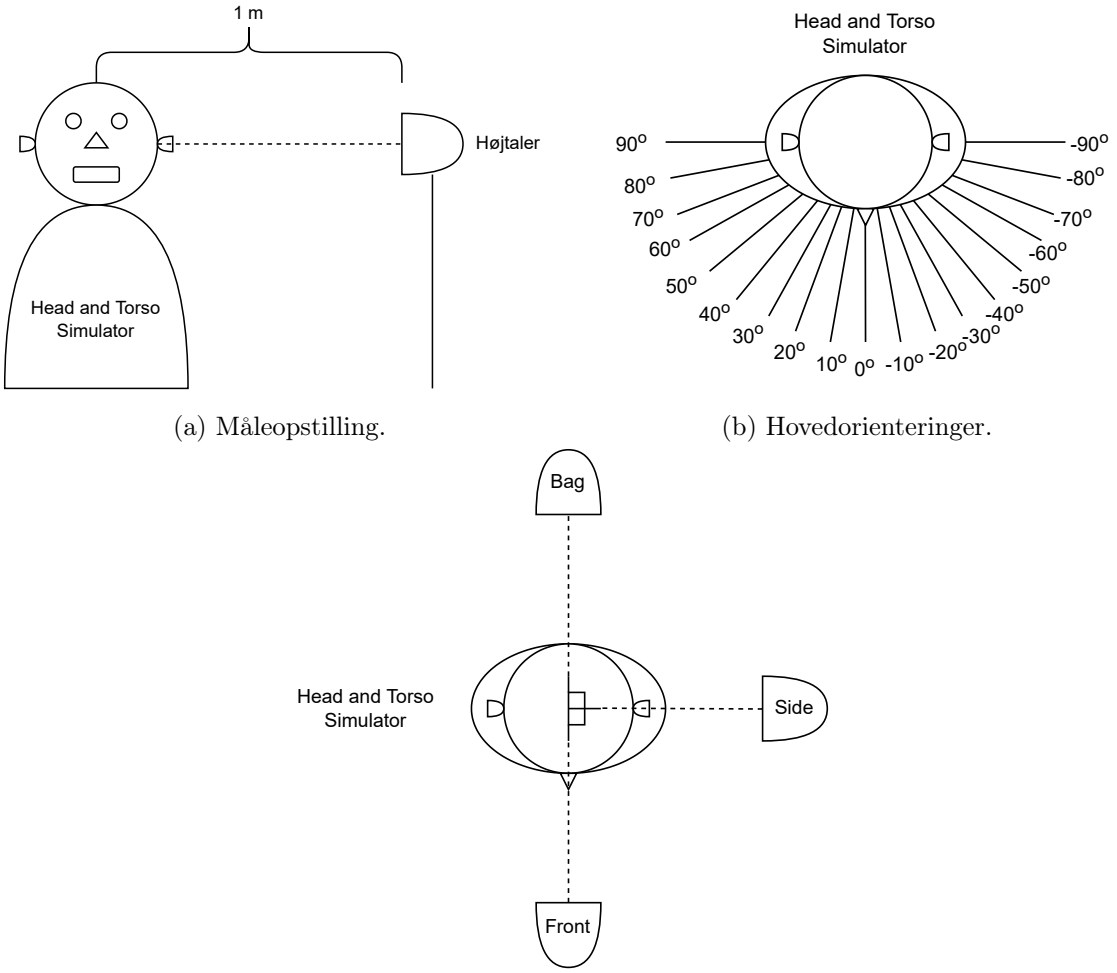
Der testes på en Head and Torso Simulator, der kan dreje hovedet.

Anvendt udstyr

Antal	Komponent	Type	AAU nr.
1	Lydkort	RME Fireface UFX+	108204
2	Forstærker	Pioneer A-616	AUC 08249 AUC 08341
1	Head and Torso Simulator	Brüel & Kjær 4128	08453
1	Lydniveauskalibrator	Brüel & Kjær 4230	08373
1	Spænningsforsyning	Brüel & Kjær 2804	06998
3	Højtaler	Vifa MD10	2017-21 2017-22 2017-24

Måleopstilling

Måleopstillingen opstilles som illustreret på figur A.5a. Hovedorienteringer kan ses på figur A.5b.



(a) Måleopstilling.

(b) Hovedorienteringer.

(c) Højtalerpositioner.

Figur A.5: Illustrationer af måleopstilling.

Måleprocedure

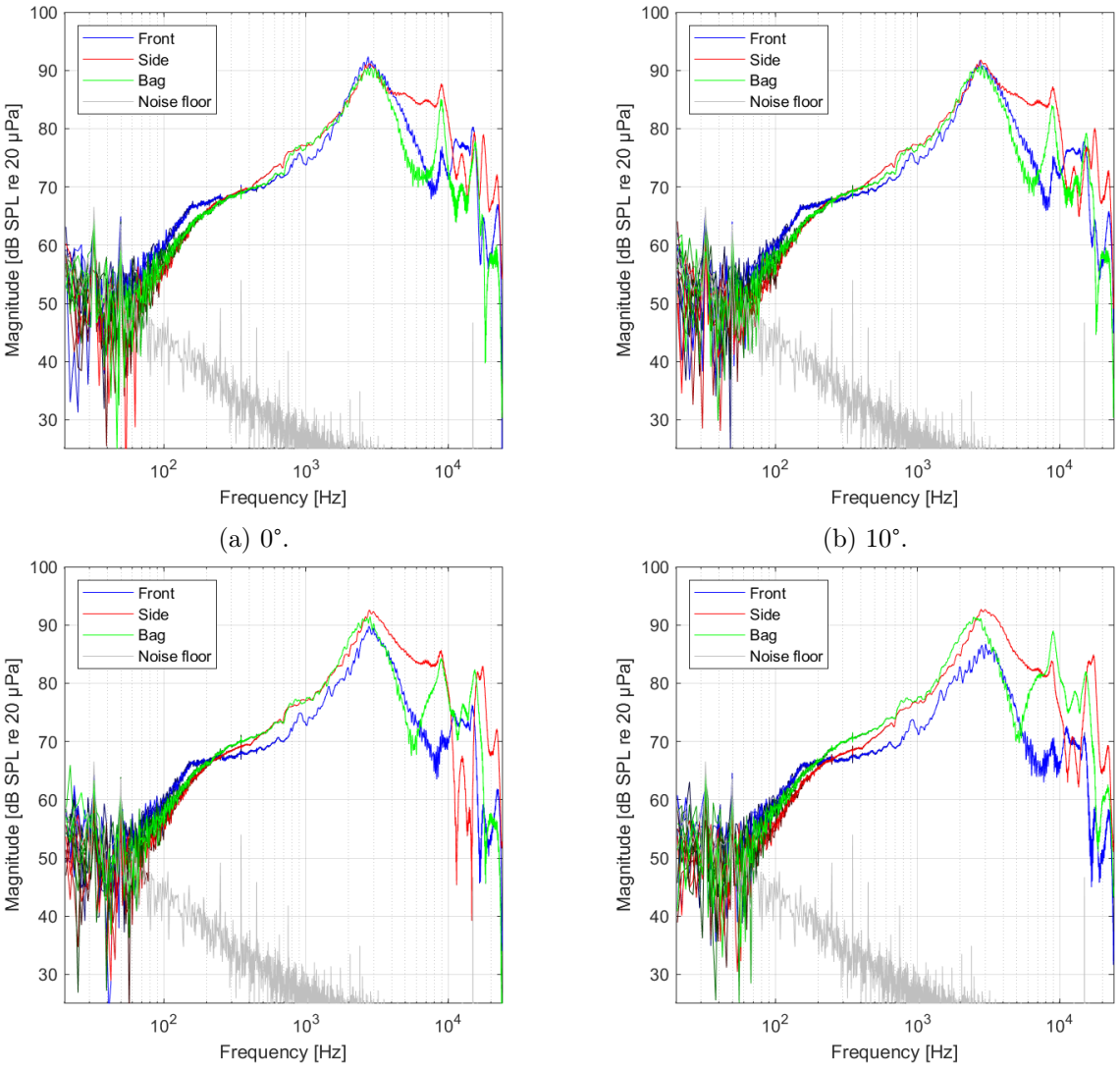
HATS'ens mikrofon kobles til lydkortet gennem spændingsforsyningen. Lydniveauskalibratoren sættes i øret på HATS'en og en referenceværdi findes til konvertering mellem digital værdi og dB SPL. Højtalerne placeres i samme højde som midten af øret på HATS'en, i en afstand af 1 m fra midten af HATS'ens hoved og i en orientering af 0°, set fra HATS'ens perspektiv (front), 90° (side) og 180° (bag). Højtalerne forbindes til lydkortet og en 1 kHz sinustone afspilles. Lydniveauerne justeres til en værdi, tilsvarende 75 dB SPL måles i HATS'ens mikrofon.

I MATLAB åbnes applikationen "Impulse Response Measurer" og der udføres fem MLS impulsresponsmålinger for HATS'ens mikrofon. Fem målinger laves efterfølgende for henholdsvis side- og bag-højtaleren. HATS'ens hovedet roteres 10° og målingerne gentages for de tre højtalere. Dette gentages indtil der er målt hovedorienteringer tilsvarende ± 90°.

Resultater

Front-, side- og bag-højtalerresponsene samt systemets egenstøj er plottet i samme figur for hver hovedorientering. De forskellige respons er grupperet efter farve: Front = blå, side = grøn, bag = rød, støj = grå.

Orientering: 0° - 30°

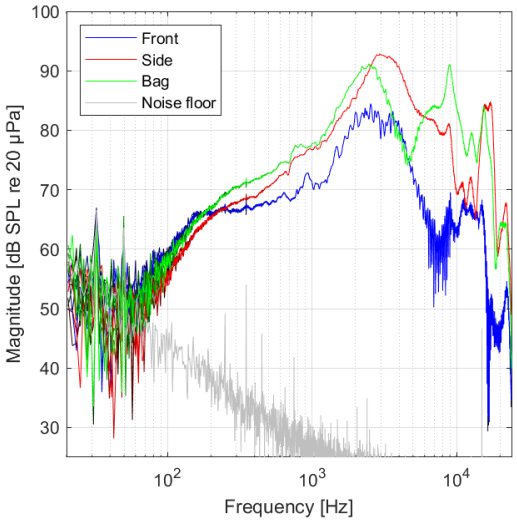


(a) 0°. (b) 10°.

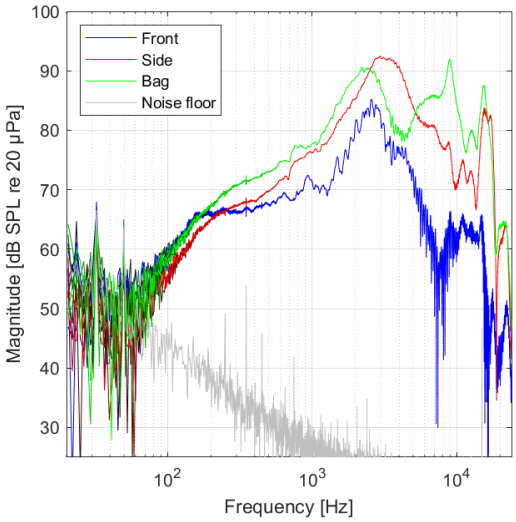
(c) 20°. (d) 30°.

Figur A.6: Frekvensrespons for forskellige hovedorienteringer.

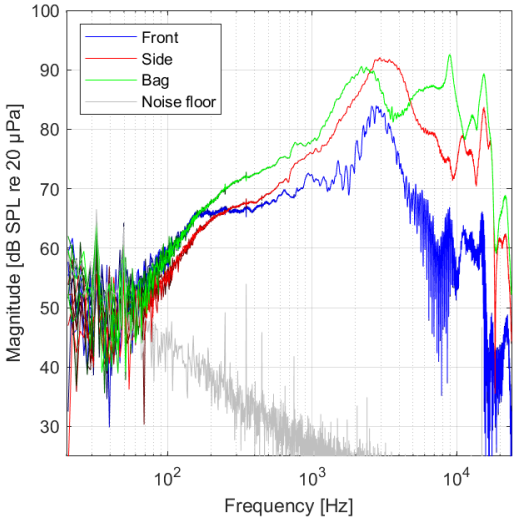
Orientering: 40° - 90°



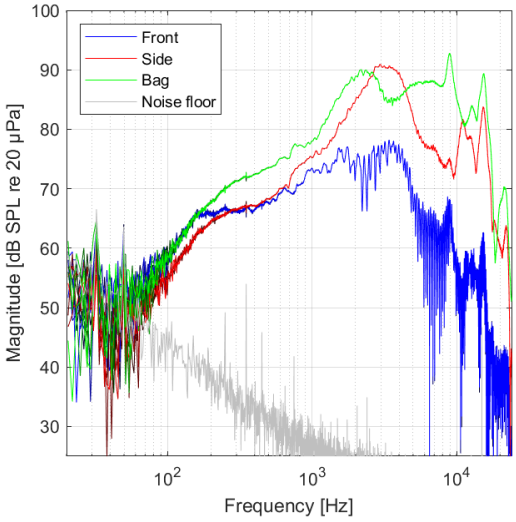
(a) 40°.



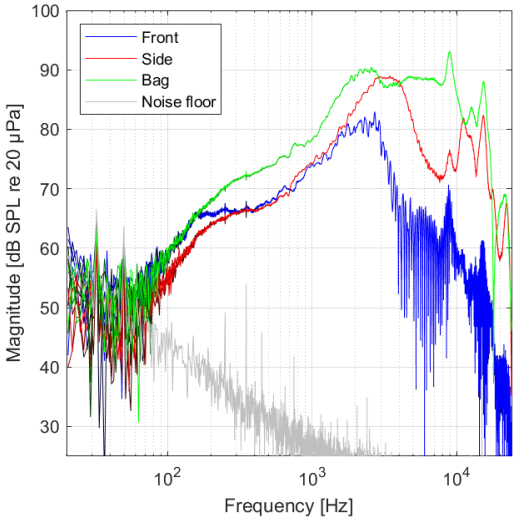
(b) 50°.



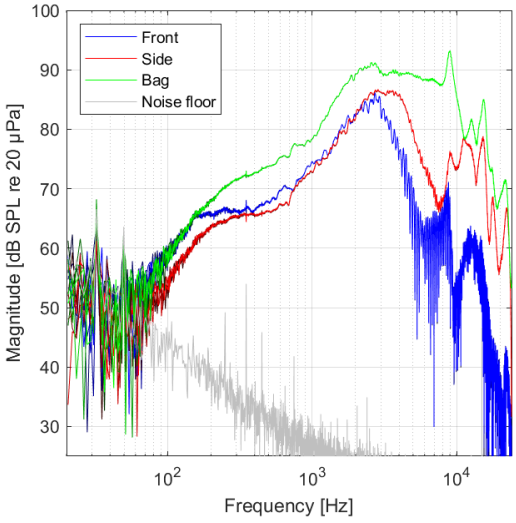
(c) 60°.



(d) 70°.



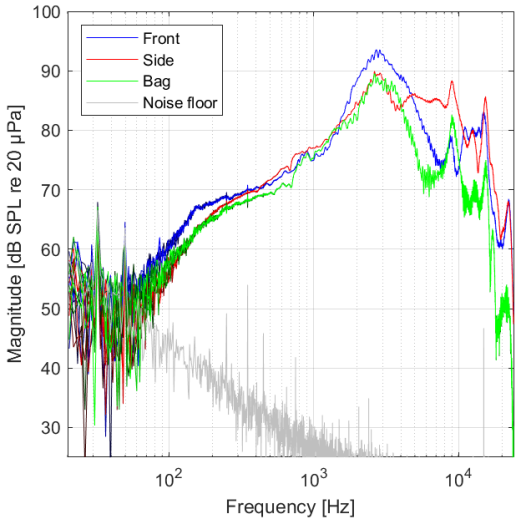
(e) 80°.



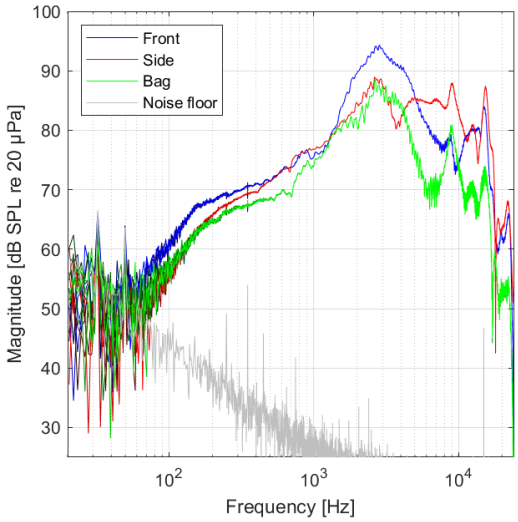
(f) 90°.

Figur A.7: Frekvensrespons for forskellige hovedorienteringer.

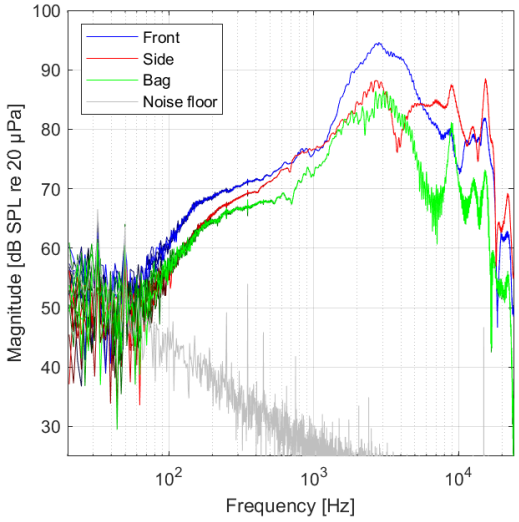
Orientering: -10° - -60°



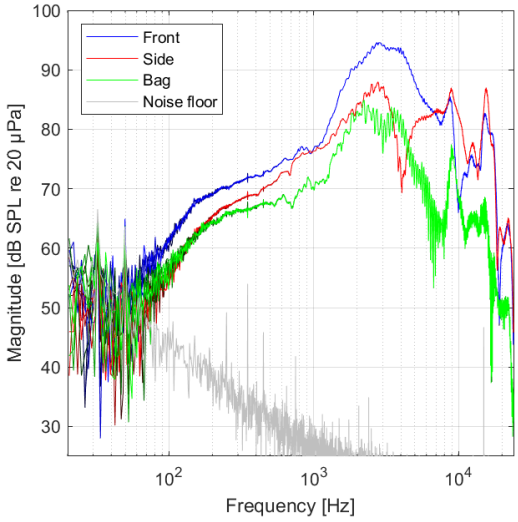
(a) -10°.



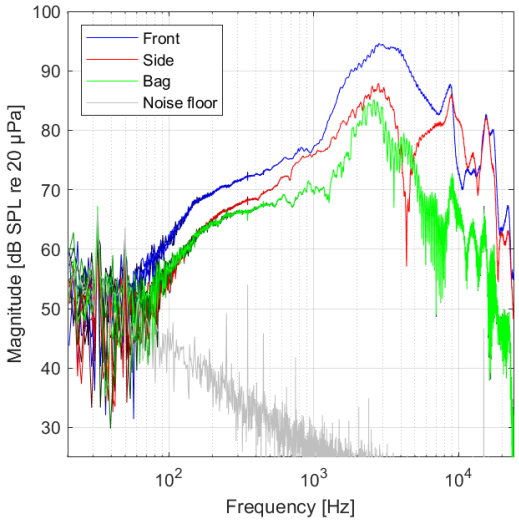
(b) -20°.



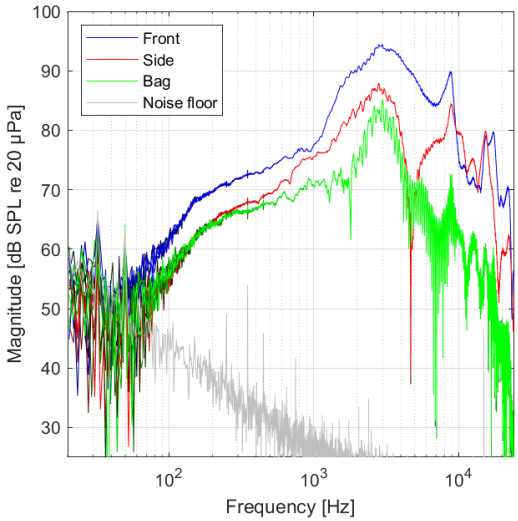
(c) -30°.



(d) -40°.



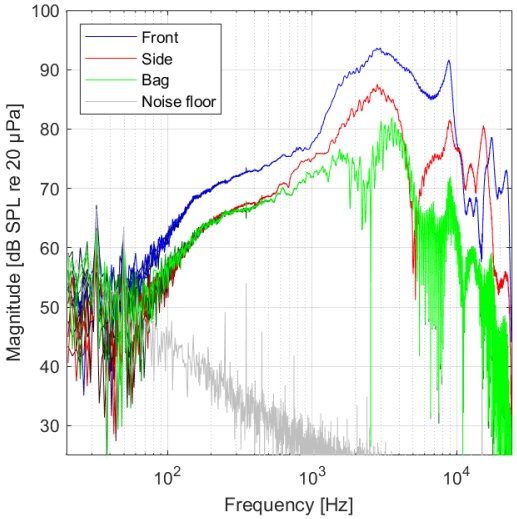
(e) -50°.



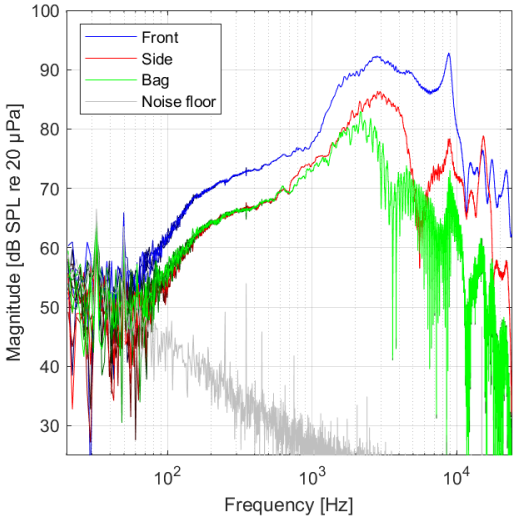
(f) -60°.

Figur A.8: Frekvensrespons for forskellige hovedorienteringer.

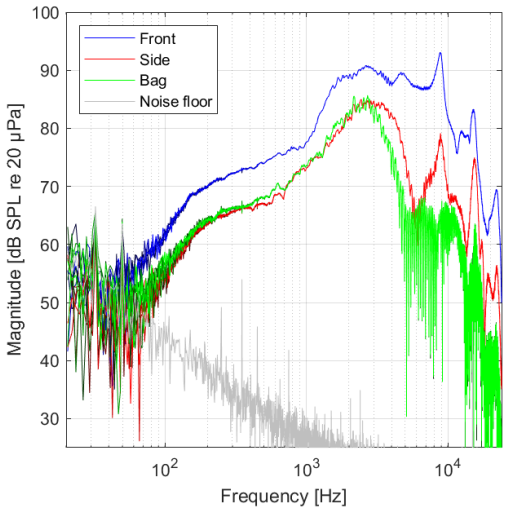
Orientering: -70° - -90°



(a) -70°.



(b) -80°.



(c) -90°.

Figur A.9: Frekvensrespons for forskellige hovedorienteringer.

Måleusikkerhed

Der er kalibreret før målingerne er taget, hvor en reference mellem de 94 dB SPL fra kalibratoren og MATLABs interne lydniveausmåler på -16 dB SPL. Der er ikke blevet målt efterfølgende om kalibreringen stadigvæk stemmer overens med det målte niveau efter justeringen, ej heller er der testet om kalibreringen passer efter målingerne.

For at kunne placere HATS'en stabilt på en af platformene i det anekoiske kammer, er HATS'en placeret på et stativ. Det har ikke været muligt at låse HATS'ens rotation i forhold til beslaget, så efter ændringer i opstilling har HATS'ens orientering været tjekket ved øjemål. Ligeledes er højtalerne placeret på et stativ for at være i samme højde som øret på HATS'en. Der har ikke været brugt en vinkelmåler for at tjekke om hvor vidt højtalerne har stået i korrekt orientering i forhold til HATS'en. Til gengæld har der ikke været flyttet på stativerne under målingerne så eventuel fejl i højtalerposition er den samme for hver måling.

På HATS'en er der kun 15° opløsningsmarkeringer på toppen af hovedet. For at kunne lave 10°opløsning er der først målt omkredsen på halsen af HATS'en, hvorefter en markering med 10° er sat på HATS'en, samt en markering for 0° forrest på halsen.

Der er forsøgt isoleret eventuelle forbindelser mellem kabler og forsyninger inde i det anekoiske kammer for at undgå jord og reducere egenstøj. Ligeledes er beslagene, HATS'en er monteret på, forsøgt dæmpet med vat for at undgå fejlbidrag.

A.3 Målerapport: Mikrofonens position

Denne målerapport er udført af gruppe 1077 den 23/24/30/31-03-2022 i anekoisk kammer, lokale B4-111 på Frederik Bajers Vej 7B.

Formål

Formålet med denne målerapport er at undersøge og måle de resulterende frekvensrespons på baggrund af en mikrofon monteret forskellige steder på torsoen af en HATS.

Testobjekt

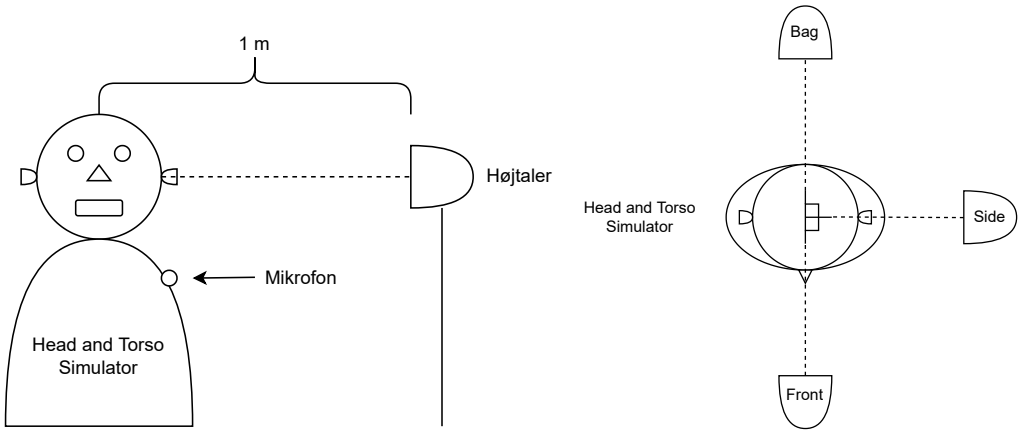
Der testes på en Head and Torso Simulator, hvorpå en mikrofon monteres forskellige steder på torsoen.

Anvendt udstyr

Antal	Komponent	Type	AAU nr.
1	Lydkort	RME Fireface UFX+	108204
2	Forstærker	Pioneer A-616	AUC 08249 AUC 08341
1	Mikrofon	Sennheiser KE4-211	N/A
1	Head and Torso Simulator	Brüel & Kjær 4128	34-109
1	Lydniveauskalibrator	Brüel & Kjær 4230	08373
1	Strømforsyning	Brüel & Kjær 2804	07304
3	Højtaler	Vifa MD10	2017-21 2017-22 2017-24
1	Sportsvest	N/A	N/A

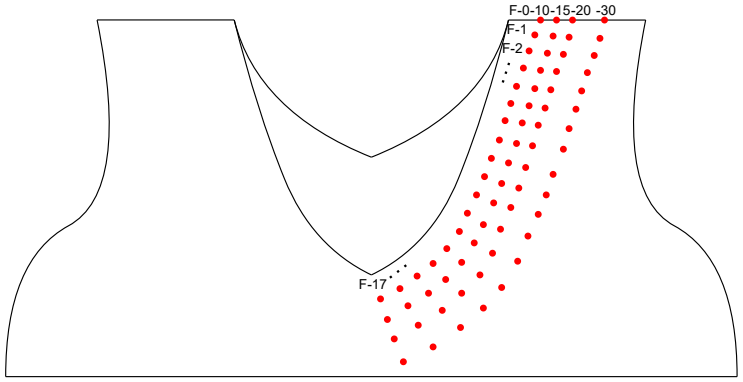
Måleopstilling

Måleopstillingen opstilles som illustreret på figur A.10a. Mikrofonplaceringer kan ses på figur A.11.

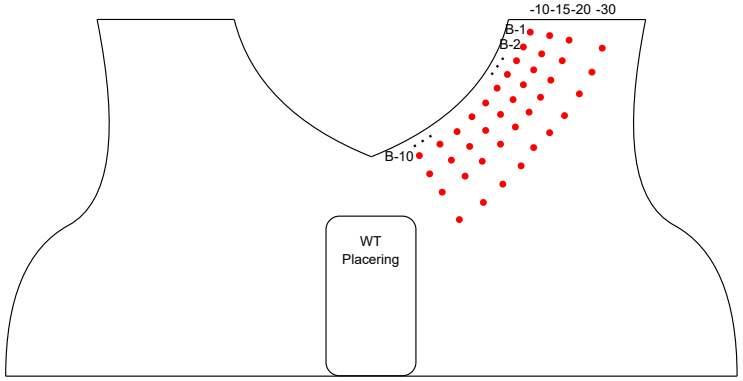


(a) Måleopstilling. (b) Højtalerpositioner.

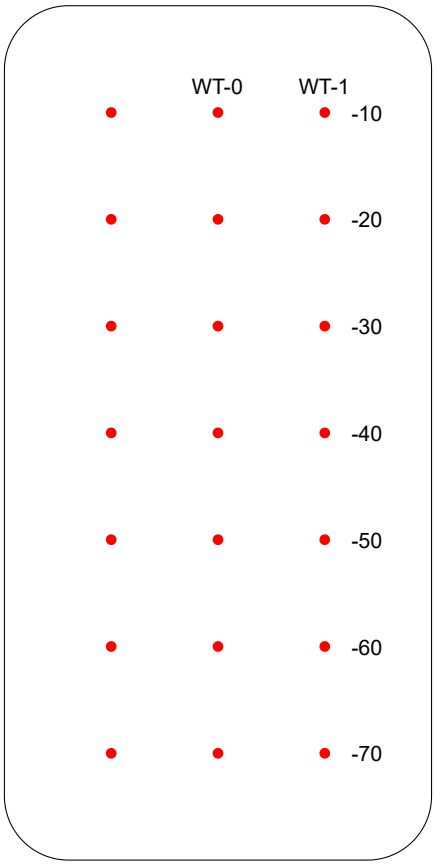
Figur A.10: Illustrationer af måleopstilling.



(a) Front.



(b) Bagside.



(c) WT.

Figur A.11: Illustration af højtalerpositioner.

Måleprocedure

Vesten trækkes ned over torsoen på HATS'en og HATS'ens mikrofon kobles til lydkortet gennem spændingsforsyningen. Lydniveauskalibratoren sættes i øret på HATS'en og en referenceværdi findes til konvertering mellem digital værdi og dB SPL. Mikrofonen placeres på skuldersyningen, 10 mm fra den indvendige kantforstærkning, og forbindes til lydkortet. Lydniveauskalibratoren bruges ligeledes til at finde en referenceværdi til konvertering mellem digital værdi og dB SPL for mikrofonen.

Højtalerne placeres i samme højde som midten af øret på HATS'en, i en afstand af 1 m fra midten af HATS'ens hoved og i en orientering af 0°, set fra HATS'ens perspektiv (front), 90° (side) og 180° (bag). Højtalerne forbindes til lydkortet og en 1 kHz sinustone afspilles. Lydniveauerne justeres til en værdi, tilsvarende 75 dB SPL måles i HATS'ens mikrofon.

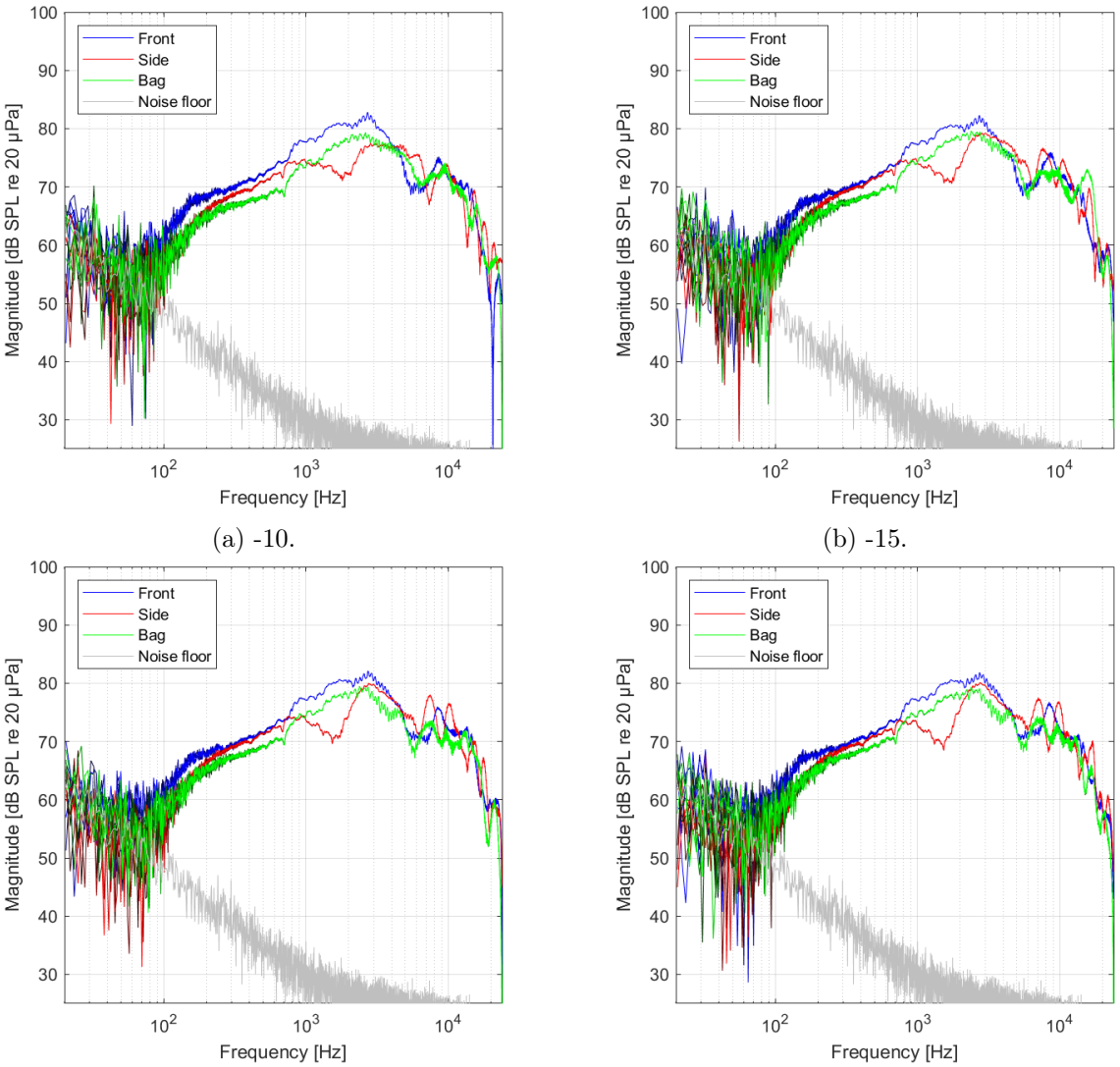
I MATLAB åbnes applikationen "Impulse Response Measurer" og der udføres fem MLS impulsresponsmålinger for den torsomonterede mikrofon. Fem målinger laves efterfølgende for henholdsvis side- og bag-højtaleren. Mikrofonen flyttes til 15 mm fra den indvendige kantforstærkning og målingerne fra de tre højtalerpositioner gentages. Dette gentages for 20 og 30 mm fra den indvendige kantforstærkning. Mikrofonen flyttes 10 mm ned langs kraven og måleserien gentages indtil bunden af kraven er målt.

Mikrofonen flyttes over på bagsiden og der måles på samme måde med 10 mm mellemrum langs kraven til kanten af lommen af WT. Til sidst måles der med 10 mm mellemrum på WT positionen.

Resultater

Front-, side- og bag-højtalerresponsene samt systemets egenstøj er plottet i samme figur for hver hovedorientering. De forskellige respons er grupperet efter farve: Front = blå, side = grøn, bag = rød, støj = grå.

F-0



(a) -10.

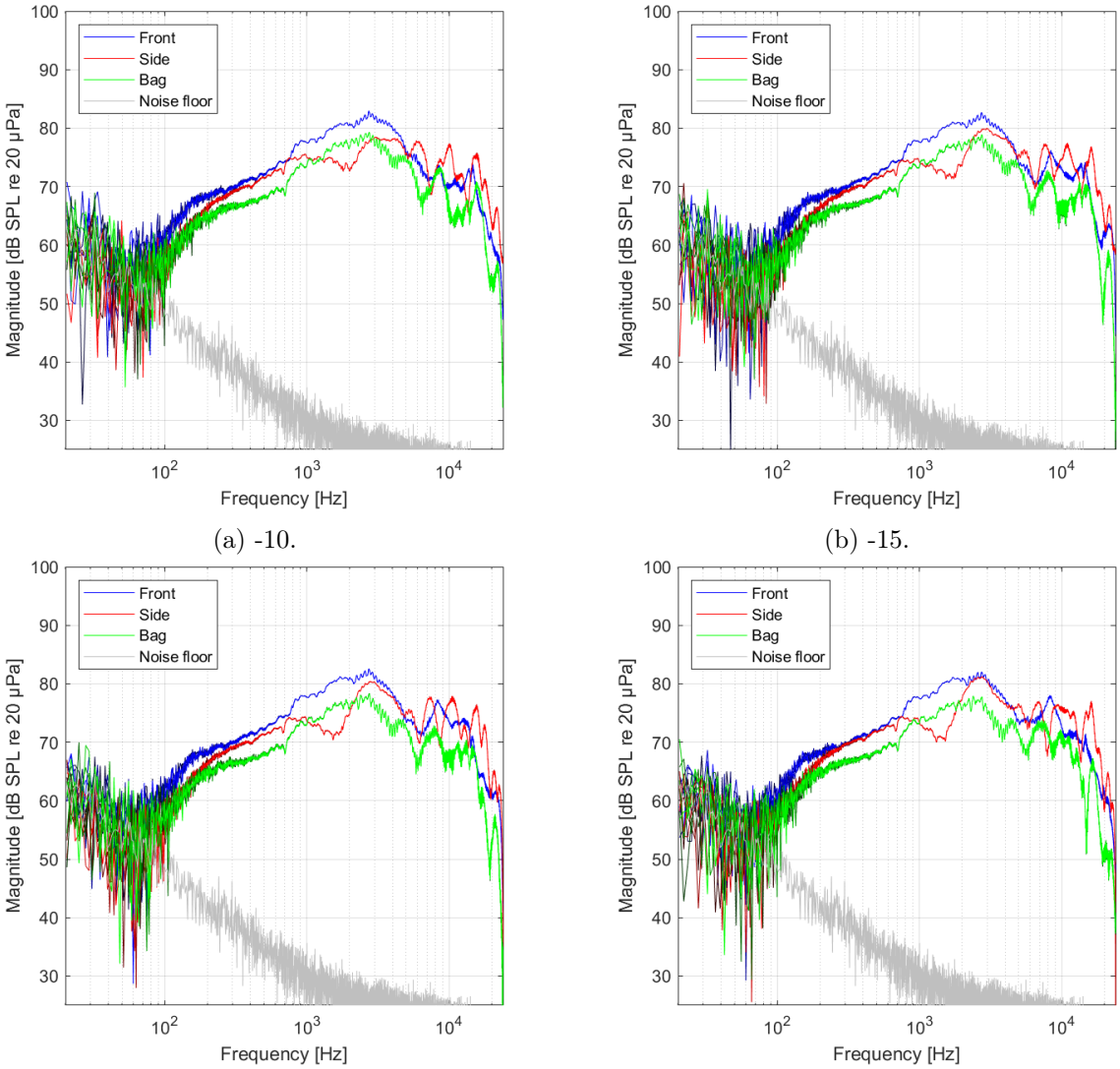
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.12: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 0 mm fra syning.

F-1



(a) -10.

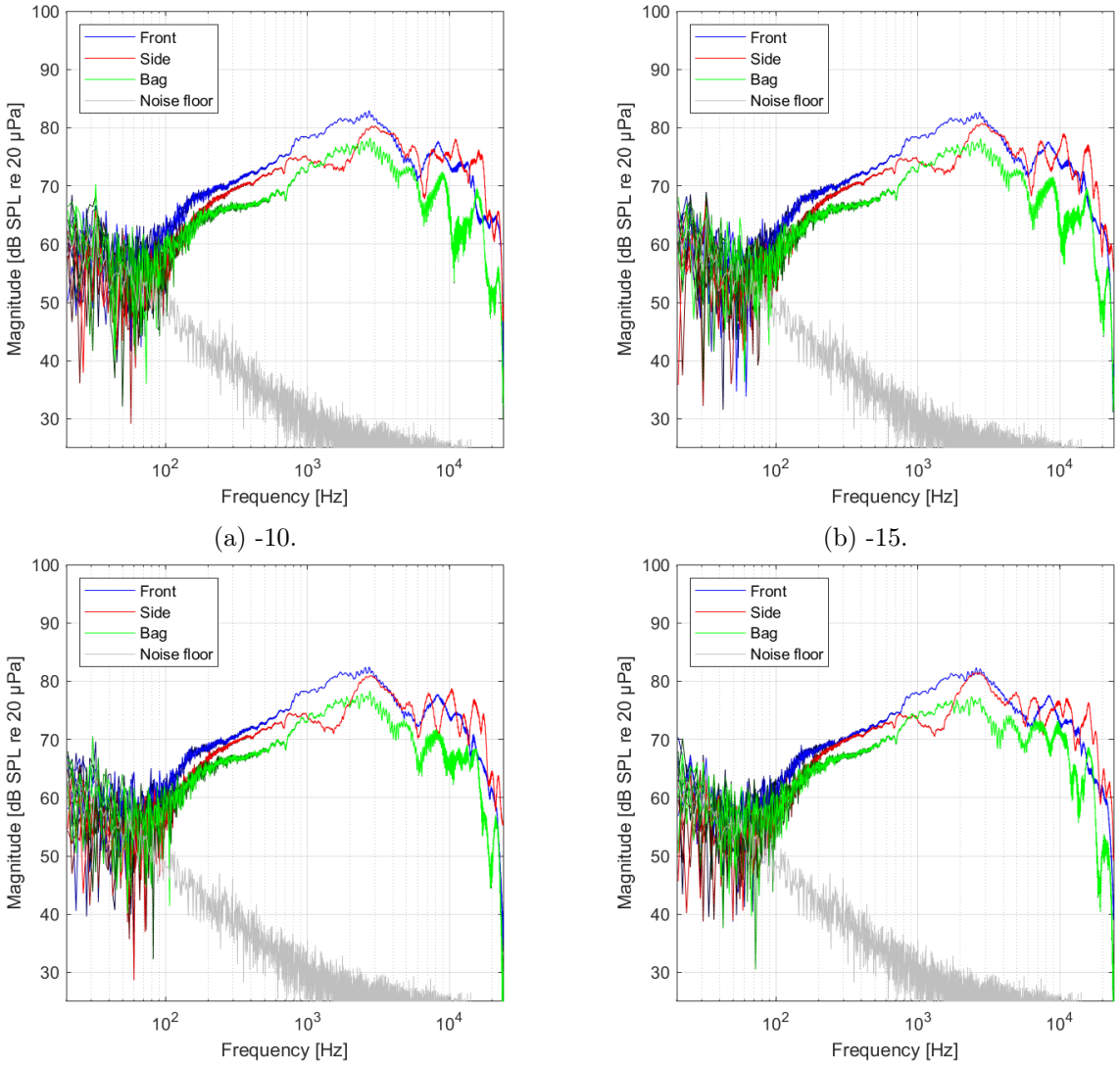
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.13: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 10 mm fra syning.

F-2



(a) -10.

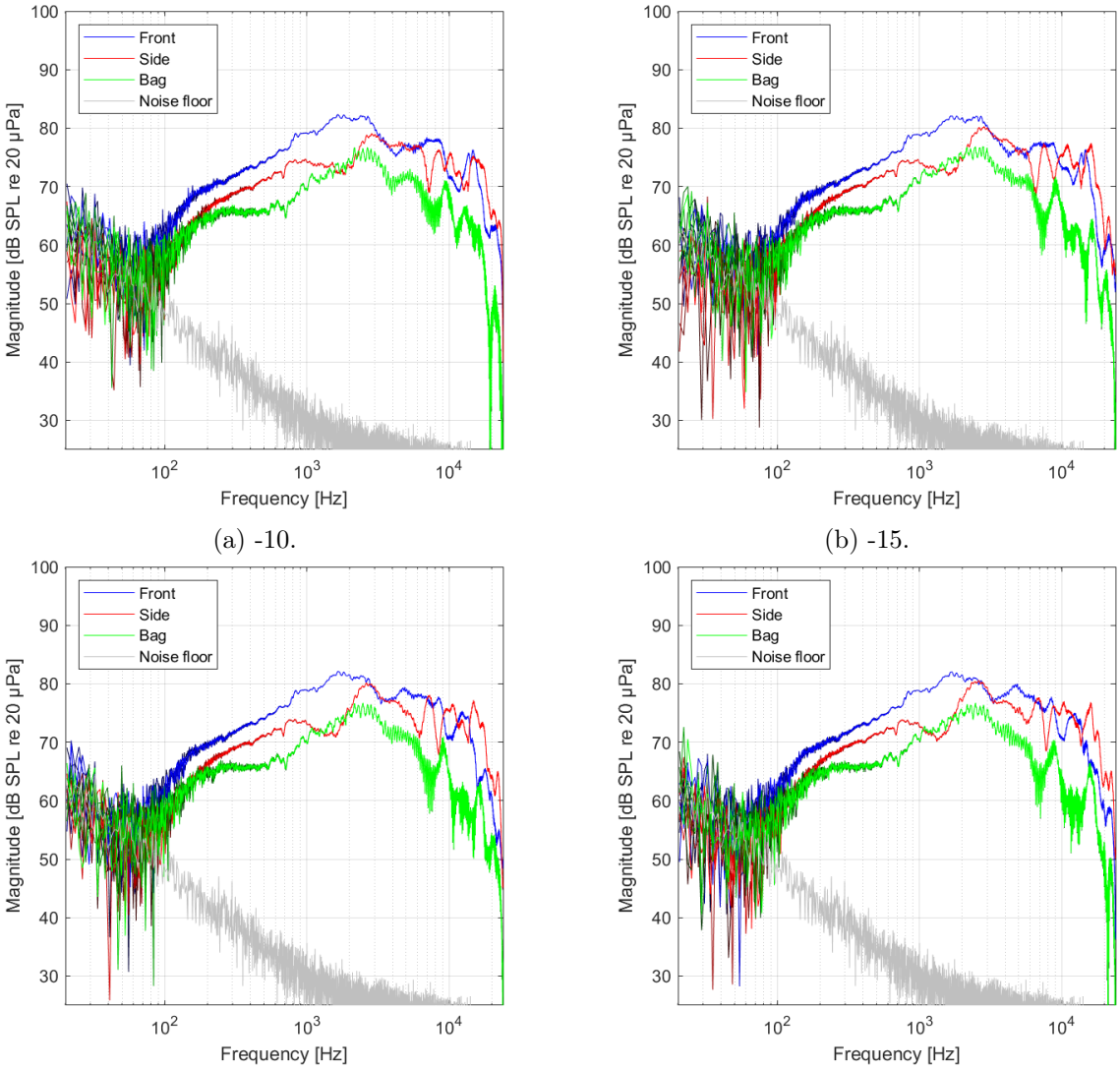
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.14: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 20 mm fra syning.

F-3



(a) -10.

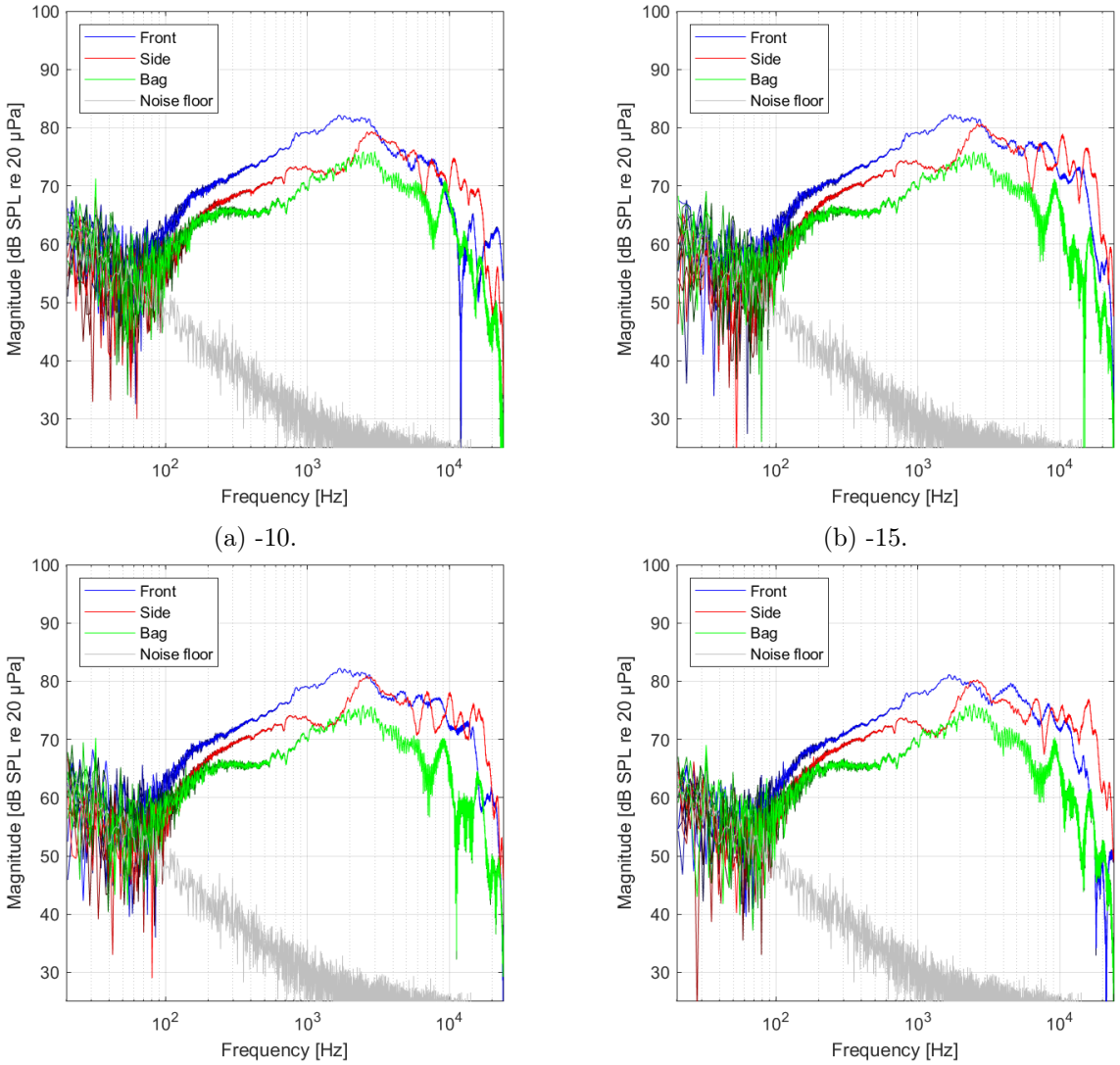
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.15: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 30 mm fra syning.

F-4



(a) -10.

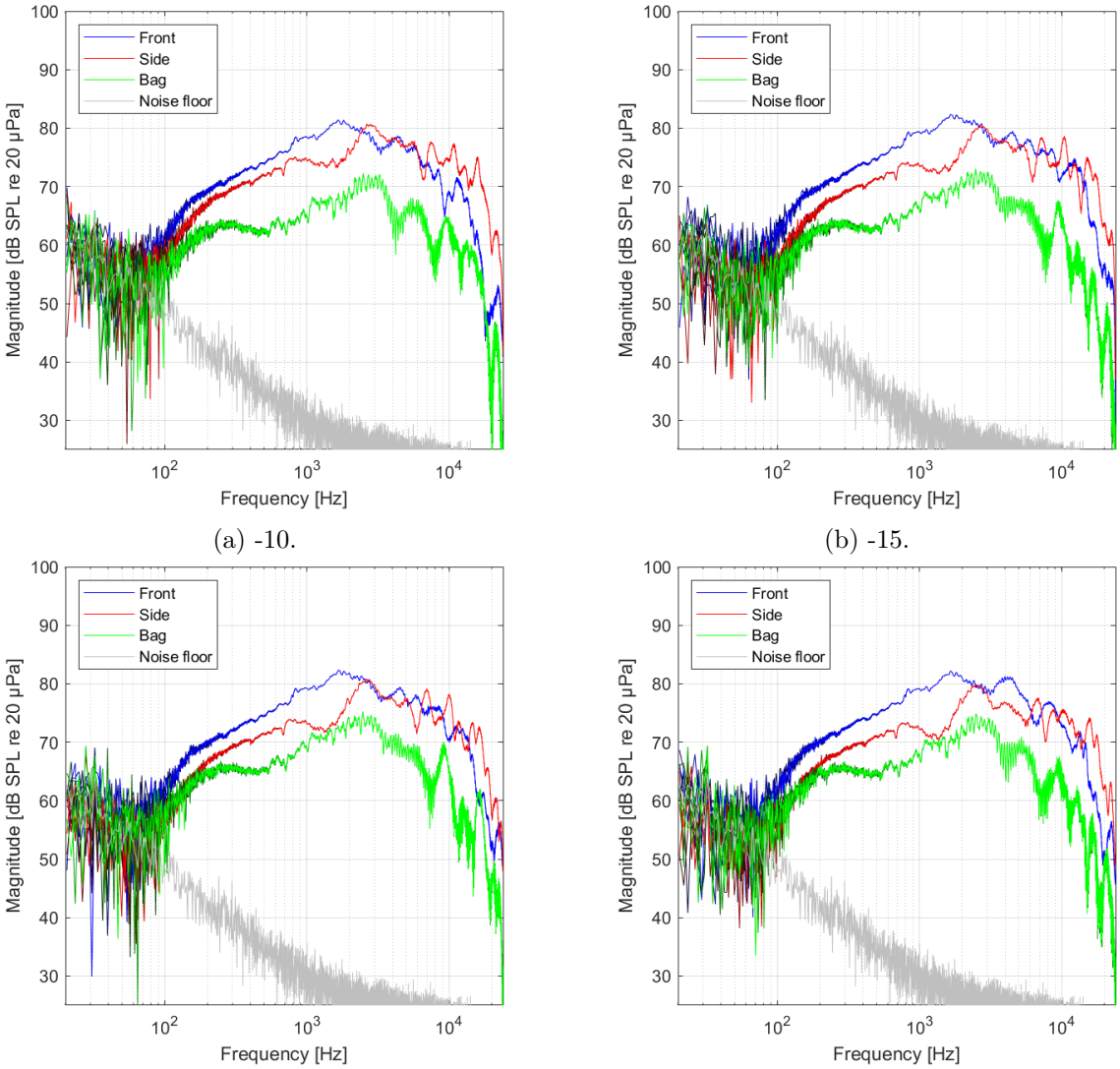
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.16: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 40 mm fra syning.

F-5



(a) -10.

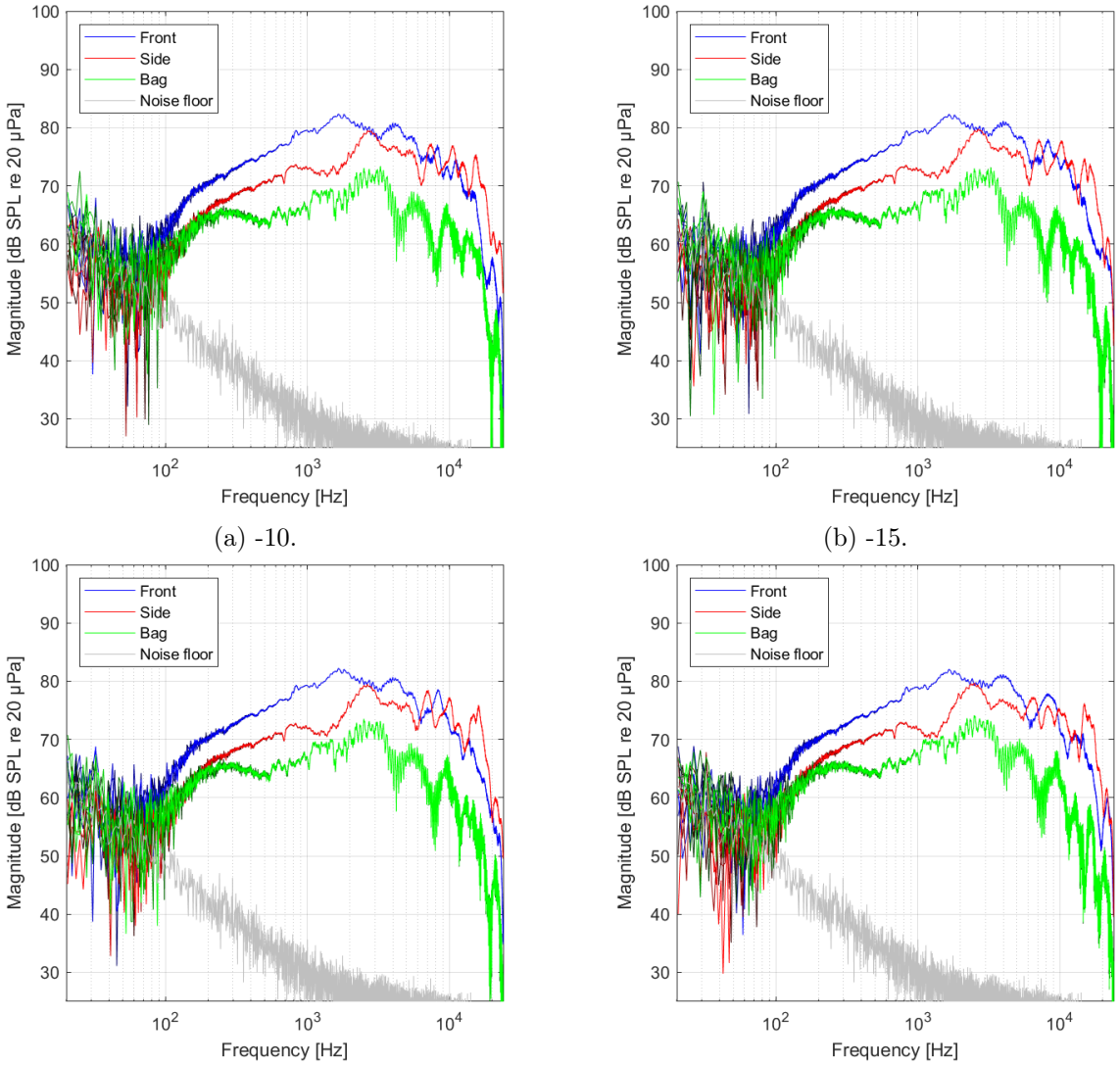
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.17: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 50 mm fra syning.

F-6

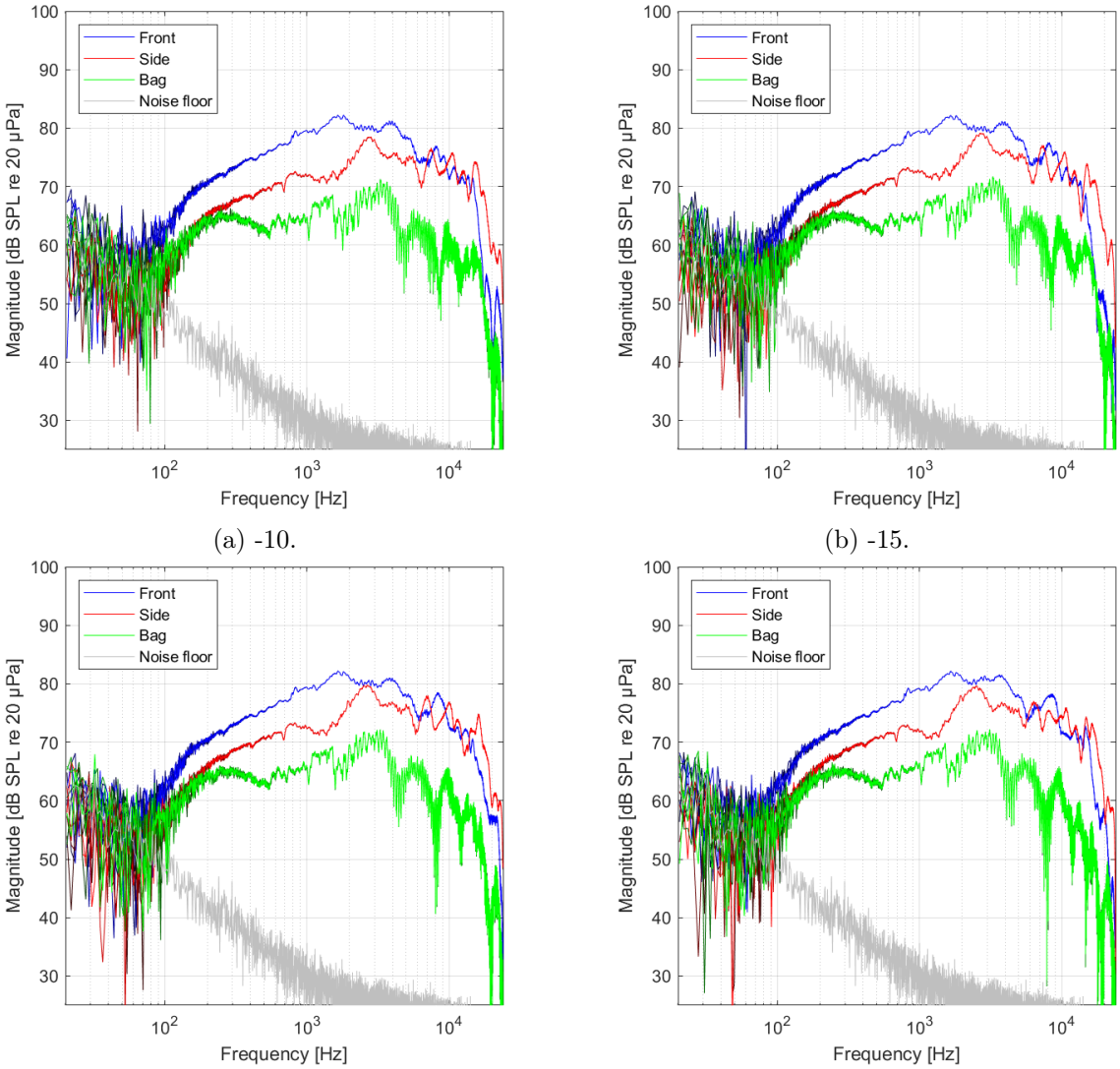


(a) -10. (b) -15.

(c) -20. (d) -30.

Figur A.18: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 60 mm fra syning.

F-7



(a) -10.

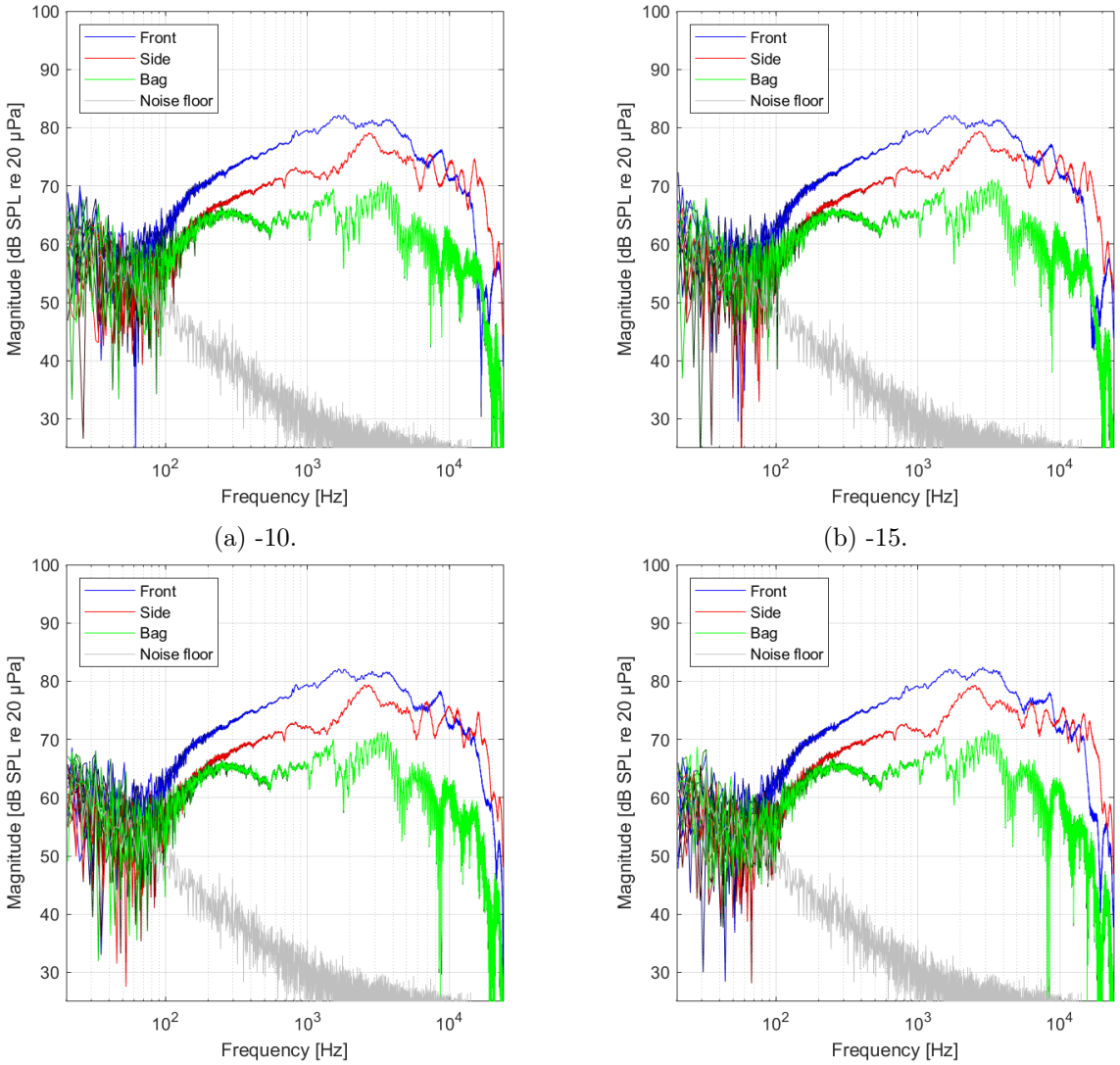
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.19: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 70 mm fra syning.

F-8



(a) -10.

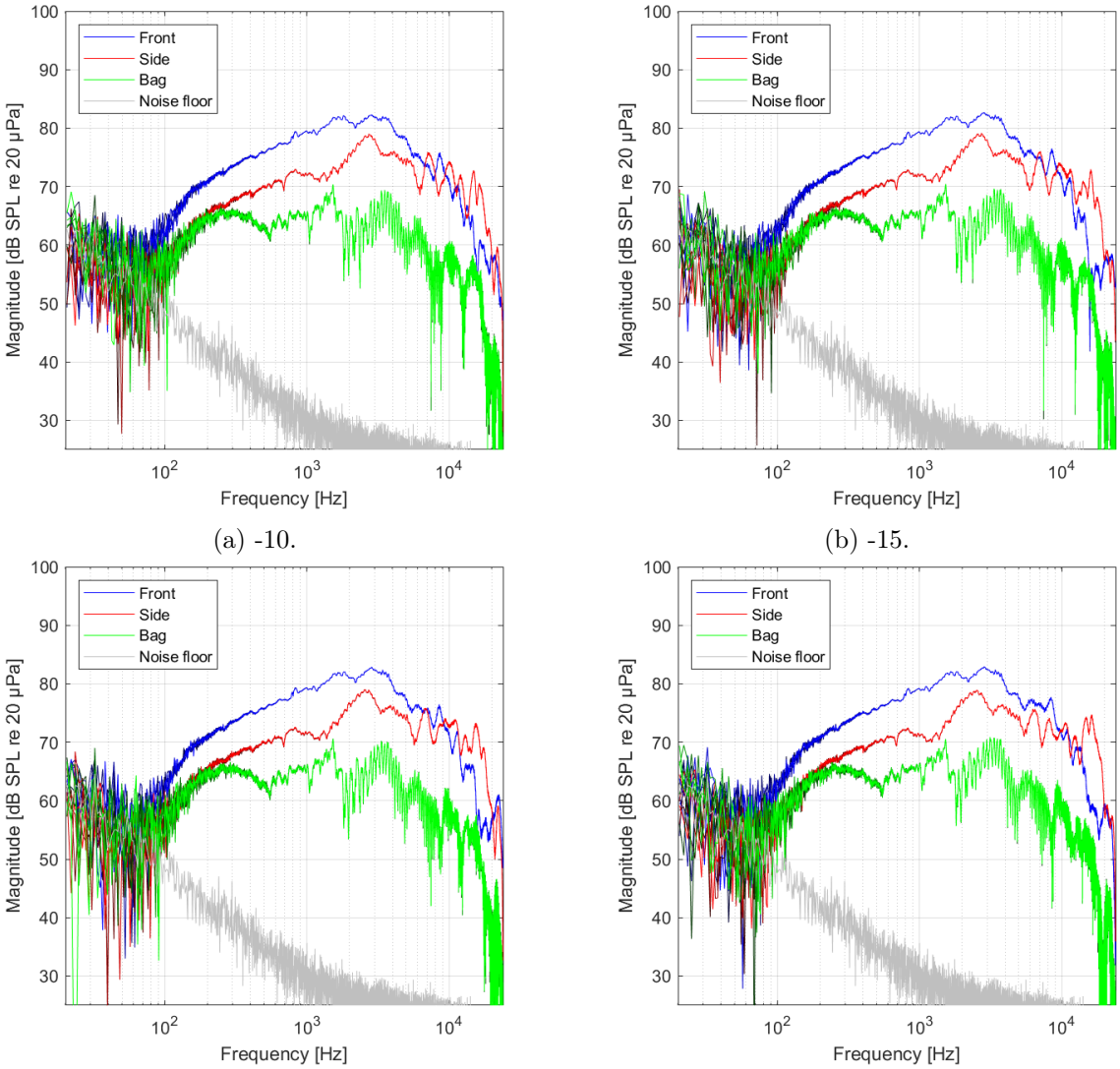
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.20: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 80 mm fra syning.

F-9



(a) -10.

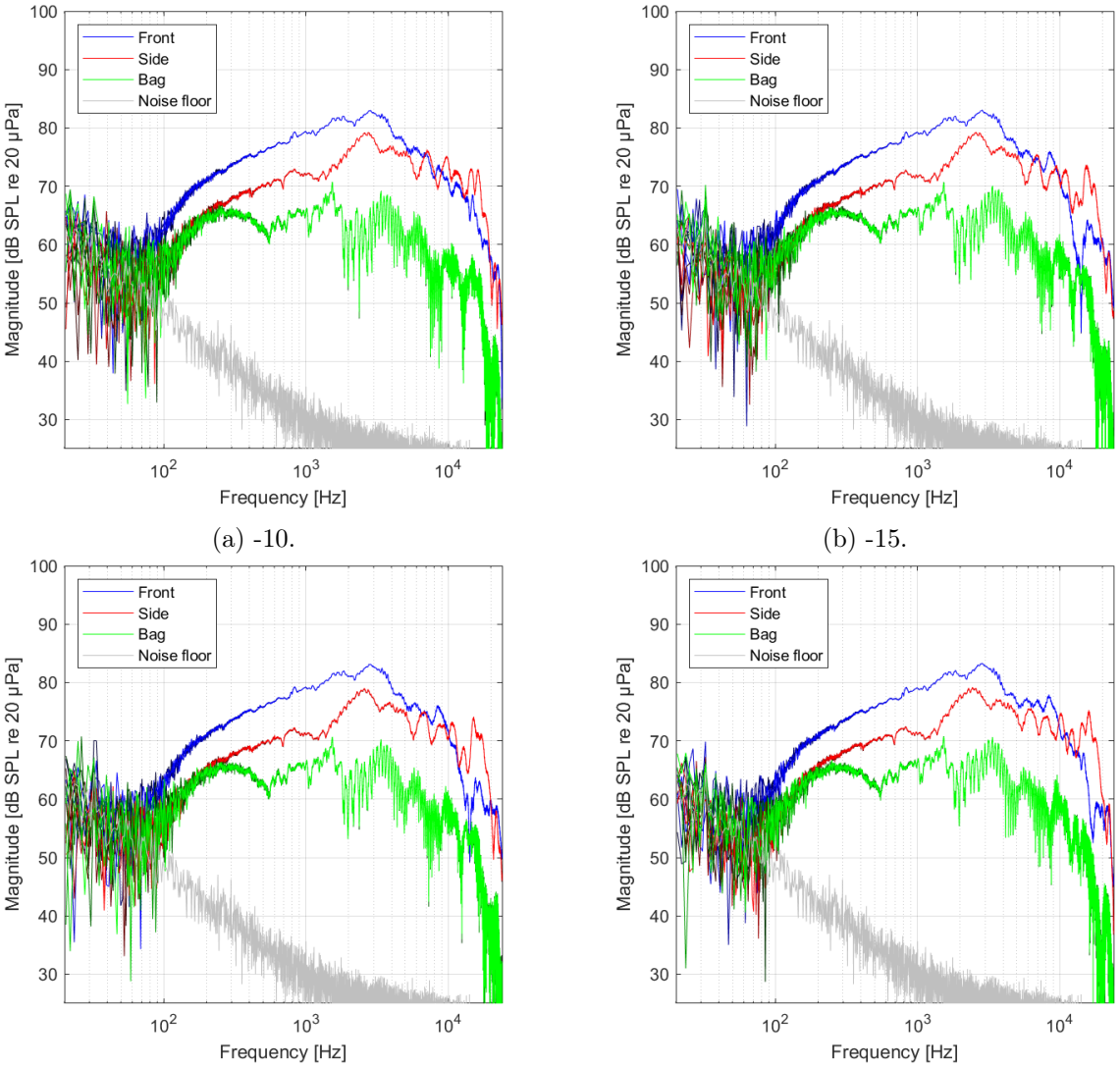
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.21: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 90 mm fra syning.

F-10



(a) -10.

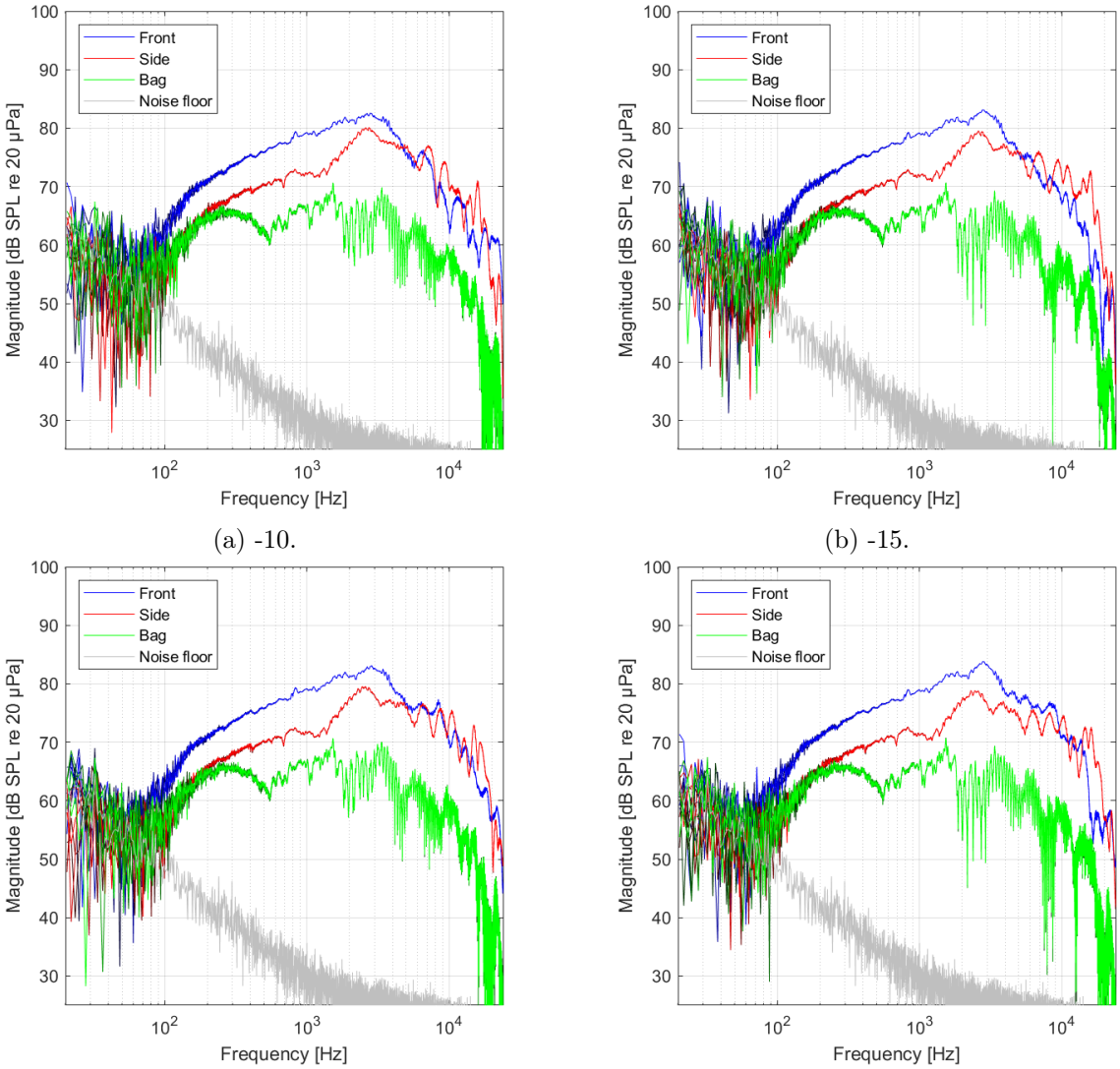
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.22: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 100 mm fra syning.

F-11



(a) -10.

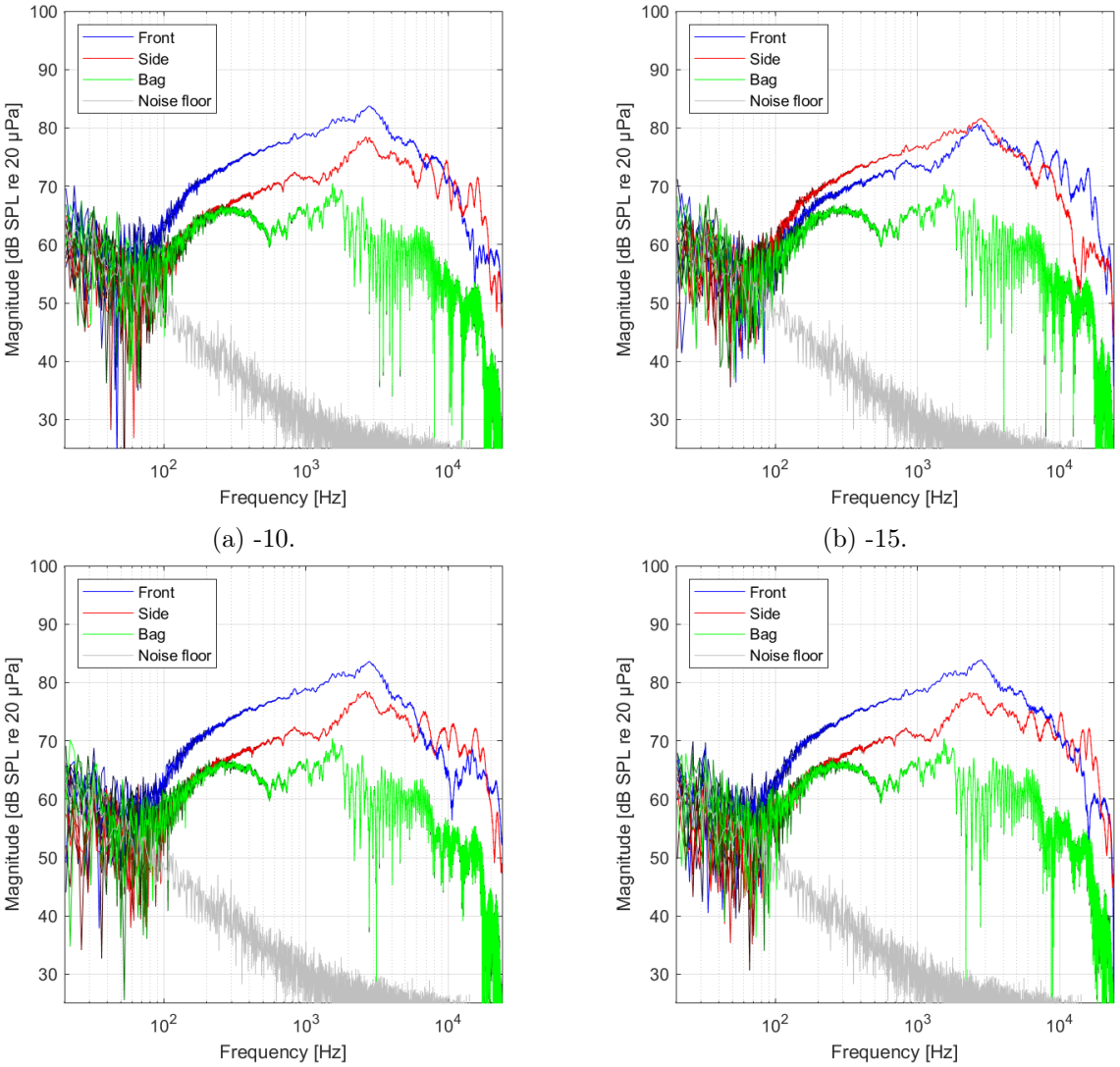
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.23: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 110 mm fra syning.

F-12



(a) -10.

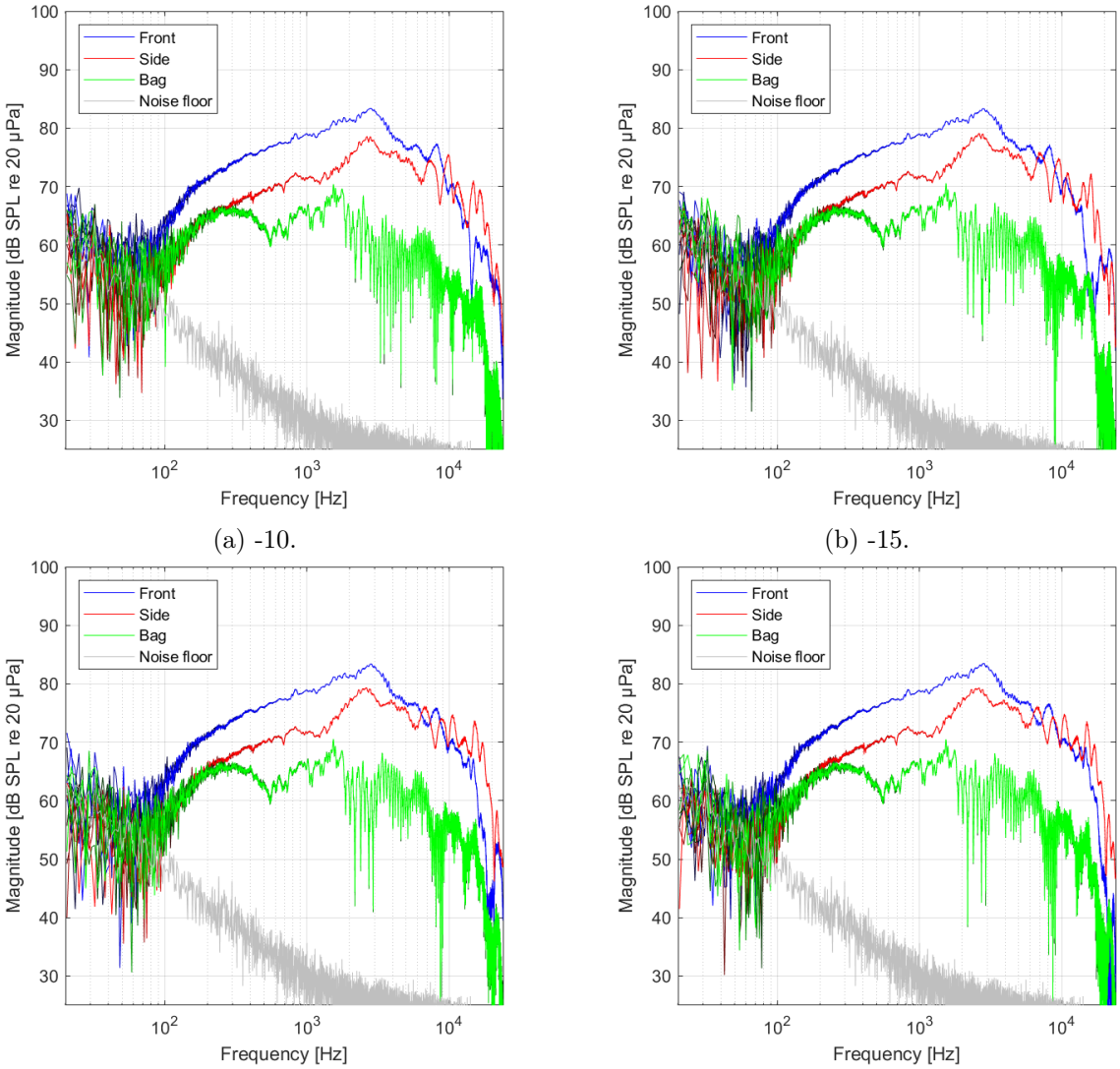
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.24: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 120 mm fra syning.

F-13



(a) -10.

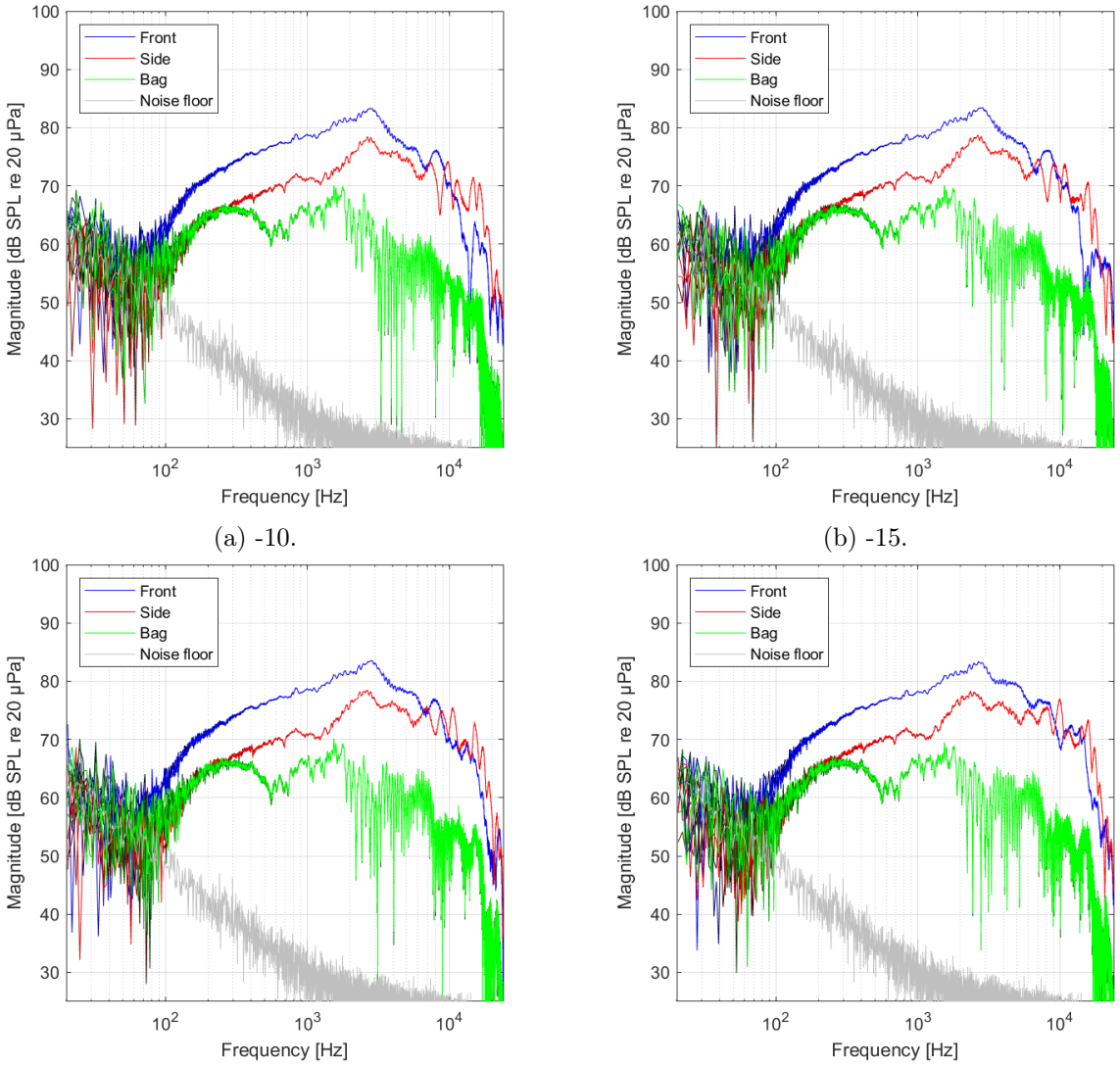
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.25: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 130 mm fra syning.

F-14



(a) -10.

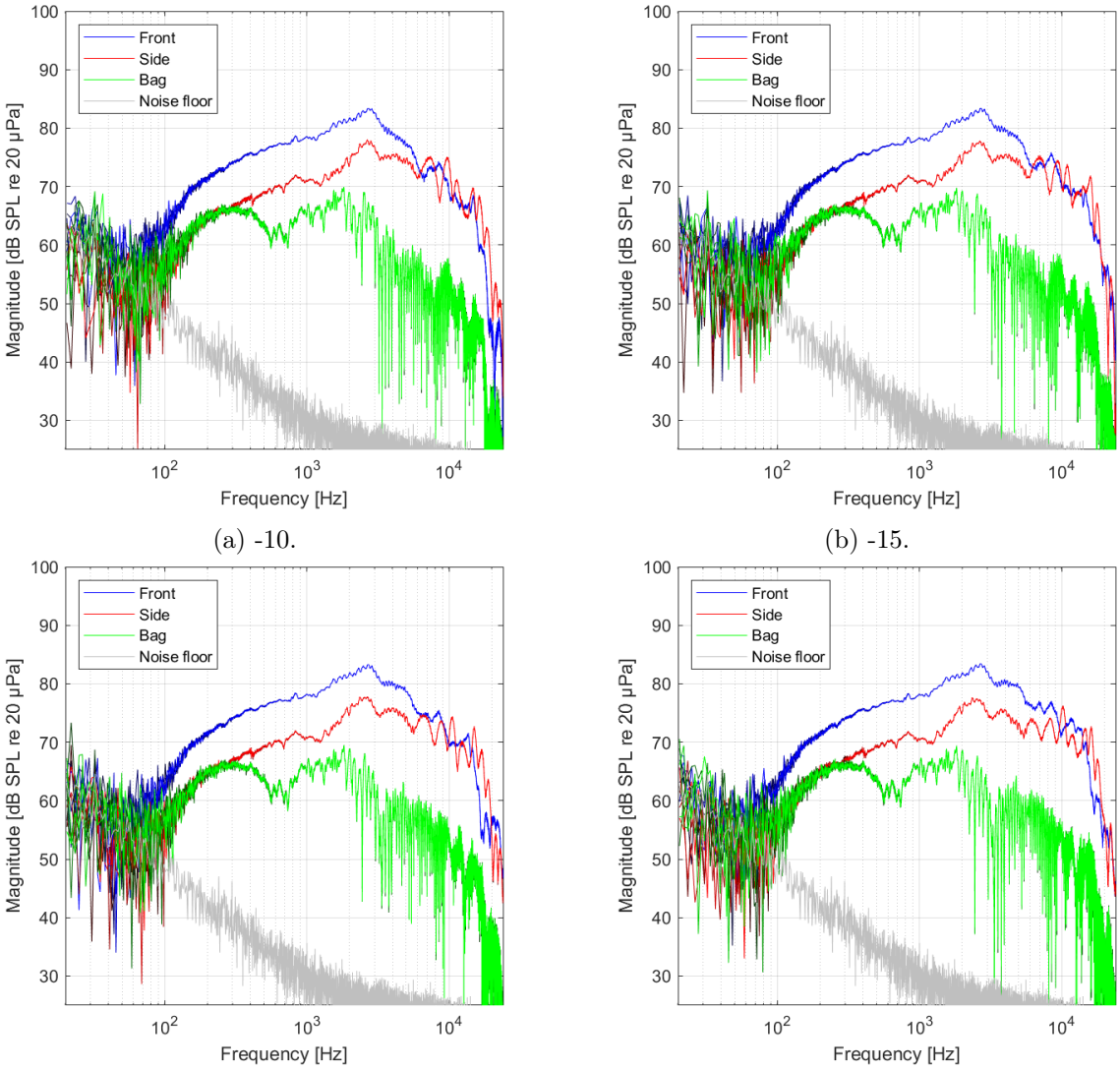
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.26: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 140 mm fra syning.

F-15



(a) -10.

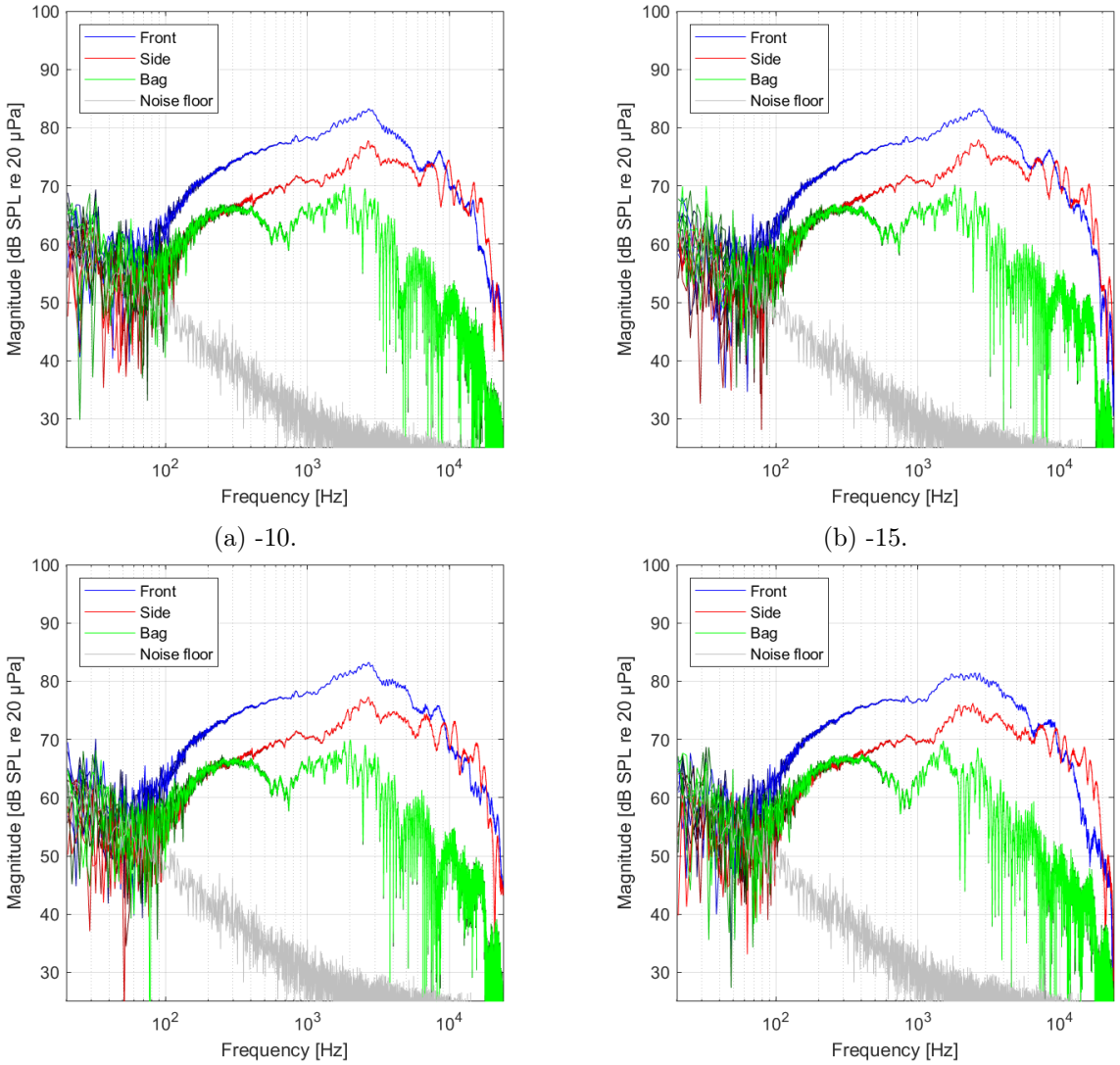
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.27: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 150 mm fra syning.

F-16



(a) -10.

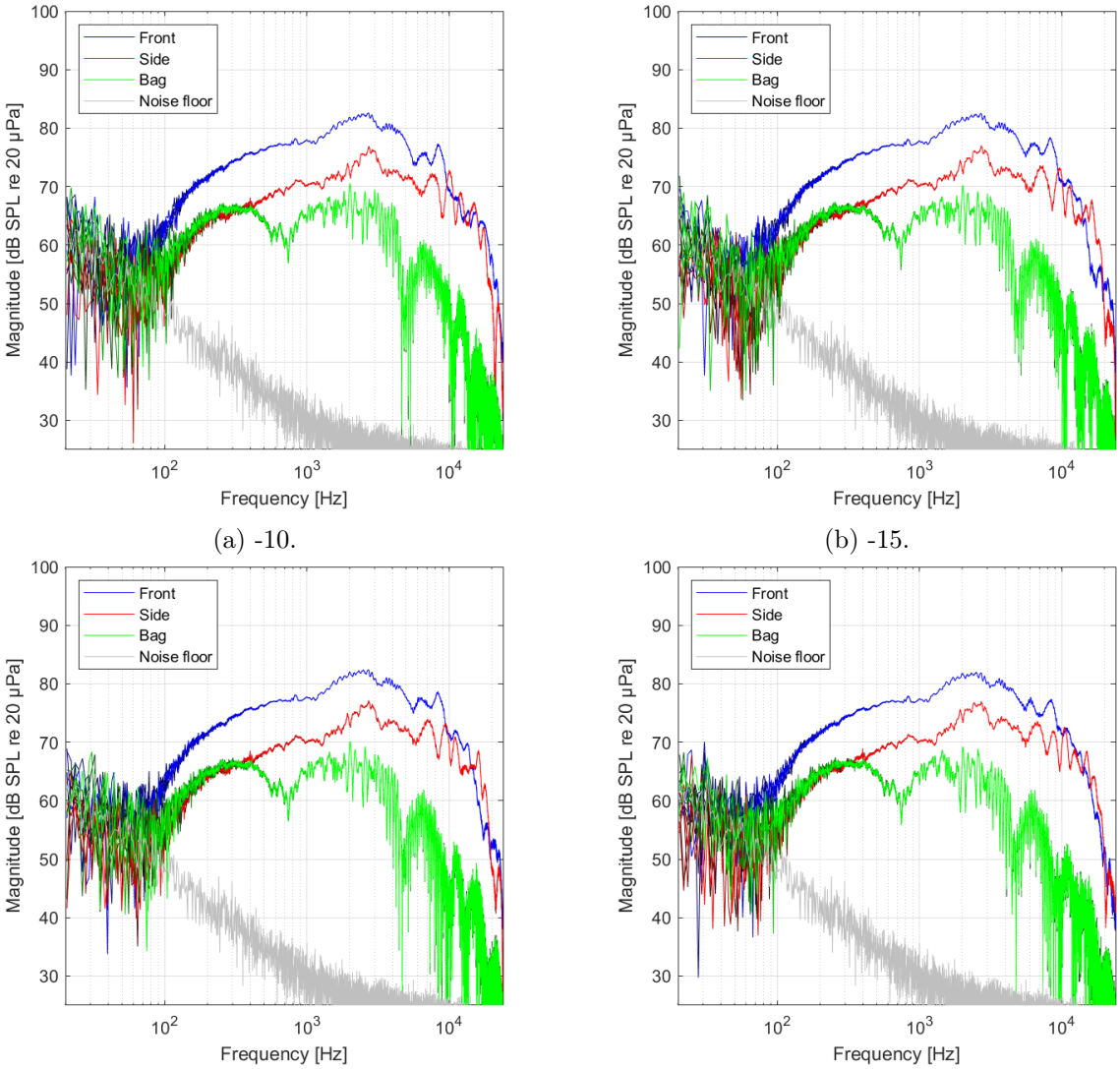
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.28: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 160 mm fra syning.

F-17



(a) -10.

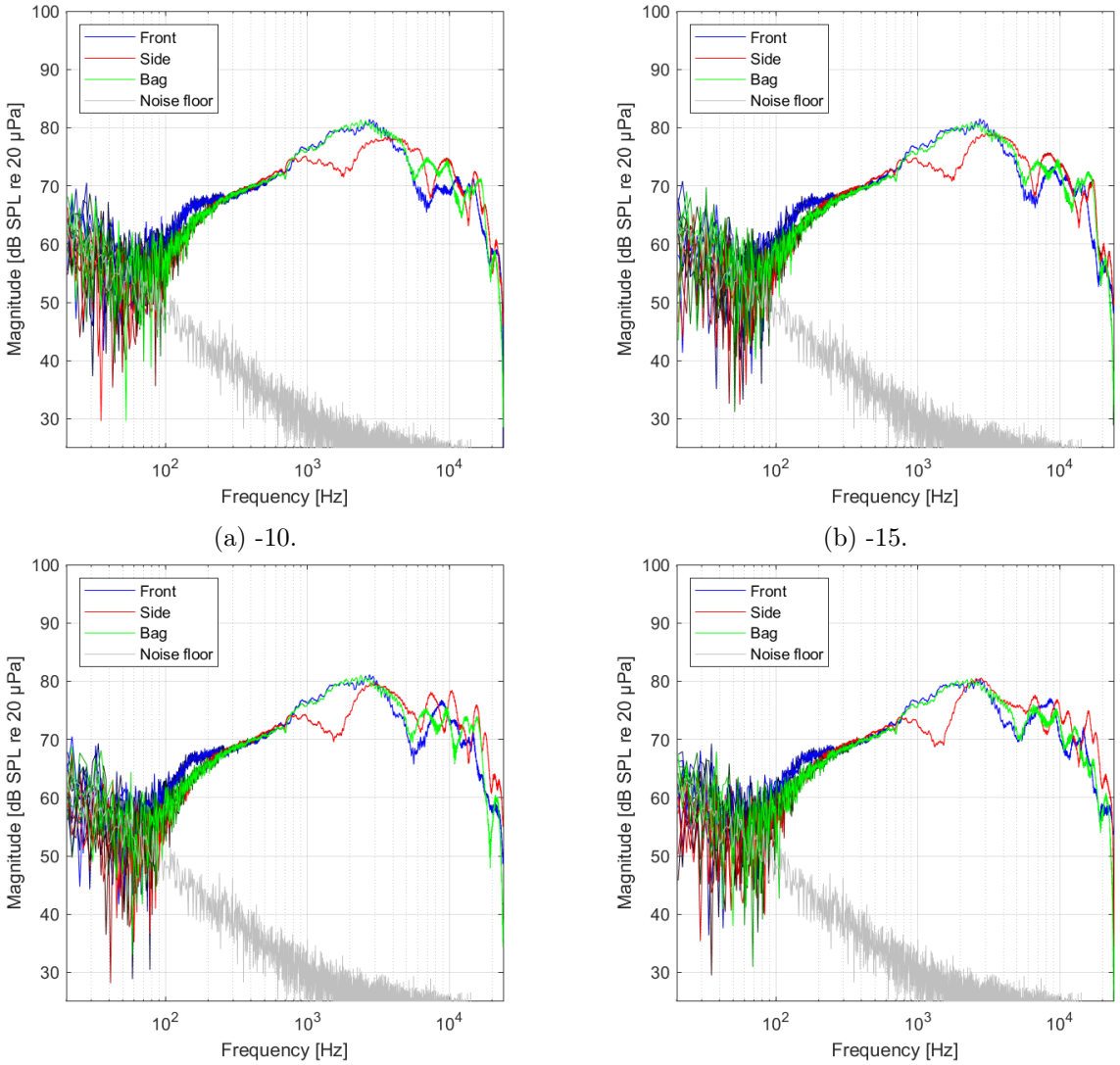
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.29: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret front, 170 mm fra syning.

B-1



(a) -10.

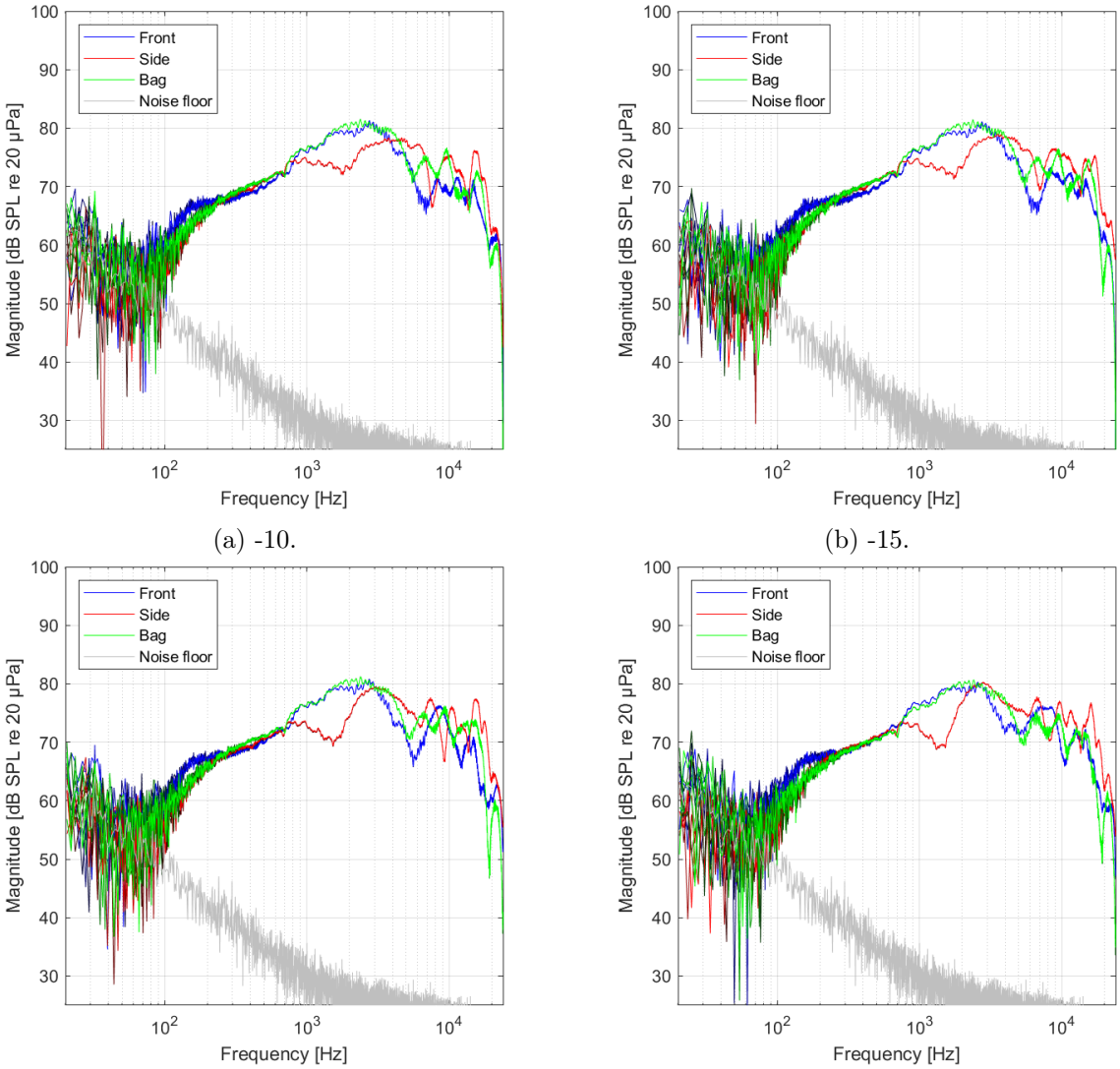
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.30: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 10 mm fra syning.

B-2



(a) -10.

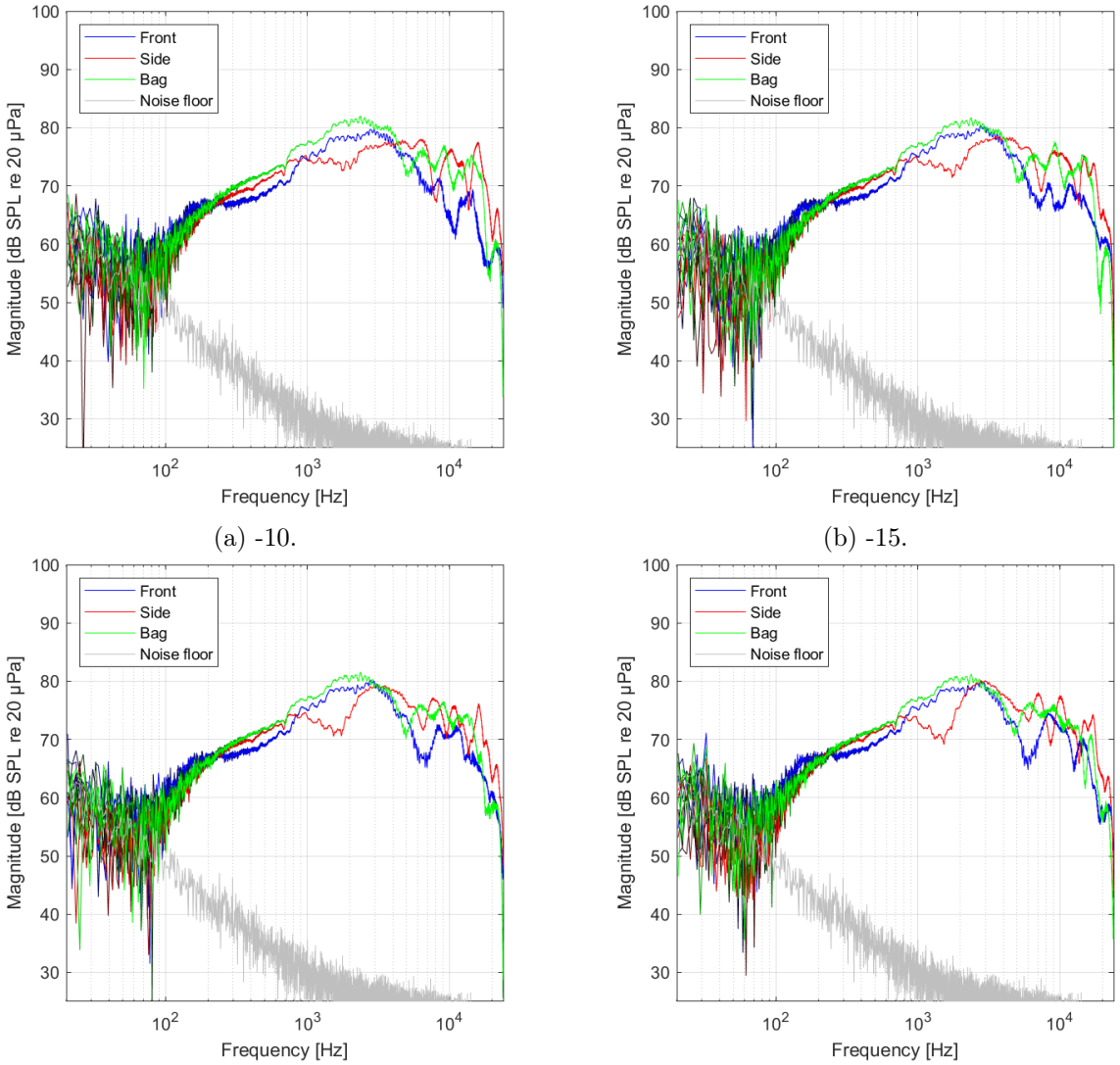
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.31: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 20 mm fra syning.

B-3



(a) -10.

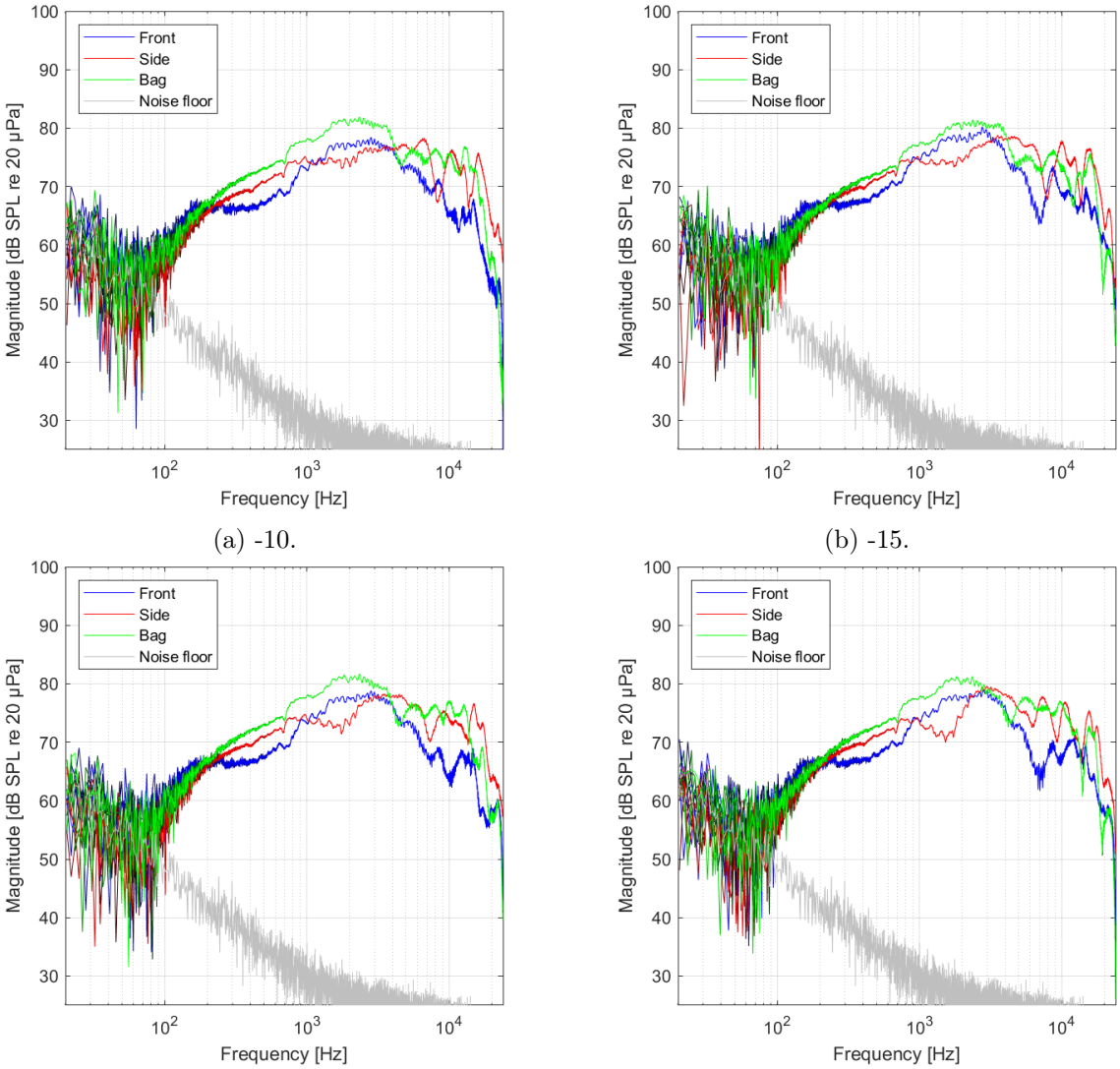
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.32: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 30 mm fra syning.

B-4



(a) -10.

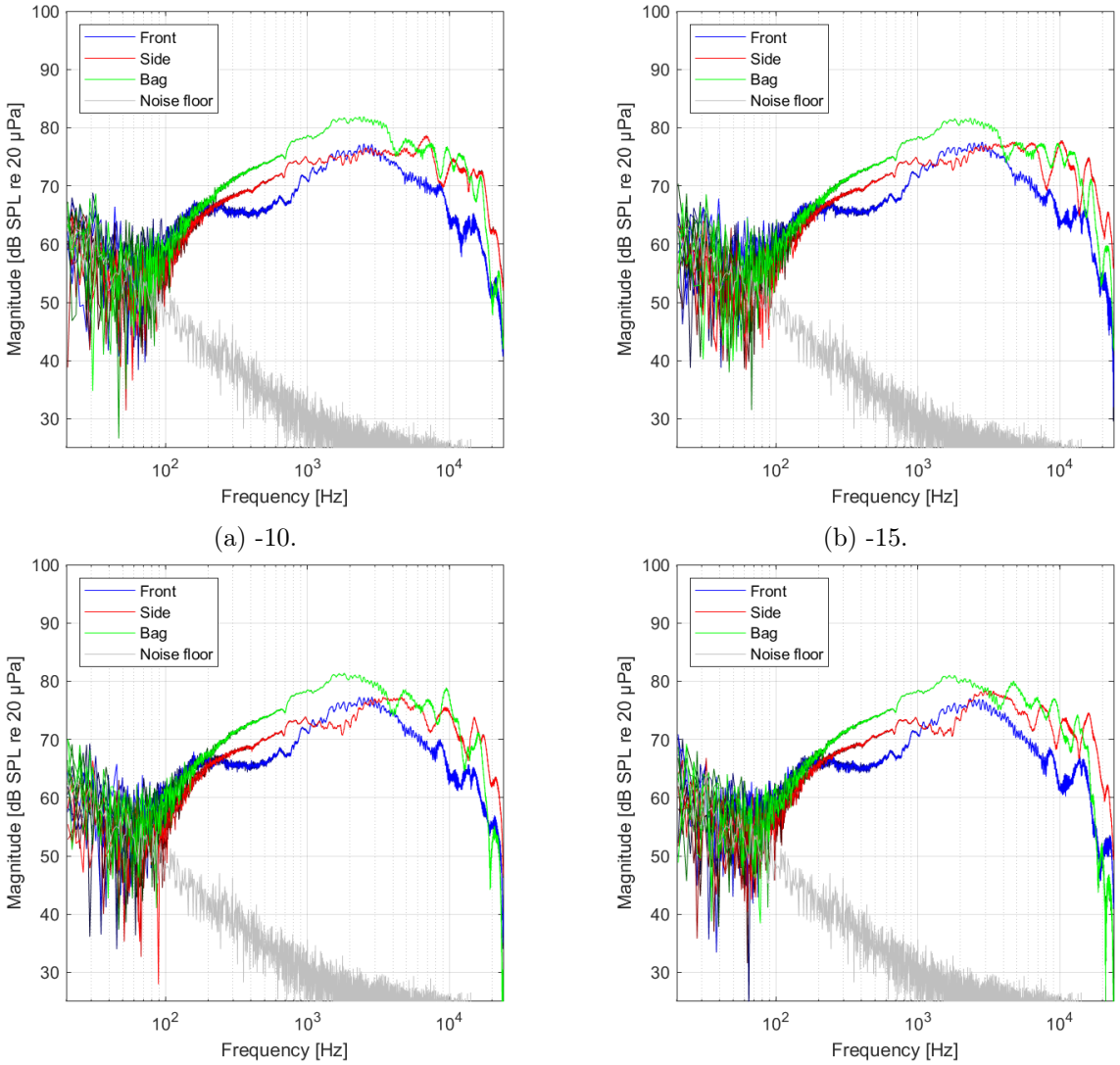
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.33: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 40 mm fra syning.

B-5



(a) -10.

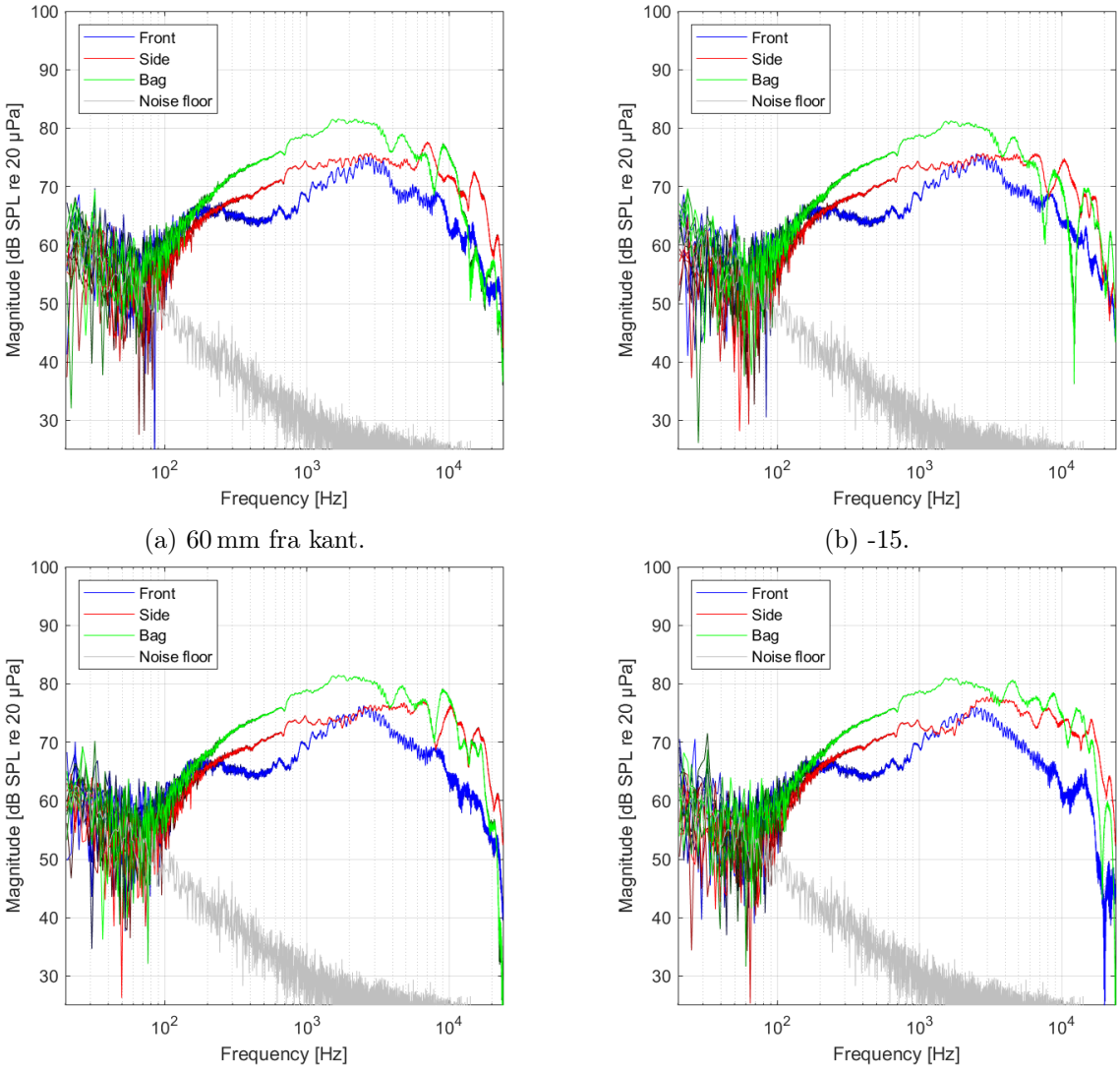
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.34: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 50 mm fra syning.

B-6



(a) 60 mm fra kant.

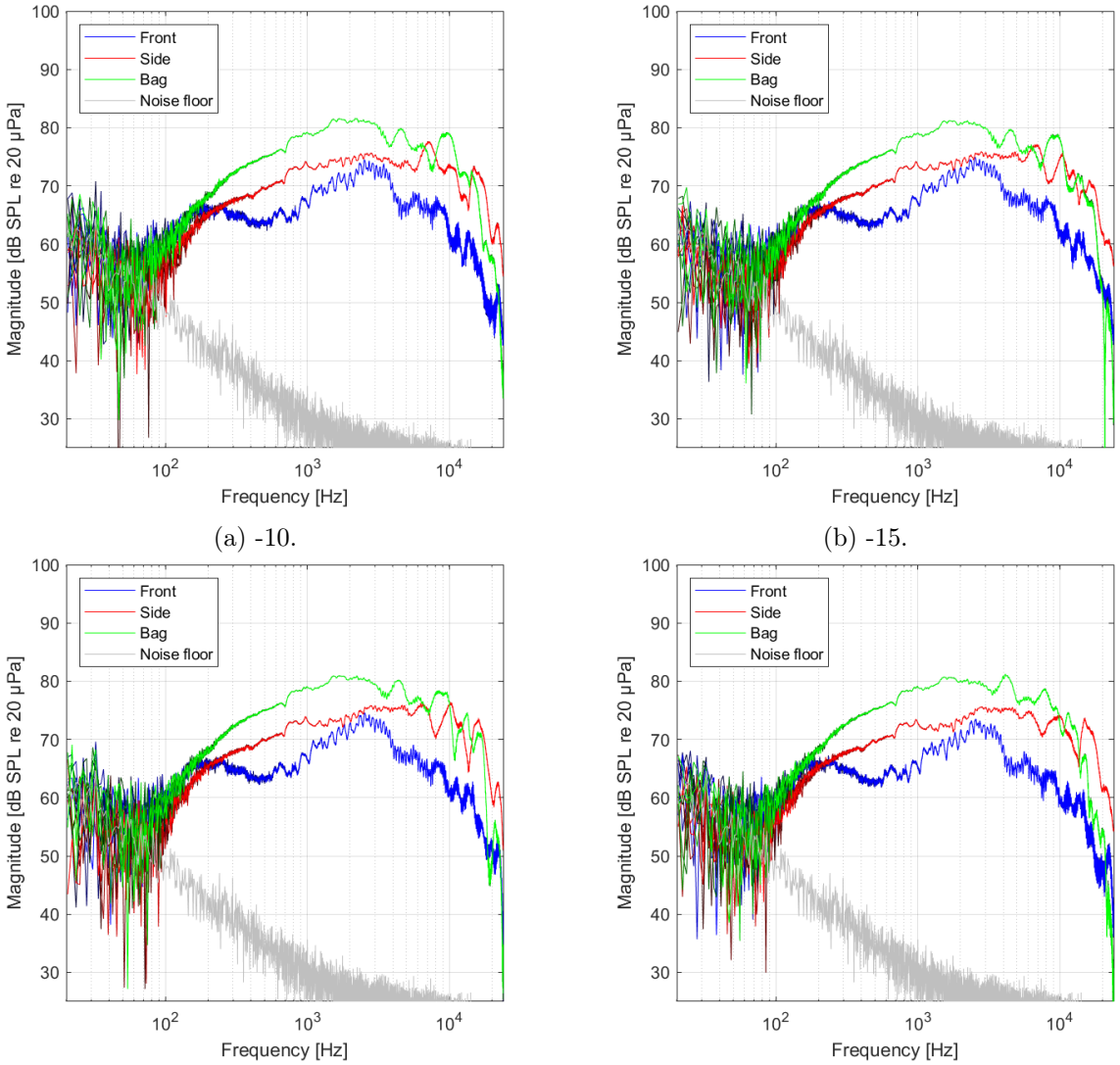
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.35: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 60 mm fra syning.

B-7



(a) -10.

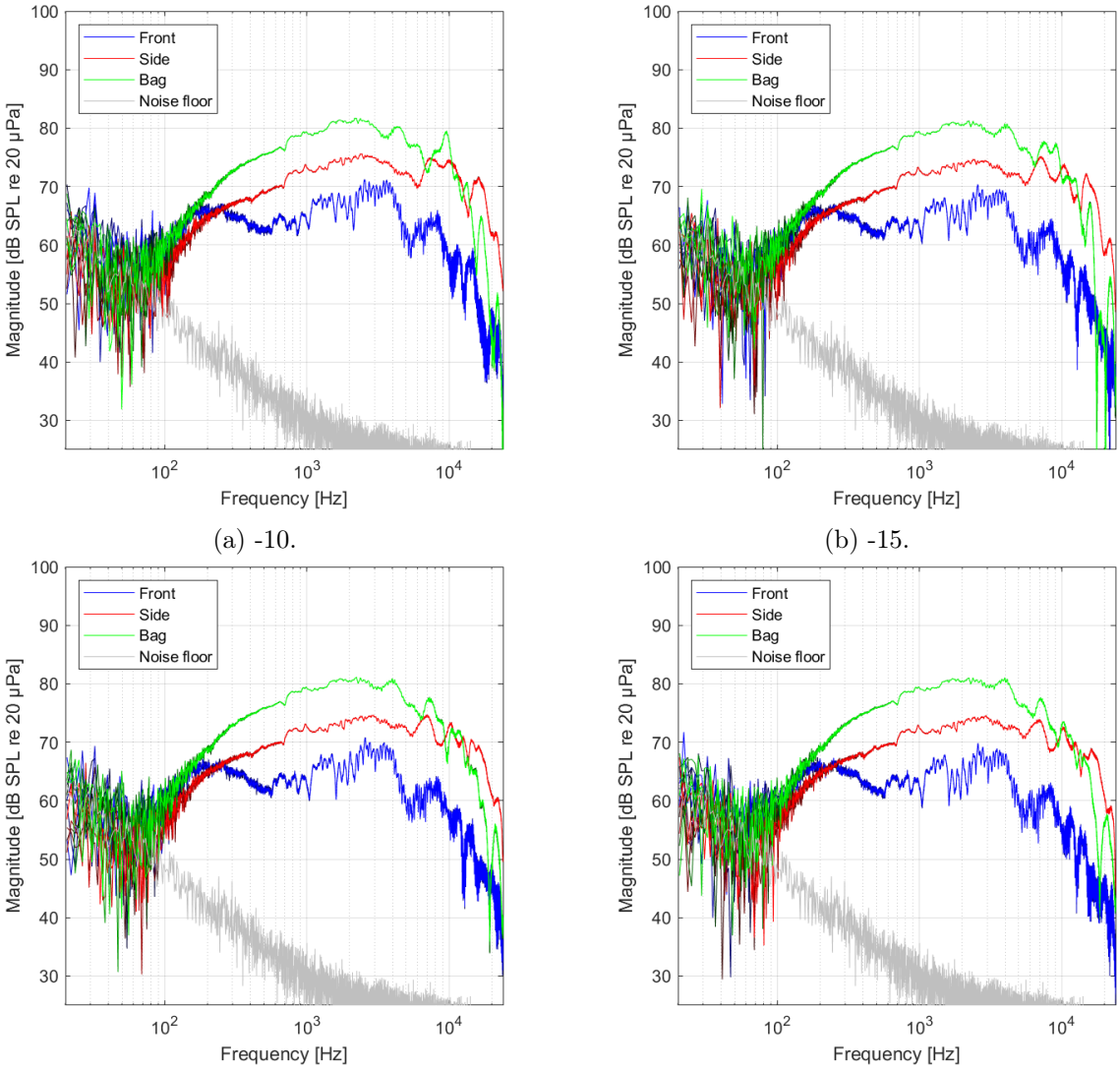
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.36: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 70 mm fra syning.

B-8



(a) -10.

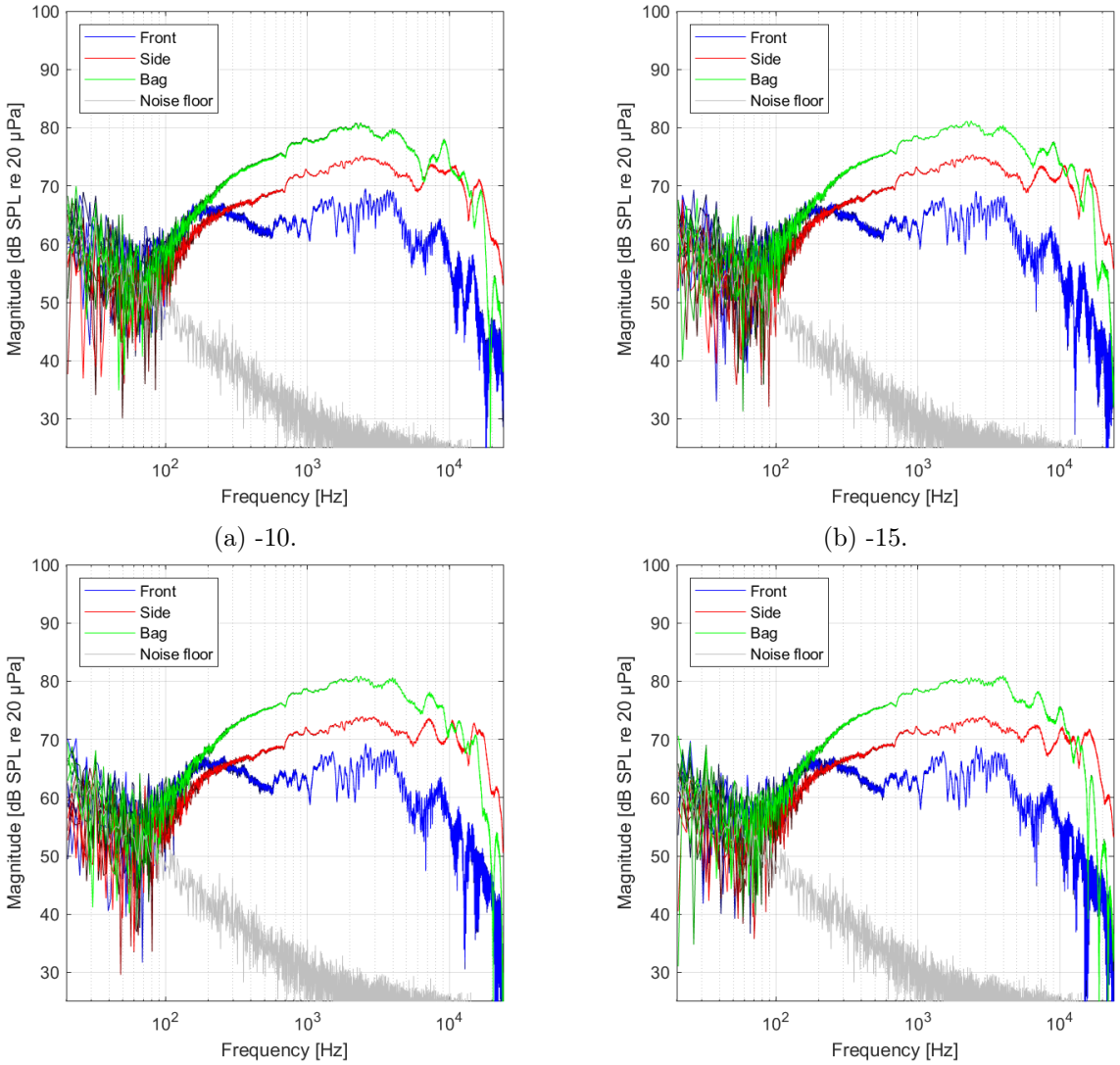
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.37: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 80 mm fra syning.

B-9



(a) -10.

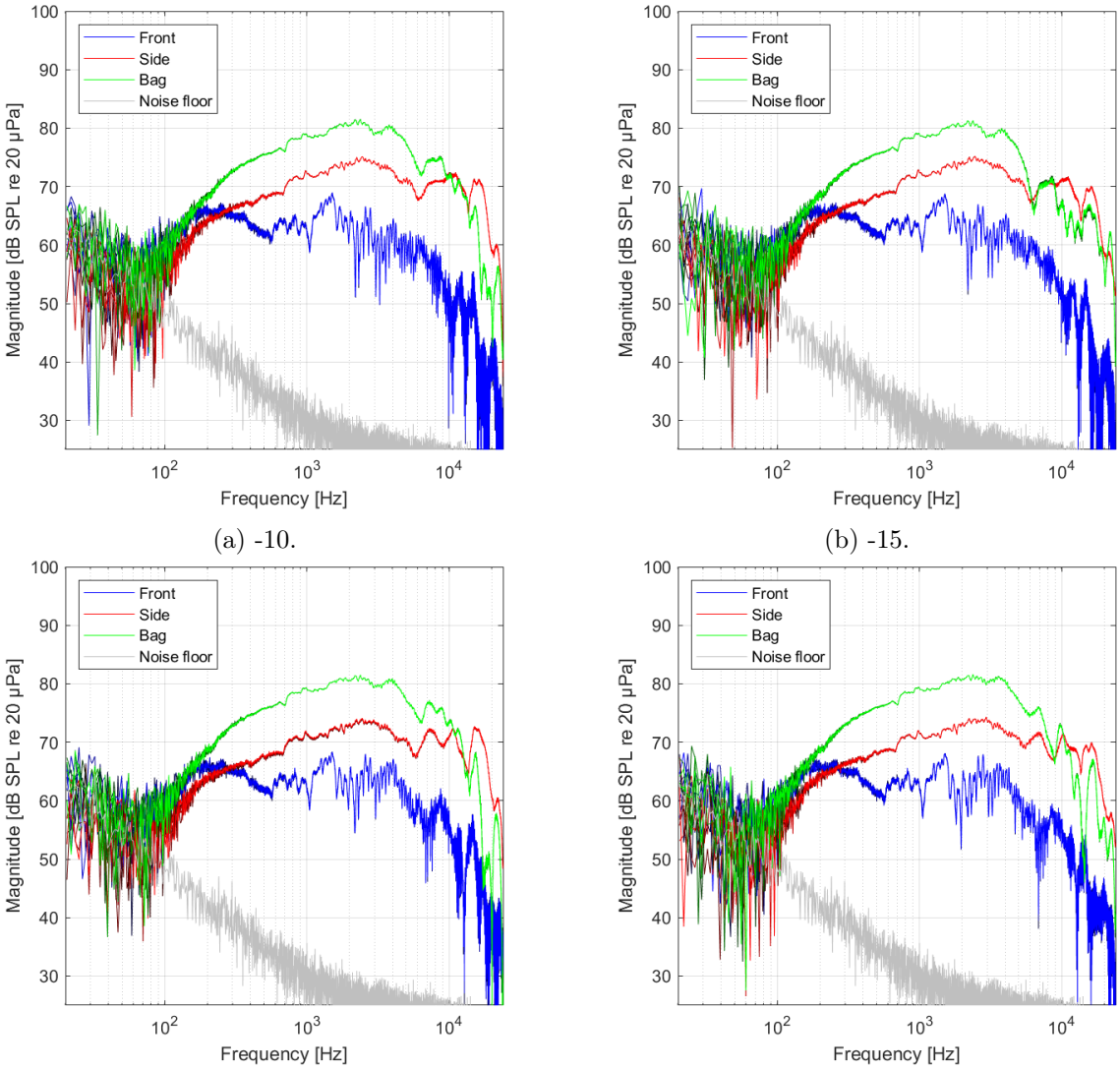
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.38: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 90 mm fra syning.

B-10



(a) -10.

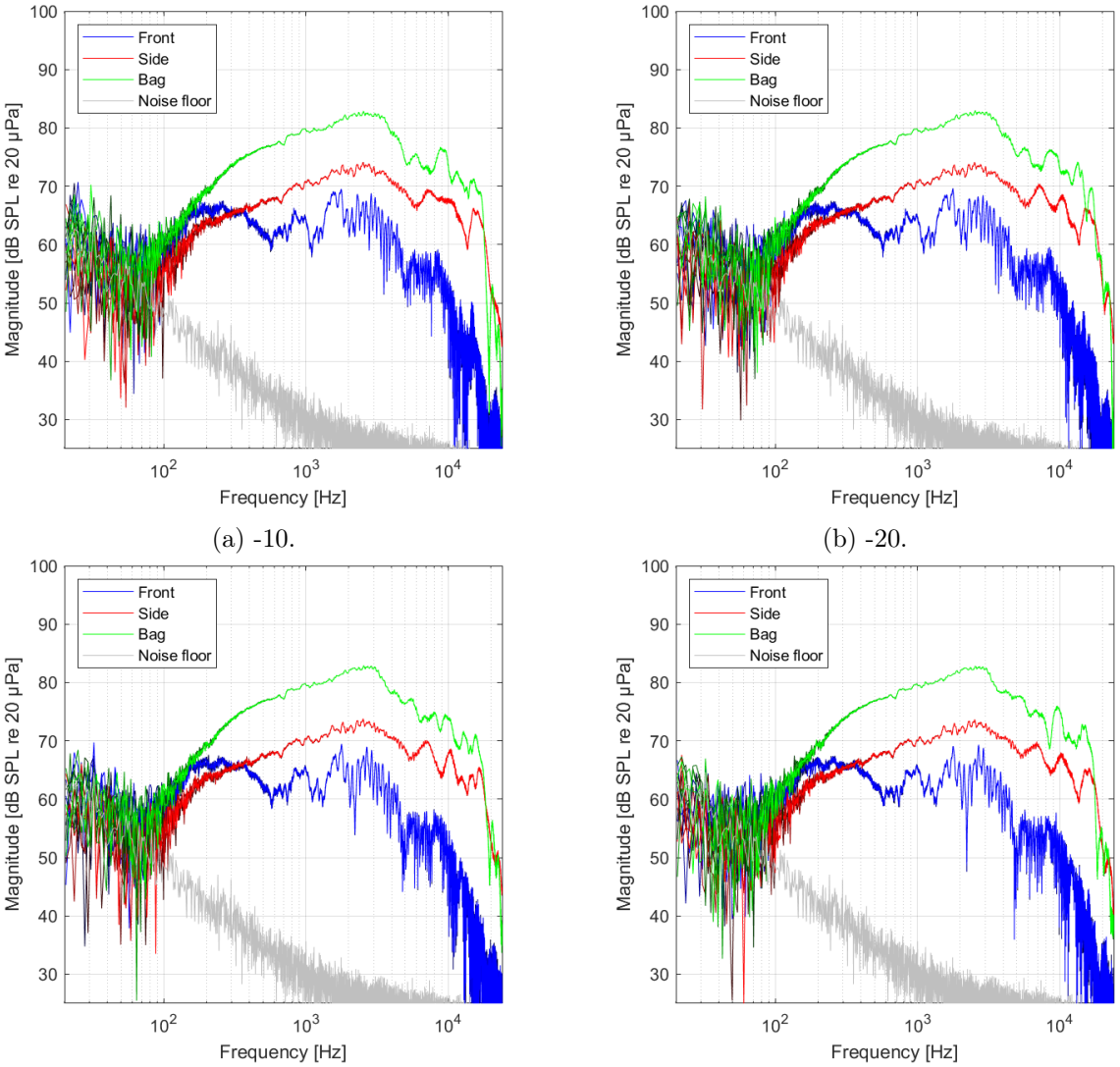
(b) -15.

(c) -20.

(d) -30.

Figur A.39: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret bag, 100 mm fra syning.

WT-0



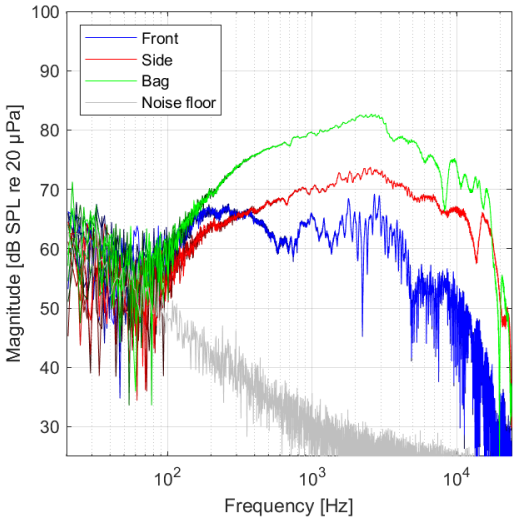
(a) -10.

(b) -20.

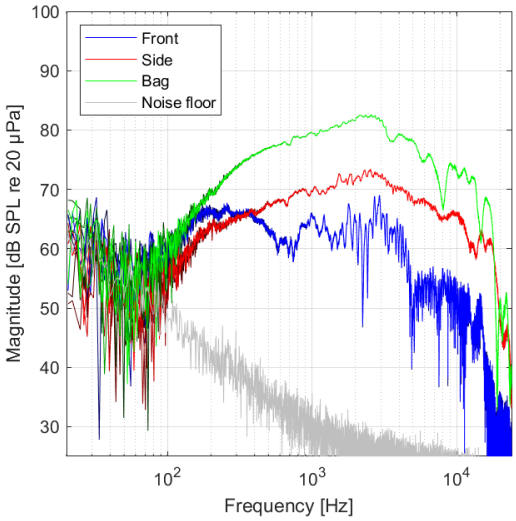
(c) -30.

(d) -40.

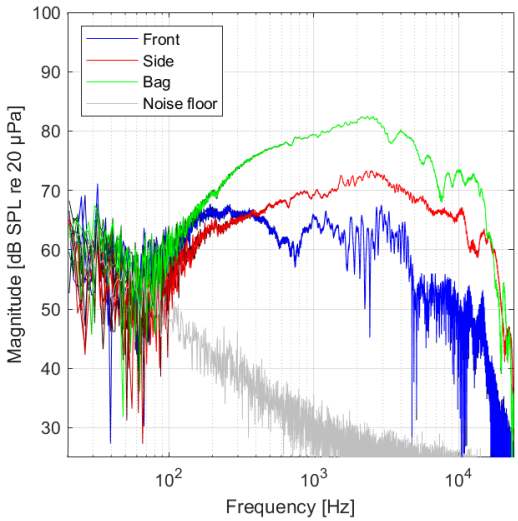
Figur A.40: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret WT, 0 mm fra centerlinje.



(a) -50.



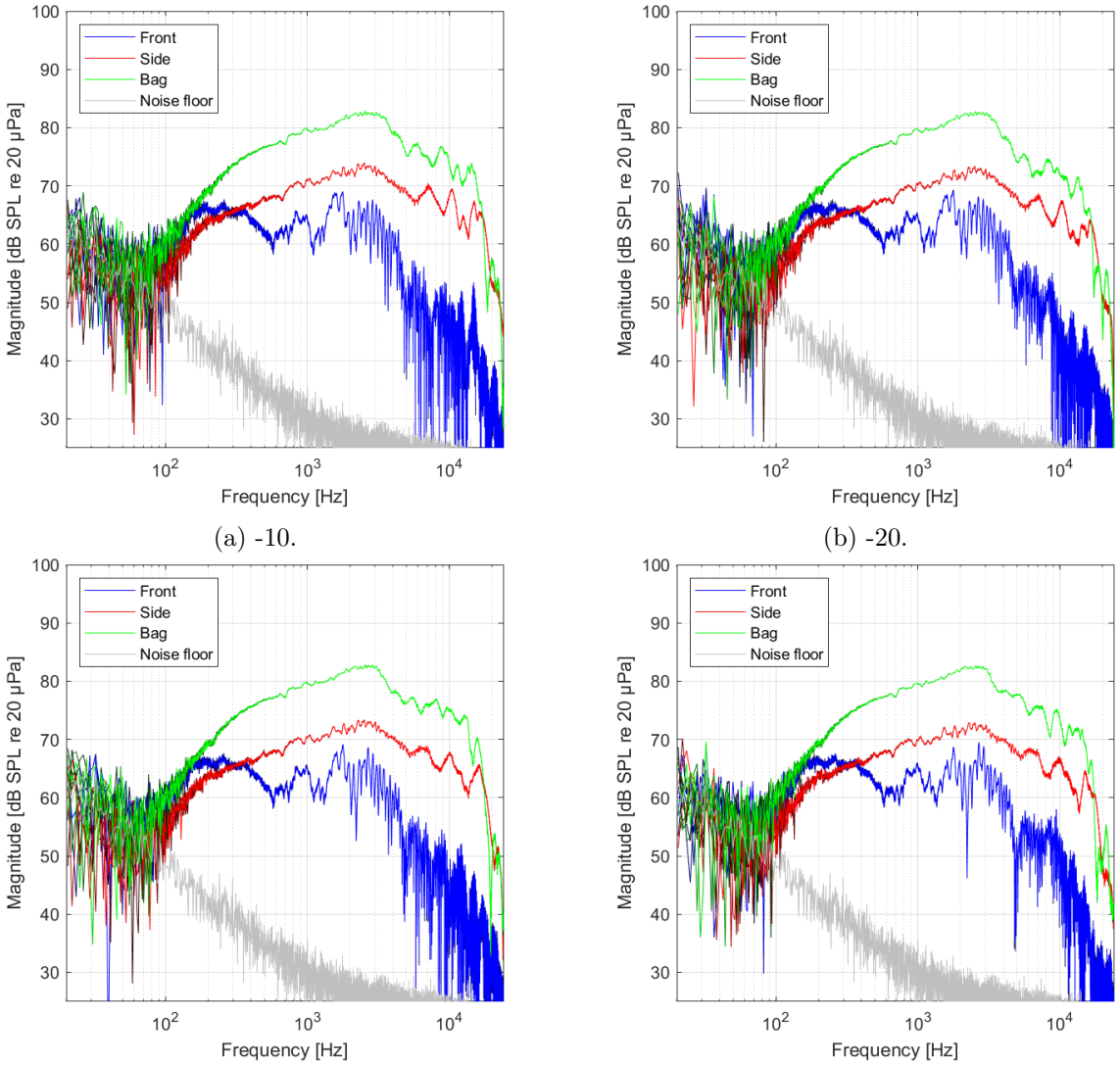
(b) -60.



(c) -70.

Figur A.41: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret WT, 0 mm fra centerlinje.

WT-1



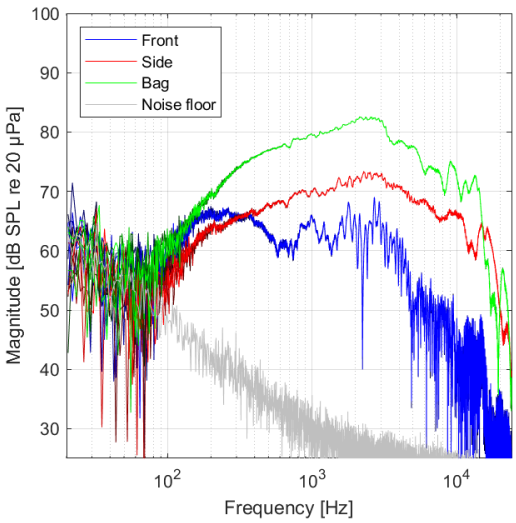
(a) -10.

(b) -20.

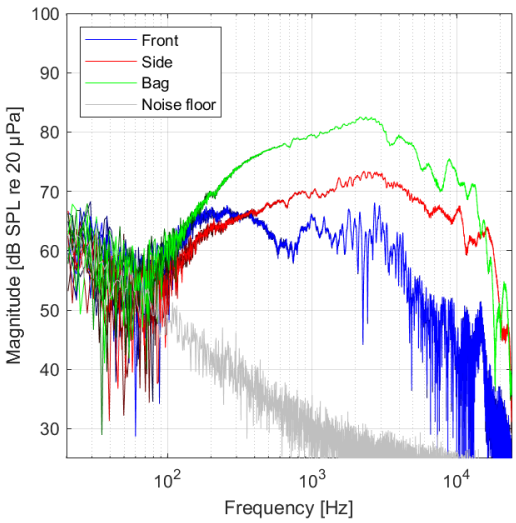
(c) -30.

(d) -40.

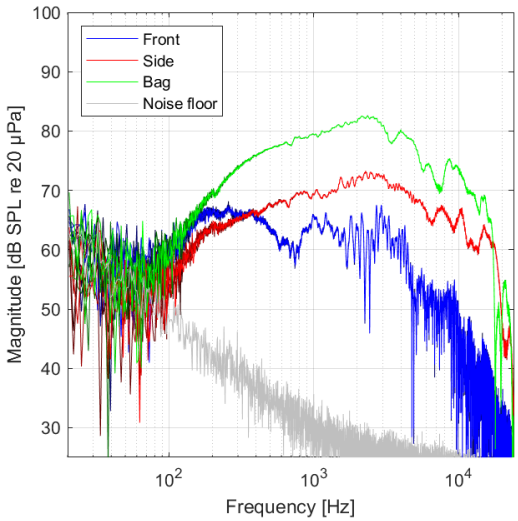
Figur A.42: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret WT, 10 mm fra centerlinje.



(a) -50.



(b) -60.



(c) -70.

Figur A.43: Frekvensrespons fra mikrofon, placeret WT, 10 mm fra centerlinje.

Måleusikkerhed

Der er kalibreret før målingerne er taget, hvor en reference mellem de 94 dB SPL fra kalibratoren og MATLABs interne lydniveausmåler på -16 dB SPL. Der er ikke blevet målt efterfølgende om kalibreringen stadigvæk stemmer overens med det målte niveau efter justeringen, ej heller er der testet om kalibreringen passer efter målingerne.

For at kunne placere HATS'en stabilt på en af platformene i det anekoiske kammer, er HATS'en placeret på et stativ. Det har ikke været muligt at låse HATS'ens rotation i forhold til beslaget, så efter ændringer i opstilling har HATS'ens orientering været tjekket ved øjemål. Ligeledes er højtalerne placeret på et stativ for at være i samme højde som øret på HATS'en. Der har ikke været brugt en vinkelmåler for at tjekke om hvor vidt højtalerne har stået i korrekt orientering i forhold til HATS'en. Til gengæld har der ikke været flyttet på stativerne under målingerne så eventuel fejl i højtalerposition er den samme for hver måling.

Mikrofonerne er forsøgt placeret på de forskellige positioner. Mikrofonen er fastmonteret til vesten med klæbemasse (elefantsnot) og er forsøgt at skærme så lidt som overhovedet muligt. Da klæbemassen kan have problemer med at hæfte til vesten, der er lavet af nylon, kan mikrofonen potentielt flytte sig under målingerne. Målinger er lavet om, hvis der har været observeret ændringer på frekvensresponsene.

Der er forsøgt isoleret eventuelle forbindelser mellem kabler og forsyninger inde i det anekoiske kammer for at undgå jord og reducere egenstøj. Ligeledes er beslagene, HATS'en er monteret på, forsøgt dæmpet med vat for at undgå fejlbidrag.

Litteratur

[1] N. Tasnim. History and FIFA Regulations of EPTS. [Online]. Available: https://sites.duke.edu/wcwp/tournament-guides/mens-world-cup-2018-guide/gear/electronic-performance-and-tracking-systems/history-and-fifa-regulations-of-epts/

[2] J. Svetlik. EPL 2030: Football's Wearable Tech Revolution Has Only Just Begun. [Online]. Available: https://bleacherreport.com/articles/2659361-epl-2030-footballs-wearable-tech-revolution-has-only-just-begun

[3] Vector. Catapult. [Online]. Available: https://www.catapultsports.com/solutions/vector

[4] IFAB. The IFAB Background. [Online]. Available: https://www.theifab.com/background/

[5] ——. Law 4 The Players' Equipment. [Online]. Available: https://www.theifab.com/laws/latest/the-players-equipment/#other-equipment

[6] DBU. §4 - Spillernes udstyr. [Online]. Available: https://www.dbu.dk/turneringer-og-resultater/love-og-regler/fodboldloven/4-spillernes-udstyr/

[7] ——. DBU's Love. [Online]. Available: https://www.dbu.dk/media/dogfwwnz/dbu-s-love-2022.pdf

[8] FIFA. EPTS Testing Process. [Online]. Available: https://www.fifa.com/technical/football-technology/standards/epts/epts-testing-process

[9] ——. Handbook of test methods for wearable EPTS devices. [Online]. Available: https://digitalhub.fifa.com/m/194e24782f329d14/original/test-manual-epts-wearables-v20.pdf

[10] ——. Handbook of test methods for EPTS devices. [Online]. Available: https://digitalhub.fifa.com/m/2f55df52fb822d86/original/2019-handbook-of-test-methods-epts.pdf

[11] Armony. Armony Ltd. [Online]. Available: https://armonysports.com/

[12] FIFA. Resource Hub. [Online]. Available: https://www.fifa.com/technical/football-technology/resource-hub?QualityProgram=6Sshn3qiYsRBq6muymEEtY&Category=21vlZTNlv31aveduLGFmDi&Type=Wearable%20System

[13] ASI. AdMosLive. [Online]. Available: https://www.asi.swiss/admoslive-2/

[14] ——. FieldWiz. [Online]. Available: https://www.asi.swiss/fieldwiz/

[15] Vector. Catapult - Specifications. [Online]. Available: https://www.catapultsports.com/solutions/vector#specifications

[16] Fitogether. OHCOACH - Fitogether. [Online]. Available: https://www.fitogether.com/

[17] O. Wolff. OWS-111535TA-8A. [Online]. Available: https://www.owolff.com/acoustics/products/speakers/find-speakers/\spacefactor\@m{}2059/ows-111535ta-8a

[18] DS/IEC, "Elektroakustik – Hoved- og øresimulatorer – Del 7: Simulator for hoved og overkrop til måling på høreapparater," Dansk Standard / International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, Standard, 2017.

[19] J. B. et al., Loudspeaker and Headphone Handbook, 3rd ed. Reed Educational and Professional, 2001.

[20] B. C. J. Moore, An Introduction to the Psychology of Hearing, 6th ed. Brill, 2013.

[21] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of signal processing research: The parametric approach," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 13, no. 4, pp. 67–94, 1996.