

# Akustisk kapasitet og akustisk regulering i serveringslokaler

**Gjermund Valdemar  
Holøyen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Anders Homb, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk





Oppgavens tittel: Akustisk kapasitet og akustisk regulering i serveringslokaler	Dato: 11.6.2017		
	Antall sider (inkl. bilag): 70		
	Masteroppgave	x	Prosjektoppgave
Navn: Gjermund Valdemar Holøyen			
Faglærer/veileder: Anders Homb			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

Ekstrakt:

Resultatene viser at det er en betydelig fordel å oppnå ved å oppholde seg nære en absorberent, og dette kommer frem både gjennom bakgrunnsstøynivået, som stiger i retning vekk fra absorberenten, og  $C50$ , som øker i retning vekk fra absorberenten. Denne fordelene er imidlertid avhengig av signal-støy-forholdet til tale- og bakgrunnsstøynivået, og det er derfor viktig at etterklangstiden holdes lav, og den akustiske kapasiteten ikke overskrideres for at dette skal være merkbart. Når disse forutsetningene er oppfylt, vil det være en fordel å plassere absorberenter langs veggene, slik at folk kan dra nytte av effekten.

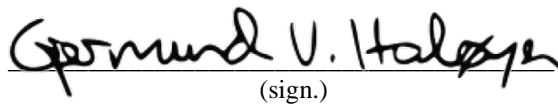
Kildens retning i forhold til absorberenten viste seg å ha nokså liten innvirkning på resultatene i frekvensområdet for menneskelig tale, men det var en tydelig forskjell å spore i de høyeste frekvensene. Absorberenten som ble brukt i målingene er en porøs absorberent, og det virker derfor sannsynlig at målinger med andre typer absorberenter vil gi større forskjeller også i andre frekvensområder.

Frekvensbegrensningen i begrepet akustisk kapasitet ble funnet å være en akseptabel begrensning i en forenklet modell som denne er. Spektralinnholdet i vanlig menneskelig tale er sterkt representert også i frekvenser godt under dette området, men dette endrer seg når Lombard-effekten setter inn. Forskjellen på Lombard-tale og vanlig tale er stor i ulike frekvenser, og det er innenfor det aktuelle området at

det er minst forskjell mellom frekvensene. Romvolumet har stor innvirkning på den akustiske kapasiteten, og dette er et problem i rom med kompleks geometri, der det er vanskelig å bestemme et eksakt volum. I slike tilfeller bør en etterstrebe å holde en konservativ linje, slik at man ikke ender opp med en for høy beregnet akustisk kapasitet, og den faktiske akustiske komforten ikke lever opp til forventningene. Om mulig bør den akustiske kapasiteten i slike rom heller bestemmes gjennom måling av bakgrunnsstøynivå når lokalet er i bruk.

Stikkord:

- |                          |
|--------------------------|
| 1. Absorberentplassering |
| 2. Akustisk kapasitet    |
| 3. Bakgrunnsstøy         |
| 4. Direktivitet          |

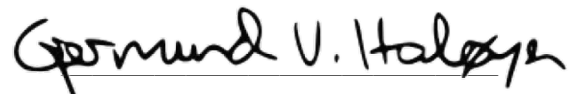
  
(sign.)



# Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Institutt for bygg- og miljøteknikk på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU, og markerer slutten på mitt masterstudium i bygg- og miljøteknikk.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Anders Homb, som har bidratt med råd og rettleiding gjennom våren, i tillegg til organisering av målinger. Jeg vil også takke Peter Svensson for nyttige bidrag i planleggingen av måleprosessen, samt Tim Cato Netland ved Institutt for elektroniske systemer og Frode Haukland ved SINTEF ITK for lån av utstyr.



Gjermund V. Holøyen



# Problembeskrivelse

For å ivareta krav i plan- og bygningsloven knyttet til universell utforming er det vesentlig å ivareta akustiske kriterier. Lydklassestandarder NS 8175 angir noen konkrete grenseverdier for etterklangstid, absorpsjonsfaktor og lydnivå som må tilfredsstillers, men for en rekke typer rom kan andre akustiske parametre være svært viktige for å være tilfredsstillende ulike brukeres behov.

Oppgaven vil omhandle akustiske kriterier som kan være viktige for kantiner, kafeer, restauranter og andre tilsvarende lokaler. Arbeidet skal legge hovedvekten på akustisk kapasitet inkludert analyser av absorbenters plassering og lydkildenes direktivitet. Metodisk skal oppgaven løses ved å gjennomføres eksperimentelle forsøk, beregninger og analyser. I tillegg bør rapporten inkludere eksempler på bruk og plassering av absorbenter i slike lokaler generelt og for noen tilgjengelige måleobjekter.





# Sammendrag

I denne masteroppgaven er det gjort undersøkelser rundt plassering av og nærhet til absorberer. Det er gjort målinger av bakgrunnsstøynivå og forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner,  $C_{50}$ , og sammen har disse to størrelsene dannet grunnlag for en vurdering av om nærhet til absorberer er fordelaktig. På bakgrunn av disse funnene er det gjort en analyse av ideell absorbererplassering. I tillegg er det gjort undersøkelser rundt frekvensbegrensningen i begrepet akustisk kapasitet, samt hvordan ulike romvolum påvirker denne kapasiteten.

Resultatene viser at det er en betydelig fordel å oppnå ved å oppholde seg nære en absorberer, og dette kommer frem både gjennom bakgrunnsstøynivået, som stiger i retning vekk fra absorbereren, og  $C_{50}$ , som øker i retning vekk fra absorbereren. Denne fordelingen er imidlertid avhengig av signal-støy-forholdet til tale- og bakgrunnsstøynivået, og det er derfor viktig at etterklangstiden holdes lav, og den akustiske kapasiteten ikke overskrides for at dette skal være merkbart. Når disse forutsetningene er oppfylt, vil det være en fordel å plassere absorberer langs veggene, slik at folk kan dra nytte av effekten.

Kildens retning i forhold til absorbereren viste seg å ha nokså liten innvirkning på resultatene i frekvensområdet for menneskelig tale, men det var en tydelig forskjell å spore i de høyeste frekvensene. Absorbereren som ble brukt i målingene er en porøs absorberer, og det virker derfor sannsynlig at målinger med andre typer absorberer vil gi større forskjeller også i andre frekvensområder.

Frekvensbegrensningen i begrepet akustisk kapasitet ble funnet å være en akseptabel begrensning i en forenklet modell som denne er. Spektralinnholdet i vanlig menneskelig tale er sterkt representert også i frekvenser godt under dette området, men dette endrer seg når Lombard-effekten setter inn. Forskjellen på Lombard-tale og vanlig tale er stor i ulike frekvenser, og det er innenfor det aktuelle området at det er minst forskjell mellom frekvensene.

Romvolumet har stor innvirkning på den akustiske kapasiteten, og dette er et problem i rom med kompleks geometri, der det er vanskelig å bestemme et eksakt volum. I slike tilfeller bør en etterstrebe å holde en konservativ linje, slik at man ikke ender opp med en for høy beregnet akustisk kapasitet, og den faktiske akustiske komforten ikke lever opp til forventningene. Om mulig bør den akustiske kapasiteten i slike rom heller bestemmes gjennom måling av bakgrunnsstøynivå når lokalet er i bruk.



# Abstract

In this master's thesis, studies have been conducted on the placement of an proximity to sound absorbers. This has been done by measurements of background noise level and the ratio between early and late reflections,  $C_{50}$ , and these two quantities have formed the basis for the assessment of whether proximity to the sound absorber is advantageous. On the back of the findings, an analysis of the ideal placement of a sound absorber has been made. In addition to this, investigations in relation to the frequency limit of the quantity acoustical capacity have been made, as well as an inquiry of how the room volume affects the acoustical capacity.

Results show that there is a significant advantage to obtain by staying close to the sound absorber. This can be seen from the background noise level, which decreases as the distance to the absorber increases, as well as from  $C_{50}$ , which increases as the distance to the absorber increases. The subjective advantage is, however, dependant on the signal-to-noise ratio of the speech and background noise levels, so it is of high importance to maintain a low reverberation time and make sure that the acoustical capacity is not exceeded. When these conditions are fulfilled, it is advisable to place sound absorbers along the walls, so that this effect can be utilised.

The direction of the source in relation to the sound absorber was shown to have little influence on the results in the frequency range of human speech. There was, however a clear difference between directions in the two highest 1/1-octave bands, and it seems fair to expect different results with a different kind of sound absorber.

The frequency limit of the quantity acoustical capacity seems to be a sensible choice for a simplified model like this. The spectral content of regular human speech is well represented below the given range, but the spectral content is significantly altered when the Lombard effect starts to work. The difference between Lombard speech and regular speech is variable from frequency to frequency, and it is inside the range in question that the variations are smallest.

The room volume has a significant influence on the acoustical capacity. This is a problem in rooms with a complex geometry, where it can be troublesome to define an exact volume. In cases like this, a conservative approach is recommended to make sure that the calculated acoustical capacity is not overestimated. If possible, the acoustical capacity in rooms with a complex geometry should be determined through background noise level measurements when the room is in regular use.



# Innhold

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Problembeskrivelse</b>	<b>iii</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Innhold</b>	<b>xi</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xiii</b>
<b>Figurer</b>	<b>xv</b>
<b>Symboler og akronymer</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn for oppgaven . . . . .	1
1.2 Tidligere arbeid . . . . .	2
1.3 Praktisk tilnærming til problembeskrivelsen . . . . .	2
1.4 Oppgavens oppbygning . . . . .	3
<b>2 Teori</b>	<b>5</b>
2.1 Lydtrykk og lydtryknivå . . . . .	5
2.2 Absorpsjon av lyd . . . . .	6
2.2.1 Porøse absorbenter . . . . .	6
2.2.2 Resonansabsorbenter . . . . .	6
2.2.3 Luftabsorpsjon . . . . .	7
2.3 Diffuse lydfelt . . . . .	7
2.4 1/1- og 1/3-oktavgbånd . . . . .	7
2.5 Etterklangstid . . . . .	8
2.5.1 Sabines formel . . . . .	9
2.6 Egenskaper ved menneskelig tale . . . . .	9
2.6.1 Spektralt innhold . . . . .	9
2.6.2 Direktivitet . . . . .	11
2.7 Lombard-effekten . . . . .	14

2.8	Akustisk kapasitet . . . . .	15
2.9	Romakustiske parametre . . . . .	16
2.9.1	Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner . . . . .	16
2.9.2	Forholdet mellom nyttig og unyttig lydenergi . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Metode og utstyr</b>	<b>19</b>
3.1	Måleobjekt . . . . .	19
3.2	Måling av bakgrunnsstøy . . . . .	20
3.3	Måling av impulsrespons . . . . .	21
3.3.1	Måling på tvers av rommets lengderetning . . . . .	22
3.3.2	Måling langsmed rommets lengderetning . . . . .	22
3.4	Etterbehandling av måledata . . . . .	23
3.5	Beregning av akustisk kapasitet i Realfagskantina . . . . .	28
3.6	Utstyr . . . . .	30
3.6.1	Utstyrsliste . . . . .	30
3.6.2	Direktivitet til TalkBox . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>33</b>
4.1	Bakgrunnsstøynivå . . . . .	33
4.2	Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner . . . . .	35
4.3	Forholdet mellom nyttig og unyttig lydenergi . . . . .	40
4.4	Resultater i frekvensområdet 500 – 1000 Hz . . . . .	44
4.5	Akustisk kapasitet ved ulike volum . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>47</b>
5.1	Bakgrunnsstøynivå . . . . .	47
5.2	Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner . . . . .	48
5.2.1	Påvirkning av nærhet til absorberende . . . . .	49
5.2.2	Kildens retning i forhold til absorberende . . . . .	50
5.3	Fordel ved nærhet til absorberende flate . . . . .	51
5.4	Optimal plassering av absorberende . . . . .	51
5.5	Praktiske løsninger . . . . .	52
5.6	Vurdering opp mot akustisk kapasitet . . . . .	54
5.7	Frekvensområde ved beregning av akustisk kapasitet . . . . .	56
5.8	Volumets innvirkning på den akustiske kapasiteten . . . . .	58
5.9	Feilkilder . . . . .	59
5.10	Videre arbeid . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografi</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Matlab-skript og -funksjoner</b>	<b>67</b>
A.1	Skript for beregning av bakgrunnsstøynivåer . . . . .	67
A.1.1	Funksjon for behandling av rådata . . . . .	67
A.2	Skript for plotting og beregning av C50 . . . . .	67

A.3	Skript for plotting og beregning av U50 . . . . .	67
A.4	Skript for analyse mot akustisk kapasitet . . . . .	67
A.4.1	Skript for polynomtilnærming . . . . .	67
A.5	Skript for beregning av akustisk kapasitet ved ulike volum . . . . .	68
A.6	Skript for lineær interpolasjon av måleresultater . . . . .	68
A.7	Skript for plotting av menneskelig direktivitet . . . . .	68
<b>B</b>	<b>Måledata</b>	<b>69</b>
B.1	Måling av bakgrunnsstøynivå . . . . .	69
B.2	Måling av impulsrespons . . . . .	70
B.3	Måling av etterklangstid . . . . .	70





# Tabeller

2.1	Senter- og grensefrekvenser for utvalgte 1/1- og 1/3-oktavbånd [8]. . .	8
2.2	Krav til etterklagstid gitt i NS 8175:2012 [7]. . . . .	8
3.1	Utstyrliste . . . . .	30
4.1	$C_{50}$ beregnet utfra (4.1). . . . .	35
4.2	Akustisk kapasitet i Realfagskantina ved ulike volumavgrensninger. .	45
5.1	Sammenheng mellom $SNR$ og $E_{BL}/E_{SL}$ . . . . .	55



# Figurer

2.1	Gjennomsnittlig A-vektet spektralt innhold hos menn og kvinner [9].	9
2.2	Spektralt innhold ved ulike talenivåer hos en mannsperson [9]. . . . .	10
2.3	Forskjell mellom fransk og engelsk hos en kvinnelig taler [9]. . . . .	10
2.4	A-vektet, horisontal direktivitet hos kvinner og menn [9]. . . . .	11
2.5	A-vektet, vertikal direktivitet hos kvinner og menn [9]. . . . .	12
2.6	A-vektet, horisontal direktivitet ved ulike talenivåer hos menn [9]. . .	12
2.7	Menneskelig direktivitet fra 160 Hz til 5 kHz [9]. . . . .	13
2.8	Endring av stemmens spektrale innhold når Lombard-effekten setter inn [13]. . . . .	14
2.9	Skala for vurdering av $C_{50}$ [21]. . . . .	17
3.1	Kantina på SINTEF Byggforsk ble brukt som måleobjekt [26]. . . . .	20
3.2	Oversiktsbilde av måleobjektet. . . . .	21
3.3	Etterklangstiden i måleobjektet [25]. . . . .	22
3.4	Måleoppsett for måling av bakgrunnsstøynivå. . . . .	23
3.5	Måleoppsett for første måleserie med impulsrespons. . . . .	24
3.6	Måleoppsett for andre måleserie med impulsrespons. . . . .	25
3.7	Måleoppsett for tredje måleserie med impulsrespons. . . . .	26
3.8	Måleoppsett for fjerde måleserie med impulsrespons. . . . .	27
3.9	Impulsresponsmåling i rommets lengderetning. . . . .	27
3.10	Utsnitt av plantegning av Realfagsbyggets 1. etasje [28]. . . . .	28
3.11	Skissert oppdeling av Realfagskantina og områdene rundt. . . . .	29
3.12	Direktivitet til TalkBox fra 100 Hz til 5 kHz [29]. . . . .	31
4.1	Bakgrunnsstøynivå som funksjon av avstand fra absorberent. . . . .	34
4.2	Bakgrunnsstøynivå som funksjon av frekvens. . . . .	34
4.3	$C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent. . . . .	35
4.4	$C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent, med kilden rettet mot absorbenten. . . . .	36
4.5	$C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent, med kilden rettet vekk fra absorbenten. . . . .	36
4.6	Polarplott av $C_{50}$ i 1/1-oktavbåndet 125 Hz. . . . .	37
4.7	Polarplott av $C_{50}$ i 1/1-oktavbåndet 250 Hz. . . . .	37
4.8	Polarplott av $C_{50}$ i 1/1-oktavbåndet 500 Hz. . . . .	38
4.9	Polarplott av $C_{50}$ i 1/1-oktavbåndet 1 kHz. . . . .	38

4.10	Polarplott av $C_{50}$ i 1/1-oktavbåndet 2 kHz. . . . .	39
4.11	Polarplott av $C_{50}$ i 1/1-oktavbåndet 4 kHz. . . . .	39
4.12	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 125 Hz. . . . .	40
4.13	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 250 Hz. . . . .	41
4.14	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 500 Hz. . . . .	41
4.15	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 1 kHz. . . . .	42
4.16	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 2 kHz. . . . .	42
4.17	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 4 kHz. . . . .	43
4.18	$U_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent. . . . .	43
4.19	Bakgrunnsstøynivå og $C_{50}$ som funksjon av avstand fra absorberent, midlet over 1/1-oktavbåndene 500 Hz og 1 kHz. . . . .	44
4.20	Fjerdegrads tilnærming av figur 4.19. . . . .	44
4.21	Signal-støy-forhold i rommet, midlet over 1/1-oktavbåndene 500 Hz og 1 kHz. . . . .	45
5.1	Forholdet mellom $Q$ og $C_{50}$ , beregnet etter (2.16). . . . .	49
5.2	Eksempel på kombinasjon av vinduer og spaltepanel. . . . .	53
5.3	Eksempel på bruk av høye sofagrupper som supplerende absorberent. . . . .	53
5.4	Eksempel på plassering av absorberenter i et L-formet rom. . . . .	54
5.5	Hvordan $C_{50}$ påvirker $U_{50}$ ved et signal-støy-forhold på $-3$ dB. . . . .	55
5.6	Signal-støy-forholdets påvirkning på $U_{50}$ ved $C_{50} = 10$ dB. . . . .	56
5.7	Målt etterklangstid i fire kantiner i Trondheim [25]. . . . .	57
B.1	Benevnning av måleposisjoner. . . . .	69



# Symboler

Symbol	Forklaring	Enhet
$A$	Absorpsjonsareal	$m^2$
$BL$	Bakgrunnsstøynivå	dB
$c$	Lombard-helningen	dB/dB
$C_B$	Barron-kurven	dB
$C_{te}$	Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner	dB
$E$	Energi	J
$f$	Frekvens	Hz
$f_c$	Senterfrekvens	Hz
$f_l$	Nedre grensefrekvens	Hz
$f_s$	Schroeder-frekvensen	Hz
$f_u$	Øvre grensefrekvens	Hz
$g$	Gruppestørrelse	
$h$	Høyde	m
$h$	Relativ luftfuktighet	%
$L_{N,A}$	Bakgrunnsstøynivå	dB
$L_p$	Lydtrykknivå	dB
$L_{S,A,1\text{ m}}$	Talenivå på 1 m avstand	dB
$m$	Luftabsorpsjonskoeffisient	
$N$	Antall personer i lokalet	
$N_{\max}$	Akustisk kapasitet	
$N_S$	Antall talende personer	
$p$	Lydtrykk	Pa
$r$	Avstand mellom kilde og mottaker	m
$S$	Flateareal	$m^2$
$SL$	Talenivå	dB
$SNR$	Signal-støy-forhold	dB
$t$	Grenseverdi for tidlige refleksjoner	s
$t_e$	Grenseverdi for tidlige refleksjoner	ms
$T$	Etterklangstid	s
$T$	Tidsintervall	s
$U_{te}$	Forholdet mellom nyttig og unyttig energi	dB
$V$	Volum	$m^3$
$\alpha$	Absorpsjonskoeffisient	
$\lambda$	Bølgelengde	m

# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn for oppgaven

Dårlig romakustikk er et utbredt problem, og kan være til sjenanse for noen og enhver. Problemet er ofte særlig stort i serveringslokaler, der mange personer rundt omkring i lokalet snakker samtidig. Blir det for mange personer i lokalet blir bakgrunnsstøynivået så høyt at den såkalte Lombard-effekten slår inn, og lydtryknivået i rommet øker ytterligere. Denne effekten danner bakgrunn for begrepet akustisk kapasitet, som angir hvor mange personer som maksimalt kan oppholde seg i et rom samtidig som den akustiske komforten holdes på et visst nivå.

I prinsippet kan dette forenkles til at lav etterklangstid gir høy akustisk kapasitet, og derav høy akustisk komfort når antallet mennesker i rommet er under denne kapasiteten. Det er imidlertid flere hensyn som må tas, blant annet med tanke på prinsippet om universell utforming. Tar man hensyn til hørselshemmede alene, vil det være fordelaktig å tilstrebe så lav etterklangstid som mulig, men om man også tar hensyn til synshemmede vil det være lite heldig, da denne gruppen benytter seg av refleksjoner for å orientere seg i et rom.

Under antakelsen om diffust lydfelt ligger det at absorberens plassering er likegyldig, og derfor er himlingen mye brukt til dette formålet. Det er ingen grunn til at man bør gå bort fra å benytte lydabsorberende himling, men det er interessant å undersøke hvorvidt nærhet til absorberenten har noen innvirkning på den akustiske komforten. En lydabsorberende himling bidrar unektelig til bedret akustisk komfort, men dersom det viser seg at nærhet til absorberenten er fordelaktig, betyr det at vegger er undervurdert som absorberende flate, og valg av kledning i et rom bør hvis så er tilfelle skreddersys etter hvor det forventes at folk vil oppholde seg.

I så fall vil det være mulig å oppnå høyere akustisk komfort i et rom enn det etterklangstiden tilsier. Det vil være et godt kompromiss, der forholdene for hørselshemmede er tilfredsstillende, samtidig som det er nok reflekterende flater i rommet til at synshemmede kan orientere seg. I tillegg vil det fra estetiske og økonomiske ståsted

være gunstig at absorbentbruken til en viss grad kan begrenses uten at den akustiske komforten svekkes.

## 1.2 Tidligere arbeid

Det er gjort forholdsvis lite tidligere arbeid rundt optimal absorbentplassering. K. Saska, J. Botts og L. Savioja utarbeidet i 2014 en modell for dette basert på strålegangsberegninger, og konkluderte med at modellen var brukbar også for virkelige scenarier [1]. J. S. Bradley, H. Sato og M. Picard undersøkte på sin side viktigheten av tidlige refleksjoner for god taleoppfattbarhet. De fant at tidlige refleksjoner har en stor betydning, og kan øke det effektive, A-veide signal-støy-forholdet med opptil 9 dB [2].

L. M. Wang og M. C. Vigeant undersøkte i 2006 betydningen av kildens direktivitet på ulike romakustiske parametre. De fant at direktiviteten hadde en viss innvirkning på måleresultatene, men at testsubjektene i liten grad oppfattet dette gjennom auralisering [3]. J. Peng, T. Wang og S. Wu gjorde en liknende måling noen år senere, der de undersøkte effekten av kildens direktivitet på taleoppfattbarheten av kinesisk. De gjorde målinger i to ulike rom, og fant at direktiviteten hadde stor betydning i det ene rommet, men ikke i det andre. De gjorde også simuleringer, og fikk gode samsvar mellom målte og simulerte resultater [4].

## 1.3 Praktisk tilnærming til problembeskrivelsen

Opgaven vil bli besvart ved hjelp av målinger, som sammen med et teoretisk grunnlag og relevant litteratur skal legges til grunn for aktuelle vurderinger. Målingene skal gjennomføres i kantina på SINTEF Byggforsk, som har en godt egnet geometri og eksisterende absorbentplassering. I tillegg plages brukerne av rommet ofte av høyt støynivå når det er mye folk der, og dette gjør at rommet egner seg godt som måleobjekt i denne sammenhengen. Formålet med målingene skal være å kartlegge hvordan lydforholdene i rommet endrer seg med avstand til absorbenten som er plassert på den ene kortveggen, og på bakgrunn av måleresultatene skal det vurderes hvorvidt lydforholdene vil være bedre i nærheten av absorbenten.

Denne informasjonen skal brukes til å utarbeide forslag til effektiv absorbentplassering, både i form av generelle betraktninger og spesifikke forslag. Det skal også gjøres en vurdering opp mot begrepet akustisk kapasitet, i tillegg til at usikkerhetsmomenter rundt frekvensbegrensning og romvolum i tilknytning til dette begrepet skal analyseres nærmere.



## 1.4 Oppgavens oppbygning

I kapittel 2 vil nødvendig teoretisk bakgrunn bli presentert. Dette inkluderer grunnleggende romakustikk, såvel som mer avanserte romakustiske parametre. Begrepet akustisk kapasitet vil bli forklart, og menneskets direktivitet og det spektrale innhold i menneskelig tale vil bli presentert. Kapittel 3 beskriver måleprosedyren og måleobjektet i detalj, i tillegg til en liste over alt utstyr som er benyttet. I dette kapitlet vil det også bli gitt en beskrivelse av beregningsmetoder som ikke er dekket i kapittel 2. Alle resultater fra beregninger og målinger er presentert i kapittel 4, i form av tabeller og plott. I kapittel 5 vil det bli diskusjon av disse resultatene, og dette danner grunnlag for forslag til god absorbentplassering. I dette kapitlet vil det også bli foretatt en vurdering av resultatene opp mot begrepet akustisk kapasitet, samt en analyse av enkelte usikkerhetsmomenter rundt dette begrepet. Oppgaven avsluttes med konklusjonen i kapittel 6.



# Kapittel 2

## Teori

Dette kapittelet omhandler de likninger og den informasjon som anses som relevant for oppgaven. I avsnitt 2.1 blir det gitt en kort innføring i beregning av lydtryknivå, mens avsnitt 2.2 omfatter forhold knyttet til absorpsjon av lyd. I avsnitt 2.3 gis det en innføring i antakelsen om diffust lydfelt. Senter- og grensefrekvenser for de mest relevante 1/1- og 1/3-oktavbåndene presenteres i avsnitt 2.4, mens avsnitt 2.5 tar for seg etterklangstid. Avsnitt 2.6 dekker spektralt innhold og direktivitet i menneskelig tale, og Lombard-effekten presenteres i avsnitt 2.7. I avsnitt 2.8 gis det en innføring i begrepet akustisk kapasitet, mens de romakustiske parametrene  $C_{50}$  og  $U_{50}$  presenteres i avsnitt 2.9.

### 2.1 Lydtrykk og lydtryknivå

De to viktigste størrelsene for analyse av lyd, er lydtrykk,  $p$ , og lydtryknivå,  $L_p$ . Lydtrykket er en funksjon av posisjon, tid og frekvens, og svinger mellom en positiv og en negativ verdi. Det er derfor vanlig å angi lydtrykket som rms-verdi, det vil si et kvadratisk gjennomsnitt over et visst tidsintervall [5]:

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(x,t) dt. \quad (2.1)$$

Lydtrykket kan i teorien variere fra uendelig lite til uendelig stort, og  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa anses som det laveste lydtrykk et menneske kan høre. Ettersom lydtrykket spenner over et så stort intervall, er det vanlig å regne det om til den logaritmiske størrelsen lydtryknivå,

$$L_p = 10 \log \left( \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right), \quad (2.2)$$

der  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ , som er en standardisert referanseverdi for lyd i luft. Lydtryknivået angis i dB [5].

## 2.2 Absorpsjon av lyd

Hver gang en lydbølge treffer en flate, vil noe av energien absorberes, mens noe reflekteres. Absorpsjonskoeffisienten,  $\alpha$ , er et tall mellom 0 og 1, og forteller hvor stor andel av lyden som absorberes når lydbølgen treffer en flate og reflekteres. Denne koeffisienten inkluderer også det som transmitteres *gjennom* veggen. I romakustiske beregninger brukes som regel absorpsjonsarealet,  $A$ , som er summen av hver enkelt flates absorpsjonskoeffisient multiplisert med flatens areal [6]:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i. \quad (2.3)$$

Videre vil et roms gjennomsnittlige absorpsjonskoeffisient være lik

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i. \quad (2.4)$$

### 2.2.1 Porøse absorbenter

Den vanligste typen lydabsorbent er porøse absorbenter, som mineralull, plastikk-skum eller tøy. Det er denne typen absorbent som benyttes for eksempel i et lyd-studio, og det er også vanlig å bruke mineralull som lydisolasjon mellom to rom. Absorbentens virkemåte gjør at den er mest effektiv  $\lambda/4$  unna den reflekterende flaten, og for en lydbølge med frekvens 100 Hz tilsvarer dette om lag 85 cm. Et så tykt lag mineralull vil være både dyrt og uhensiktsmessig, og brukes derfor bare i spesialtilfeller, som ekkofrie rom. Et alternativ er å montere et tynnere lag mineralull en viss avstand fra veggen, men også dette er av arealeffektivitetshensyn lite hensiktsmessig [5].

### 2.2.2 Resonansabsorbenter

Bedre egnet til å absorbere lavfrekvente lydbølger er resonansabsorbenter. Denne typen absorbenter vil være på sitt mest effektive rundt en resonansfrekvens som avhenger helt og holdent av absorbentens egen oppbygning. Det er derfor mulig å tilpasse slike absorbenter etter hvilket frekvensområde det er behov for ytterligere absorpsjon. Denne typen absorbenter er som regel bygget opp som en delvis åpen flate med et hulrom bak, og er mye brukt i himlinger, men også som spalteledning på vegg. Hulrommet kan fylles med mineralull for å gi absorpsjon i et bredere frekvensområde. Bygningsplater montert på stendere vil også fungere som resonansabsorbent. Disse virker best i de laveste frekvensene, og er ikke særlig effektive, men fordi de ofte finnes i stort areal, kan bidraget likevel være betydelig [5].

### 2.2.3 Luftabsorpsjon

Lydenergi absorberes også i fluider, og i romakustikken er det naturlig nok luft som er relevant. Luftabsorpsjonen er avhengig av både temperatur, relativ fuktighet og frekvens, noe som gjør den vanskelig å ta høyde for i mange tilfeller. Innendørs går det imidlertid an å gjøre visse antakelser, og ved en temperatur på 20 °C og en relativ fuktighet mellom 20 og 70 % er formelen

$$m = 5,5 \cdot 10^{-4} \frac{50}{h} \left( \frac{f}{1000} \right)^{1,7}, \quad (2.5)$$

der  $h$  er relativ fuktighet i prosent og  $f$  frekvens i Hz, en akseptabel tilnærming for frekvenser mellom 1,5 og 10 kHz. For frekvenser under 1,5 kHz er bidraget fra luftabsorpsjon neglisjerbart [6]. Størrelsen  $m$  er luftens absorpsjonskoeffisient, og må ganges opp med romvolumet og en faktor på 4 for å få totalbidraget fra luftabsorpsjonen i et rom. Med andre ord vil luftabsorpsjonen få betydning i store rom, og da spesielt ved de høyeste frekvensene. Dermed kan det totale absorpsjonsarealet i et rom skrives som

$$A = S\bar{\alpha} + 4mV. \quad (2.6)$$

## 2.3 Diffuse lydfelt

En vanlig antakelse er at lydfeltet i et rom er diffust, det vil si at lydtrykknivået er likt i hele rommet, og at det i ethvert punkt i rommet infaller lydbølger fra alle vinkler. Enkelte unntak finnes likevel, blant annet i rom med en asymmetrisk fordeling av absorbenter, og i rom med spesiell geometri. I tillegg gjelder antakelsen bare for et visst frekvensområde, der Schroeder-frekvensen,

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (2.7)$$

er nedre grenseverdi. Under denne frekvensen vil rommets moder kunne eksiteres, og det vil kunne gi store utslag i lydtrykknivå i ulike punkter i rommet [6].

## 2.4 1/1- og 1/3-oktavnåbånd

Det er vanlig å dele frekvensområdet inn i 1/1- eller 1/3-oktavnåbånd. Senter- og grensefrekvenser for de mest relevante 1/1- og 1/3-oktavnåbåndene er vist i tabell 2.1.

**Tabell 2.1:** Senter- og grensefrekvenser for utvalgte 1/1- og 1/3-oktavbånd [8].

$f_c$ [Hz]	$f_c$ [Hz]	$f_l$ [Hz]	$f_u$ [Hz]
	100	88	113
125	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1600	1414	1760
	2000	1760	2250
	2500	2250	2825
4000	3150	2825	3530
	4000	3530	4400
	5000	4400	5650

## 2.5 Etterklangstid

Etterklangstiden,  $T$ , i et rom forteller hvor lang tid det tar før det diffuse lydnivået i rommet har sunket med 60 dB. Hvor lang etterklangstid som er anbefalt for et rom avhenger av rommets bruksområde. I rom for musikkutøvelse er det ønskelig at etterklangstiden er forholdsvis høy, gjerne opp mot to sekunder. For å oppnå god taletydighet er det derimot hensiktsmessig at etterklangstiden er lav, mellom et halvt og ett sekund, og det kan derfor være en utfordring å få riktig etterklangstid i rom benyttes til ulike aktiviteter. Etterklangstiden er frekvensavhengig, og bør derfor måles og beregnes i 1/1-oktavbånd eller 1/3-oktavbånd [5].

NS 8175:2012 angir for restauranter, serveringssteder, kantiner, spiserom, pauserom o.l. gjeldene krav til etterklangstid som funksjon av gjennomsnittelig takhøyde:

**Tabell 2.2:** Krav til etterklagstid gitt i NS 8175:2012 [7].

	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
$T_h$ [s]	$0,13 \cdot h$	$0,16 \cdot h$	$0,20 \cdot h$	$0,27 \cdot h$

Det tillates at kravet overstiges med opptil 40 % i 1/1-oktavbåndet 125 Hz [7].

## 2.5.1 Sabines formel

Den mest grunnleggende, og også mest benyttede, formelen for å beregne etterklangstid, er Sabines formel,

$$T = \frac{0,161V}{A}. \quad (2.8)$$

Settes (2.6) inn for  $A$  blir dette

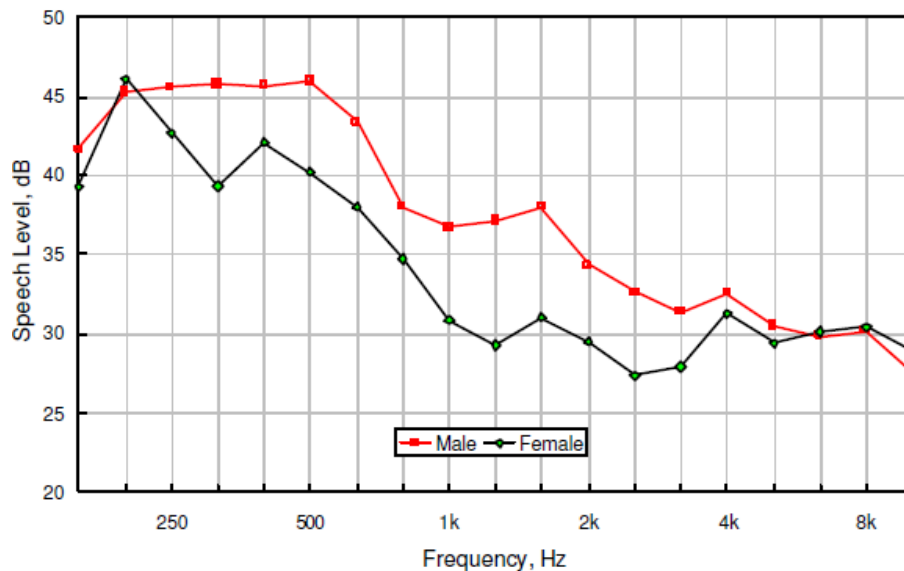
$$T = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha} + 4mV}. \quad (2.9)$$

Denne formelen er tilstrekkelig nøyaktig når  $\bar{\alpha} \ll 1$ , en forutsetning som oppfylles i de fleste praktiske tilfeller [6].

## 2.6 Egenskaper ved menneskelig tale

### 2.6.1 Spektralt innhold

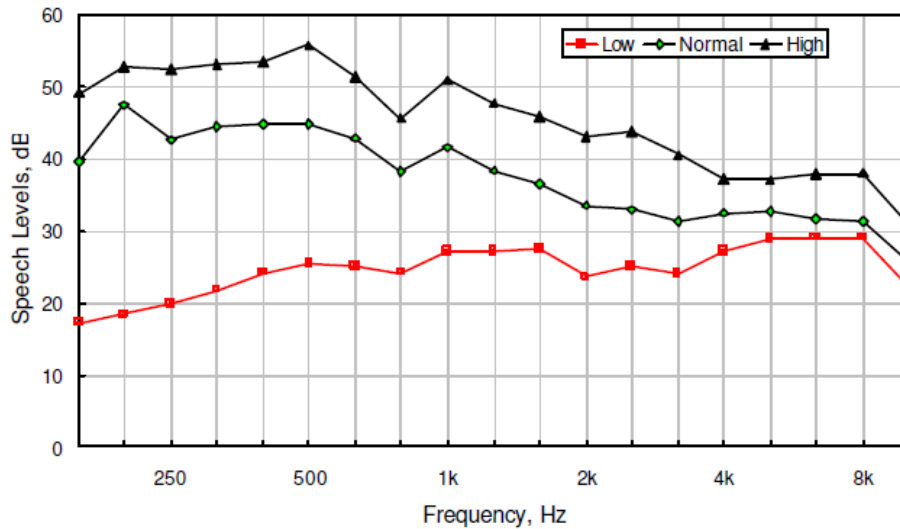
Hos både kvinner og menn er det de lave frekvensene som dominerer i vanlig tale. Den største forskjellen mellom kjønnene er at en mannsrøst produserer et høyere lydtryknivå gjennom praktisk talt hele spekteret. Opp til om lag 500 Hz holder en gjennomsnittlig mannsrøst et nokså jevnt nivå, og det er dette som gir mannsrøsten sitt bassfylte preg.



**Figur 2.1:** Gjennomsnittlig A-vektet spektralt innhold hos menn og kvinner [9].

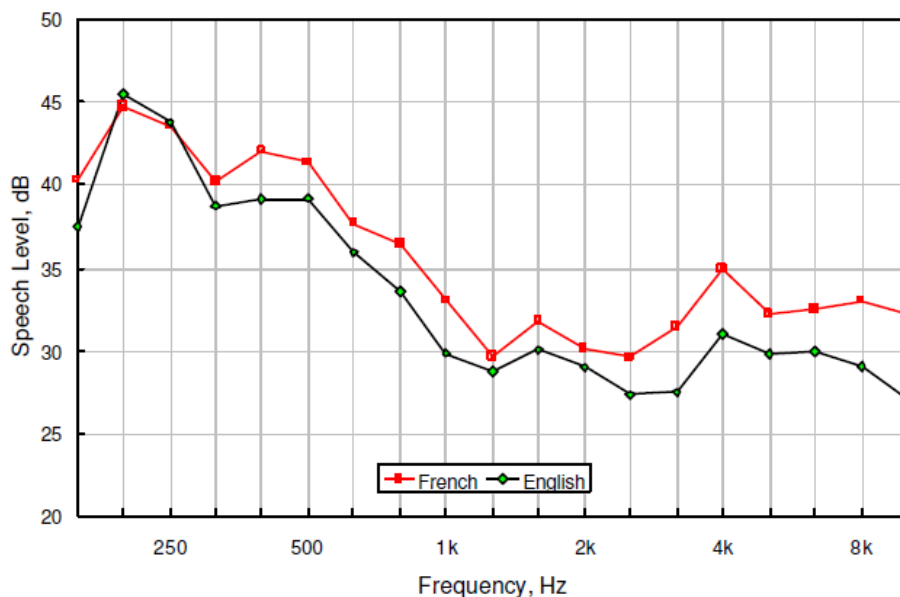
Når et menneske hever stemmen, skjer det ingen store endringer i det spektrale innholdet, og talenivået øker jevnt i alle frekvenser. Dersom stemmen senkes, vil

imidlertid de lave frekvensene reduseres kraftig, mens de høye vil holde seg nesten på samme nivå som ved vanlig tale. Med senket stemmenivå menes her hvissing eller liknende, hvor stemmen bevisst senkes av hensyn til omgivelsene.



Figur 2.2: Spektralt innhold ved ulike talenivåer hos en mannsperson [9].

Det er også en viss forskjell i spektralt innhold fra språk til språk. Figur 2.3 viser forskjellen mellom fransk og engelsk hos kvinner, der de høye frekvensene er mer fremtredende på fransk [9].

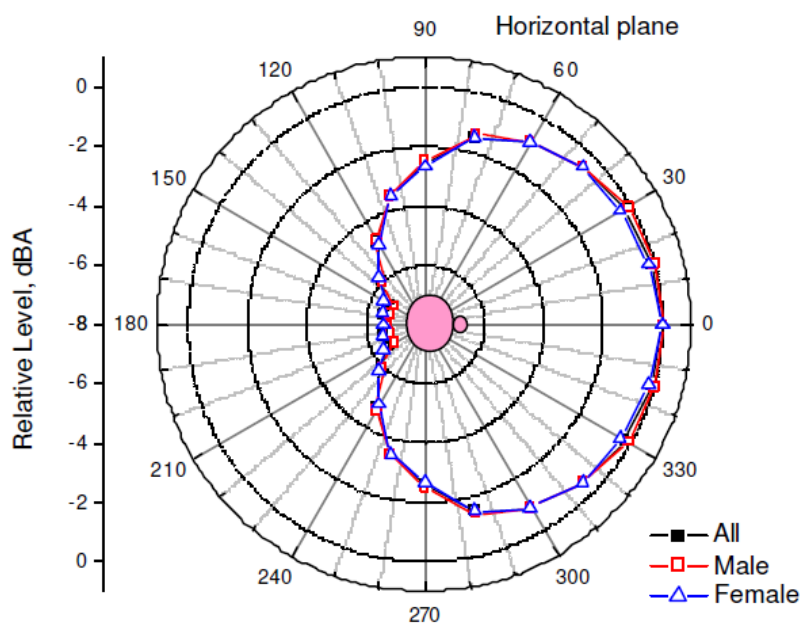


Figur 2.3: Forskjell mellom fransk og engelsk hos en kvinnelig taler [9].



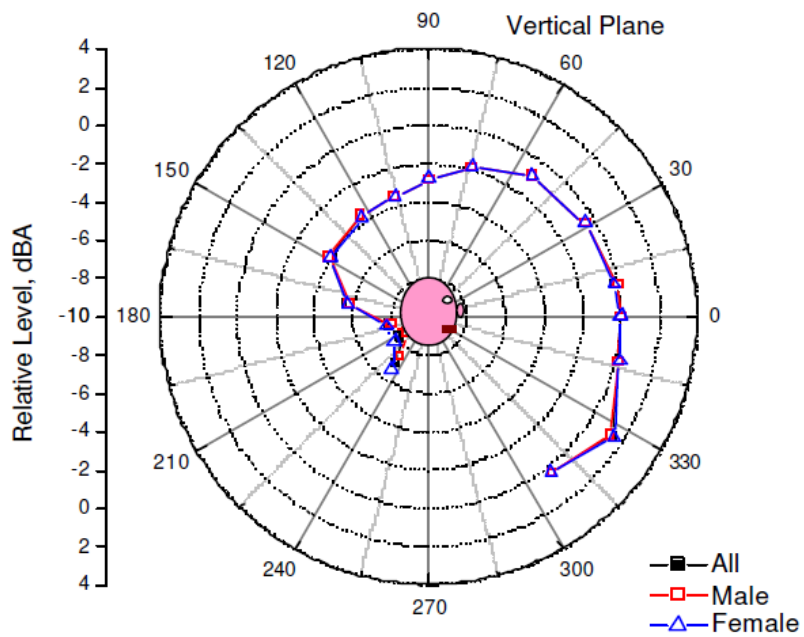
## 2.6.2 Direktivitet

Mennesker har også en viss direktivitet. Denne varierer stort med frekvens, og er nokså lik for både kvinner og menn. Utslagene er først og fremst å finne bak taleren, og i mindre grad til siden, og dette øker i omfang med høyere frekvenser. A-vektet, horisontal direktivitet er vist i figur 2.4, mens direktiviteten i 1/3-oktavnband og 1/1-oktavnband er vist i figur 2.7. Plottene i figur 2.7 er generert utfra bakgrunnsdataene til W. T. Chu, og ettersom disse bare går ned til og med 160 Hz, er dette den eneste frekvensen som er vist i 125 Hz-båndet. Det kan imidlertid antas at det er nokså små forskjeller mellom de tre 1/3-oktavnbandene 100 Hz, 125 Hz og 160 Hz.

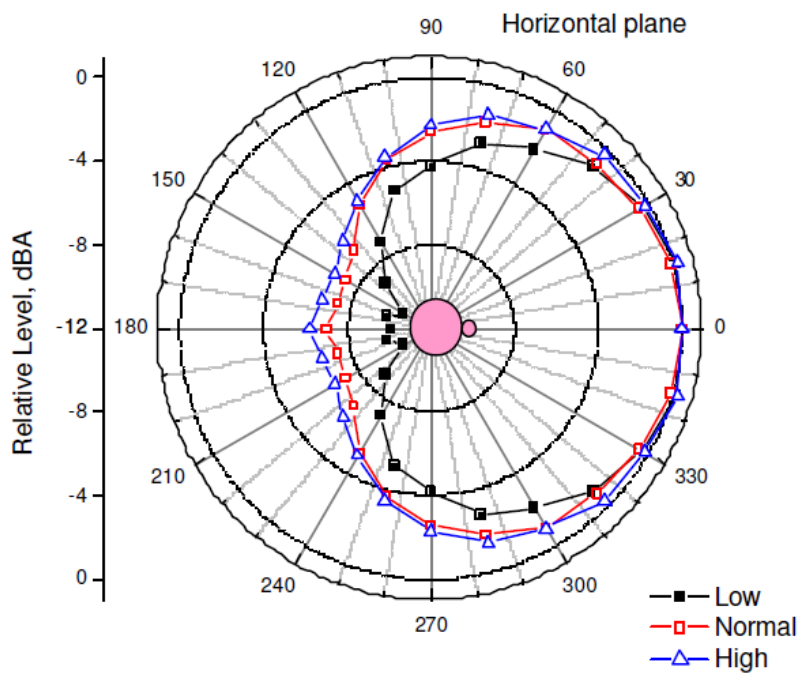


**Figur 2.4:** A-vektet, horisontal direktivitet hos kvinner og menn [9].

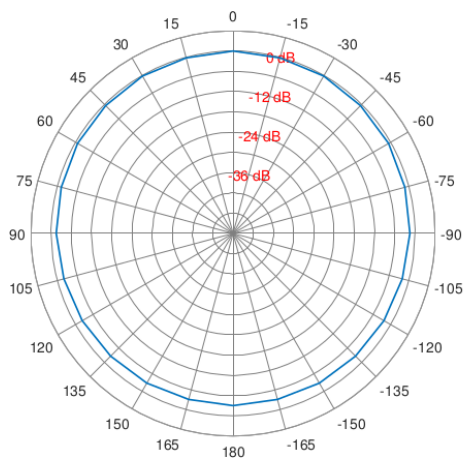
Vertikal direktivitet for mennesker er vist i figur 2.5, og det er også her liten forskjell mellom menn og kvinner. Et menneske vil generere det sterkeste lydtrykknivået om lag  $-30$  grader i forhold til horisontalplanet, mens det bakover vil genereres lite både vertikalt og horisontalt. Direktiviteten øker ved dempet tale, og minker litt ved forhøyet tale, men spesielt forskjellen på normal og forhøyet tale er svært liten [9].



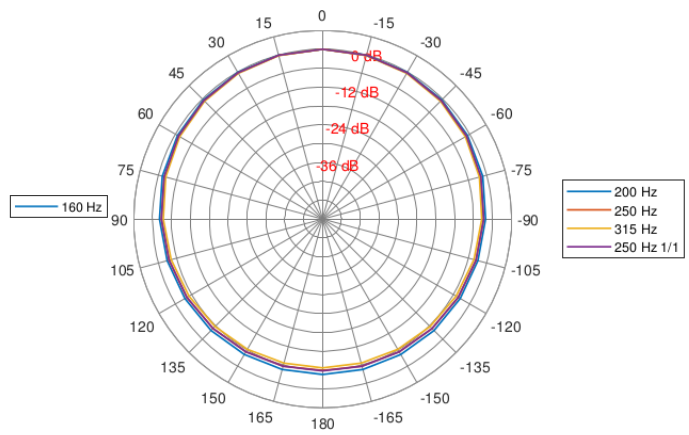
Figur 2.5: A-vektet, vertikal direktivitet hos kvinner og menn [9].



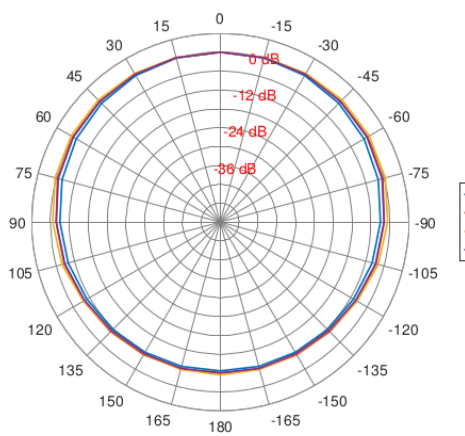
Figur 2.6: A-vektet, horisontal direktivitet ved ulike talenivåer hos menn [9].



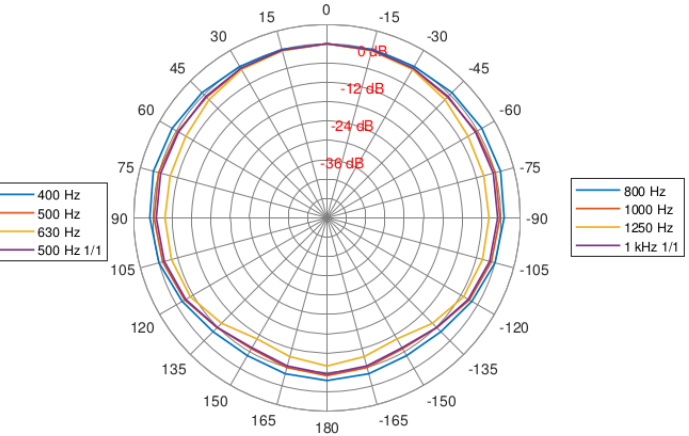
(a) 1/3-oktavbåndet 160 Hz.



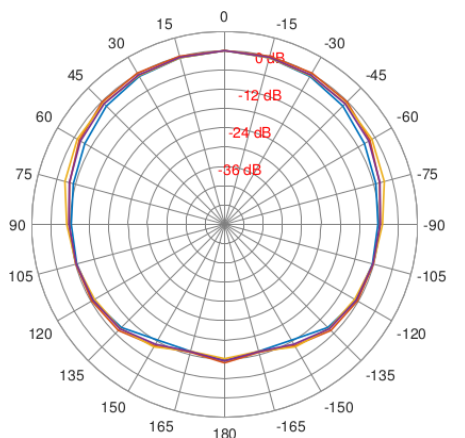
(b) 1/1-oktavbåndet 250 Hz.



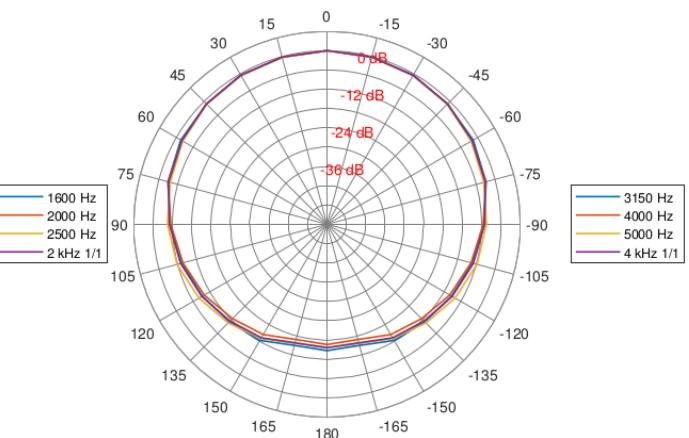
(c) 1/1-oktavbåndet 500 Hz.



(d) 1/1-oktavbåndet 1 kHz.



(e) 1/1-oktavbåndet 2 kHz.



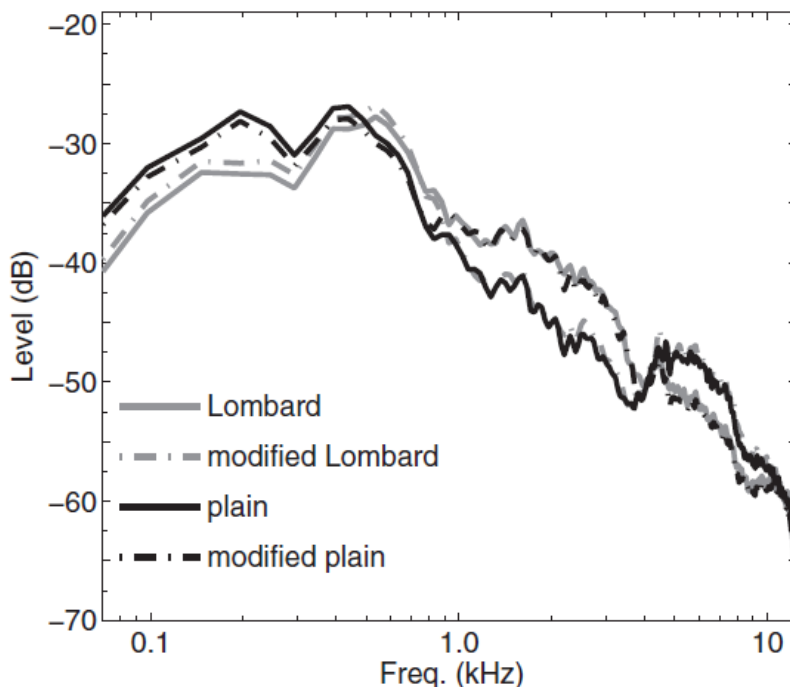
(f) 1/1-oktavbåndet 4 kHz.

Figur 2.7: Menneskelig direktivitet fra 160 Hz til 5 kHz [9].

## 2.7 Lombard-effekten

Lombard-effekten ble oppdaget i 1911, av franskmannen Étienne Lombard. Lombard var øre-nese-hals-spesialist, og la merke til en pasient som hevet stemmen i det han ble utsatt for en intens lyd. Pasienten selv var ikke klar over stemmehevingen, og Lombard konkluderte derfor med at det var en ufrivillig refleks. Såkalt Lombard-tale kjennetegnes imidlertid av flere ting enn bare økt stemmevolum. Blant annet er det vanlig at stemmens fundamentalfrekvens heves, og vokaler dras ut. Det er også slik at Lombard-effekten er sterkere hos menn enn hos kvinner, og den er også sterkere i toveiskommunikasjon enn enveiskommunikasjon [10].

Disse egenskapene gjør at Lombard-tale skiller seg ut fra annen forhøyet tale, som for eksempel når man snakker til en større forsamling. Forskning viser at Lombard-tale er lettere å forstå enn vanlig tale i bredspektret støy, men dersom støyen stammer fra tale, vil også støyen ha den samme karakteristikken, og under slike forhold vil Lombard-tale være vanskeligere å forstå [11]. Det er også vist at Lombard-effekten først og fremst setter inn når bakgrunnsstøyen inneholder mye støy i samme frekvensområde som menneskelig tale. Effekten er altså kroppens løsning for å heve seg over konkurrerende stemmer ikke bare ved å heve nivået, men også ved å endre på frekvensområdet, slik at det skiller seg fra den eksisterende bakgrunnsstøyen [12].



**Figur 2.8:** Endring av stemmens spektrale innhold når Lombard-effekten setter inn [13].

## 2.8 Akustisk kapasitet

Begrepet akustisk kapasitet er skapt av J. H. Rindel, og ment som en forenklet modell på hvor mange personer som kan oppholde seg i et rom før bakgrunnsstøynivået blir ubehagelig høyt. Rindel tar utgangspunkt i at Lombard-effekten setter inn ved et bakgrunnsstøynivå på 45 dB og et talenivå på 55 dB [14]. Dermed kan nødvendig talenivå for å føre en samtale på én meters hold uttrykkes som en funksjon av bakgrunnsstøynivået,

$$L_{S,A,1\text{ m}} = 55 + c \cdot (L_{N,A} - 45), \quad (2.10)$$

der  $L_{N,A}$  er bakgrunnsstøynivået og  $c$  er Lombard-stigningen, et tall på hvor sterk effekten er. Dette tallet vil variere noe fra tilfelle til tilfelle, men Rindel anbefaler å sette  $c = 0,5$  for å gi mest mulig representative beregninger [15]. Videre er

$$L_{N,A} = 93 - 20 \log \left( \frac{A}{N_S} \right), \quad (2.11)$$

der  $A$  er absorpsjonsarealet, og  $N_S$  er antallet snakkende personer. For å også ta tiende personer med i betraktningen, introduseres gruppestørrelsen

$$g = \frac{N}{N_S}, \quad (2.12)$$

som er et estimat på det gjennomsnittlige forholdet mellom talende og tiende mennesker i lokalet. Gruppestørrelsen påvirkes av ulike faktorer, som etablisementets art og hvorvidt det konsumeres alkohol. For eksempel anbefaler Rindel en minimumsverdi på 2,5 for en støyende bistro, og 3,5 i restauranter [15].

For å komme frem til den akustiske kapasiteten er det videre nødvendig å definere et minimumsnivå for hva som kan anses som tilstrekkelige forhold for verbal kommunikasjon. Dette kan gjøres ved hjelp av signal-støy-forholdet, og Lazarus kom frem til et minimum på  $-3$  dB [16].

$$SNR = L_{S,A,1\text{ m}} - L_{N,A} = -14 + 10 \log \left( \frac{A \cdot g}{N} \right) \quad (2.13)$$

Under disse forutsetningene, blir den akustiske kapasiteten i et rom

$$N_{\max} \cong \frac{V}{20T}, \quad (2.14)$$

der  $T$  er etterklangstiden i mellomfrekvensene 500 – 1000 Hz i et tomt lokale [17] [18] [19].

## 2.9 Romakustiske parametre

### 2.9.1 Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner

Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner har stor betydning for hvordan lyd oppfattes. Tidlige refleksjoner bidrar til å gi en forsterkende effekt, mens sene refleksjoner virker forstyrrende. Svært sene refleksjoner vil oppfattes som ekko, men det er et lite utbredt problem i vanlige bygninger. Forholdet mellom de tidlige og de sene refleksjonene betegnes med  $C_{t_e}$ , der  $t_e$  er grenseverdien for hva som defineres som tidlig og sent, i millisekunder. Denne varierer utfra bruksområde, men det vanlige er 50 ms for tale og 80 ms for musikk, henholdsvis  $C_{50}$  og  $C_{80}$  [5]:

$$C_{t_e} = 10 \log \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.15)$$

På engelsk kalles parameteren *clarity*, som på norsk kan oversettes til *klarhet*. Dette navnet gir en god indikasjon på hva parameteren innebærer, nemlig at en god verdi vil gi et klart lydbilde uten særlige forstyrrelser. Vanligst er det å benytte seg av denne parameteren for å vurdere enveiskommunikasjon fra en taler eller fra et orkester, men  $C_{50}$  kan også anvendes til vurdering av toveis talekommunikasjon. Parameteren angis i dB, og ifølge NS-EN ISO 3382-1:2009 vil en endring av  $C_{80}$  på  $\pm 1$  dB være såvidt merkbar [20].

Dersom etterklangstiden i rommet er kjent, kan parameteren beregnes teoretisk under navnet Barron-kurven,

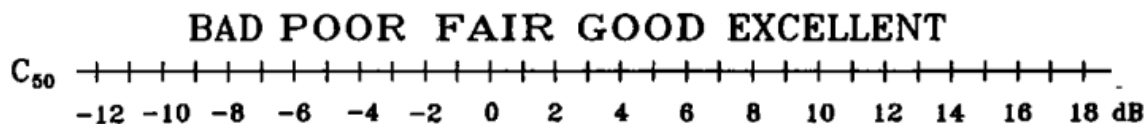
$$C_B = 10 \log \left( \frac{V e^{(0,04r+13,82t)/T}}{312Tr^2} + e^{13,82t/T} - 1 \right), \quad (2.16)$$

der  $V$  er romvolumet,  $r$  er avstanden mellom kilde og mottaker,  $t$  er grenseverdien i sekunder, og  $T$  er etterklangstiden [21]. Ulempen med denne modellen er imidlertid at den forutsetter en omnidireksjonell kilde. For å få nøyaktige resultater må man derfor også ta med direktivitetsfaktoren til kilden,  $Q$ , som vil ha verdien 1 for en omnidireksjonell kilde, og deretter øke med økende direktivitet [21][22]:

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{QV e^{(0,04r+0,691)/T}}{312Tr^2} + e^{0,691/T} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Det byr på problemer om direktiviteten ikke er kjent, og det er derfor klart mest presist å bestemme  $C_{50}$  ved hjelp av målinger. Barron-kurven kan likevel være en god indikator for lave frekvenser, og gir dessuten et godt innblikk i hvordan parametrene romvolum, etterklangstid og avstand mellom kilde og mottaker påvirker forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner [22].

Skalaen for vurdering av  $C_{50}$  er vist i figur 2.9. Denne baserer seg på vurdering av enveiskommunikasjon i større rom, slik at om man benytter  $C_{50}$  til å vurdere toveiskommunikasjon på kort avstand, vil det gi resultater i det høyere sjiktet av skalaen [21].



Figur 2.9: Skala for vurdering av  $C_{50}$  [21].

I luft som holder 20 °C, er lyd hastigheten 343 m/s [6]. Ved denne temperaturen vil lyden dermed bevege seg om lag 17 m i løpet av 50 ms. Rommets dimensjoner vil med andre ord ha sterk innvirkning på parameteren.

## 2.9.2 Forholdet mellom nyttig og unyttig lydenergi

På spisesteder vil mesteparten av bakgrunnsstøynivået være generert av gjestene. Det innebærer at når en person snakker til en annen, vil noe av lydenergien være nyttig energi som bidrar til at lytteren forstår det som blir sagt, mens noe vil bidra til den allerede forstyrrende bakgrunnsstøyen. Dette forholdet betegnes med  $U_{te}$ , og henger tett sammen med forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner:

$$U_{te} = \frac{C_{te}}{1 + (C_{te} + 1) \frac{E_{BL}}{E_{SL}}} \quad (2.18)$$

der

$$E_{SL} \propto 10^{SL/10} \quad (2.19)$$

og  $SL$  er lydtrykknivået fra tale, og

$$E_{BL} \propto 10^{BL/10}, \quad (2.20)$$

der  $BL$  er bakgrunnsstøynivået [23].

Forholdet mellom  $E_{BL}$  og  $E_{SL}$  utgjør signal-støy-forholdet, og dette gjør  $U_{50}$  til en god parameter for vurdering av lydforholdene i et rom, fordi den kombinerer den romspesifikke parameteren  $C_{50}$ , og signal-støy-forholdet, som varierer avhengig av situasjonen [24].





# Kapittel 3

## Metode og utstyr

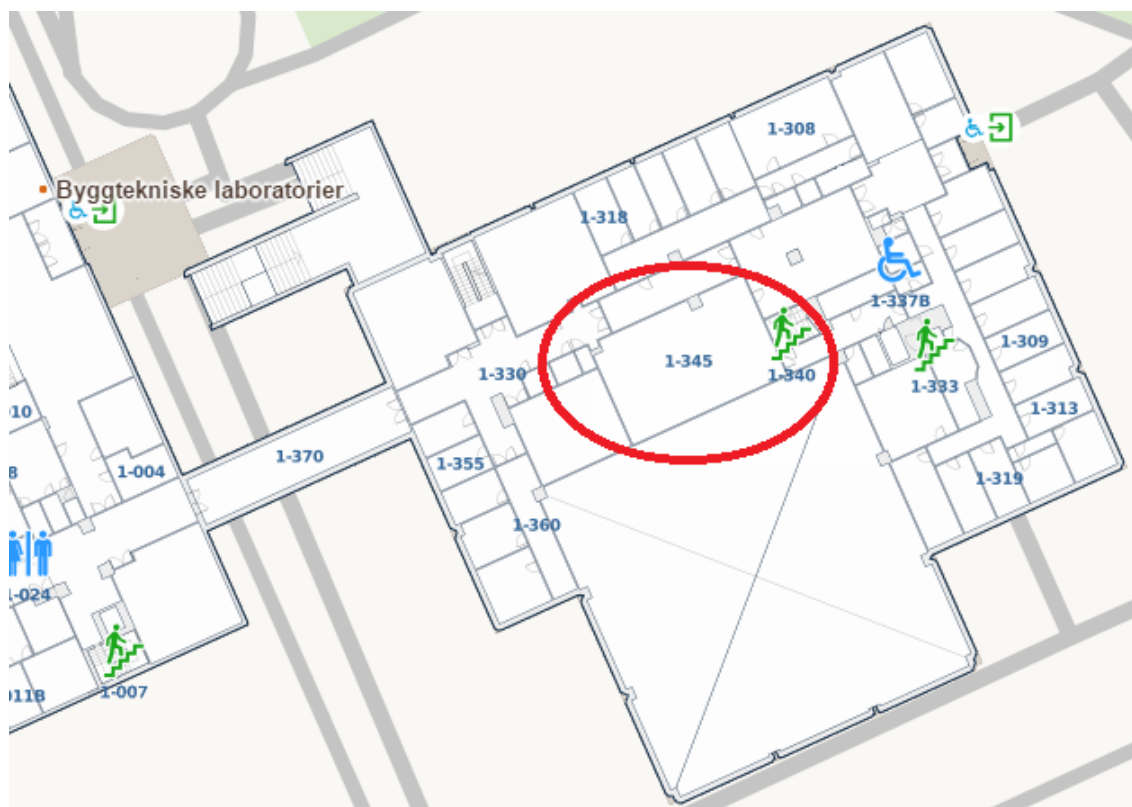
I dette kapitlet vil måleprosedyren bli beskrevet. I avsnitt 3.1 presenteres måleobjektet, mens måleprosedyren for måling av bakgrunnsstøy er dekket i avsnitt 3.2. Avsnitt 3.3 tar for seg måling av impulsrespons, og avsnitt 3.4 gir en kort beskrivelse av etterbehandlingen av måledataene. I avsnitt 3.5 gis det en beskrivelse av fremgangsmåten for beregning av akustisk kapasitet ved ulike volum i Realfagskantina, mens avsnitt 3.6 dekker det benyttede utstyret, i form av utstyrsliste og direktivitetsdiagrammer.

### 3.1 Måleobjekt

Kantina på SINTEF Byggforsk, populært kalt Vertshuset, ble brukt som måleobjekt. Denne er med små unntak skoeskeformet, og de irregulariteter som er i grunnflaten kan ses på figur 3.1. Rommet har én kortvegg der det er påmontert en porøs absorbent som dekker et areal på om lag  $10 \text{ m}^2$ , mens den andre kortveggen er uten absorbenter. Den ene langveggen er for det meste kledd med spaltepanel, som etter målinger antas å ha lavere effekt enn ventet [25]. Det er også plassert en myk sofa langs deler av veggen. Den andre langveggen består nesten utelukkende av vinduer, men dekkes delvis av nokså tunge gardiner. Rommet brukes som kantine og møterom, og har totalt 52 stoler, fordelt rundt syv bord.

For å gjøre rommet klart til målinger, måtte bordene flyttes ut mot siden. Et av bordene er heftet fast i ledninger knyttet til tekniske installasjoner, og dette kunne derfor ikke flyttes. En del tiloversblevne stoler ble stablet sammen og plassert ute i hjørnene. Et oversiktsbilde av ferdig ryddet rom klart til rigging av utstyr kan ses i 3.2.

Etterklangstiden i rommet er målt ved en tidligere anledning, og kan ses i figur 3.3.



**Figur 3.1:** Kantina på SINTEF Byggeforsk ble brukt som måleobjekt [26].

## 3.2 Måling av bakgrunnsstøy

De første målingene som ble gjort var av bakgrunnsstøy. Med tre høyttalere til rådighet ble det besluttet at den beste løsningen ville være å plassere disse asymmetrisk om rommets lengdeakse og tilnærmet symmetrisk om breddeaksen, for deretter å gjøre en ny måleserie der høyttalerposisjonene ble speilet om lengdeaksen. Deres plassering er vist på figur 3.4, og som figuren antyder, ble høyttalerne plassert under bordene, slik at lyden ble mest mulig diffusert. I tillegg ble to av høyttalerne vendt mot hjørnene nærmest seg. To omnidireksjonelle mikrofoner ble benyttet, og som figur 3.4 viser, er den første mikrofonposisjonen 0,5 m unna veggen med absorbent. Deretter er det mikrofonposisjoner for hver halve meter frem til 3 m fra absorbenten, og for hver hele meter frem til 9 m fra absorbenten. Ved 9 m er det et bord som på grunn av tekniske installasjoner i rommet ikke kunne flyttes. Måleposisjonene gjør derfor et hopp her, og dukker opp igjen 11,5 og 12 m unna den absorberende veggen, eller henholdsvis 1 og 0,5 m unna veggen i motsatt ende. Mikrofonene ble satt opp om lag 1,2 m over gulvnivå, tilsvarende en sittende person.

EASERA ble brukt til å generere hvit støy. Når støyen var skrudd på, ble det gjort opptak med Audacity, og når opptaket var ferdig, ble støyen skrudd av. Deretter ble de to mikrofonene flyttet videre til neste posisjon, og prosedyren gjentatt. Alle opptakene ble kuttet ned til 5 sekunder, slik at hvert opptak fikk samme lengde,



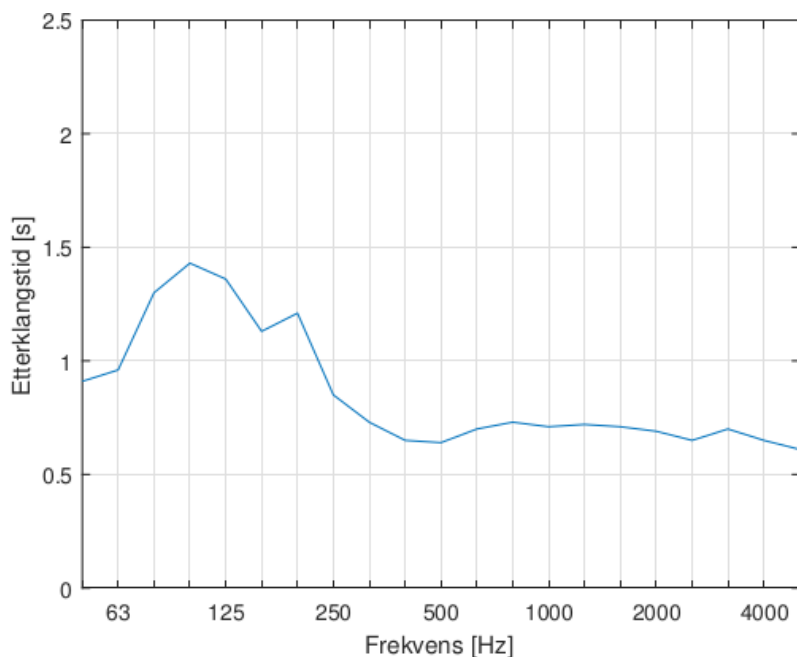
**Figur 3.2:** Oversiktsbilde av rommet. Absorbenten kan ses i bakkant.

med en samplingfrekvens på 96 kHz.

### 3.3 Måling av impulsrespons

Til måling av impulsrespons ble det benyttet en høyttaler av typen TalkBox fra NTI Audio [27], som skal gi en realistisk gjengivelse av det lydbilde et talende menneske vil produsere. Denne ble plassert på et om lag 1 m høyt stativ, og mikrofonen måtte derfor også senkes noe. Målingene ble gjort ved hjelp av impulsrespons, så det ble bare brukt én mikrofon. Til dette ble det benyttet et rosa sinus-sveip med en signallengde på 3,4 s. Dette ble generert i EASERA, som på disse målingene også tok seg av postprosesseringen.

Impulsrespons måles ved å generere en impuls, i form av et klapp, et skudd, eller i dette tilfellet et sveip. Ved et klapp eller skudd, vil signalet være kort, og alle frekvenser vil være representert på en gang, mens ved et sveip genereres frekvensene i stigende rekkefølge, fra en forutbestemt nedre grensefrekvens til en øvre. Programvaren registrerer deretter alle impulsene som treffer mikrofonen. Først kommer direktelyden, og deretter alle refleksjonene, før lyden til slutt dør ut. Resultatene fra en slik måling er svært anvendelige, og kan brukes til måling av etterklangstid såvel som  $C_{50}$  og andre parametre.



**Figur 3.3:** Etterklangstiden i måleobjektet [25].

### 3.3.1 Måling på tvers av rommets lengderetning

Det ble gjort fire måleserier. Først ble det satt opp mikrofon og høyttaler i første måleposisjon, det vil si en halv meter fra veggen der absorbenten var festet. Mikrofonen og høyttaleren ble plassert på hver sin side av rommets midtlinje, med en halv meters avstand til midtlinjen, slik at et ble 1 m i mellom de to. Deretter ble målingen gjort, og utstyret ble flyttet videre til neste måleposisjon. Når første serie var unnagjort, ble posisjonene byttet om, og måleprosedyren gjentatt. Dette ble gjort dels for å senke måleusikkerheten ved å kunne midle flere måleserier, men også fordi det var forventet noe ulike resultater på grunn av de to langsidenes ulike overflate. Måleoppsettet kan ses i figur 3.5 og 3.6.

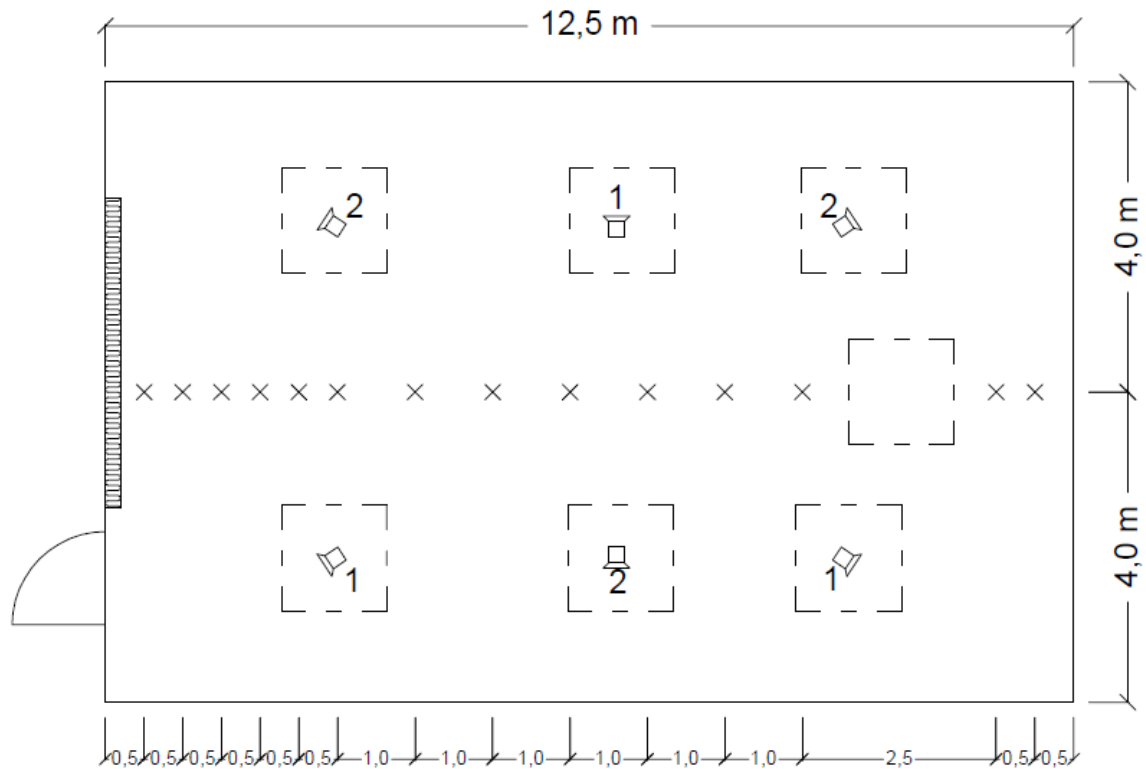
### 3.3.2 Måling langsmed rommets lengderetning

Måleserie tre og fire ble gjort for å undersøke betydningen av talerens retning i forhold til absorbenten. Dette ble gjort langsmed midtlinjen, og antall målepunkter ble derfor mer begrenset. Den første av disse to seriene ble gjort med lyd-kilden rettet mot absorbenten. Også her var det en meters avstand mellom høyttaler og mikrofon, og etter at en måling var unnagjort, ble utstyret flyttet videre til neste målepunkt, i retning vekk fra absorbenten. Så langt det lot seg gjøre, ble de samme avstander mellom målepunkt og vegg benyttet også i disse to seriene, slik at det frem til 3 m fra absorbenten var en halv meter mellom målepunktene, og videre 1 m. Målingene ble gjort frem til 8 m fra absorbenten. Deretter ble høyttaleren snudd vekk fra absorbenten, og målingene ble gjentatt i de samme målepunktene.

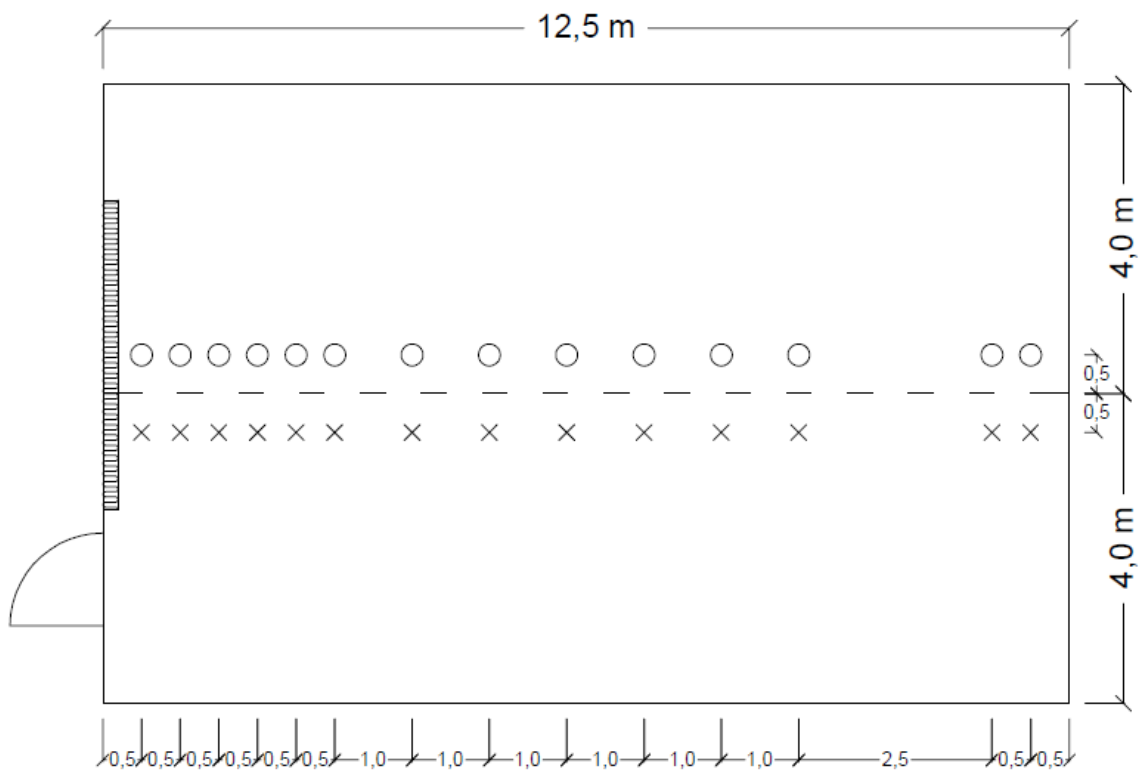
Målepunktene for disse to seriene kan ses i figur 3.7 og 3.8.

### 3.4 Etterbehandling av måledata

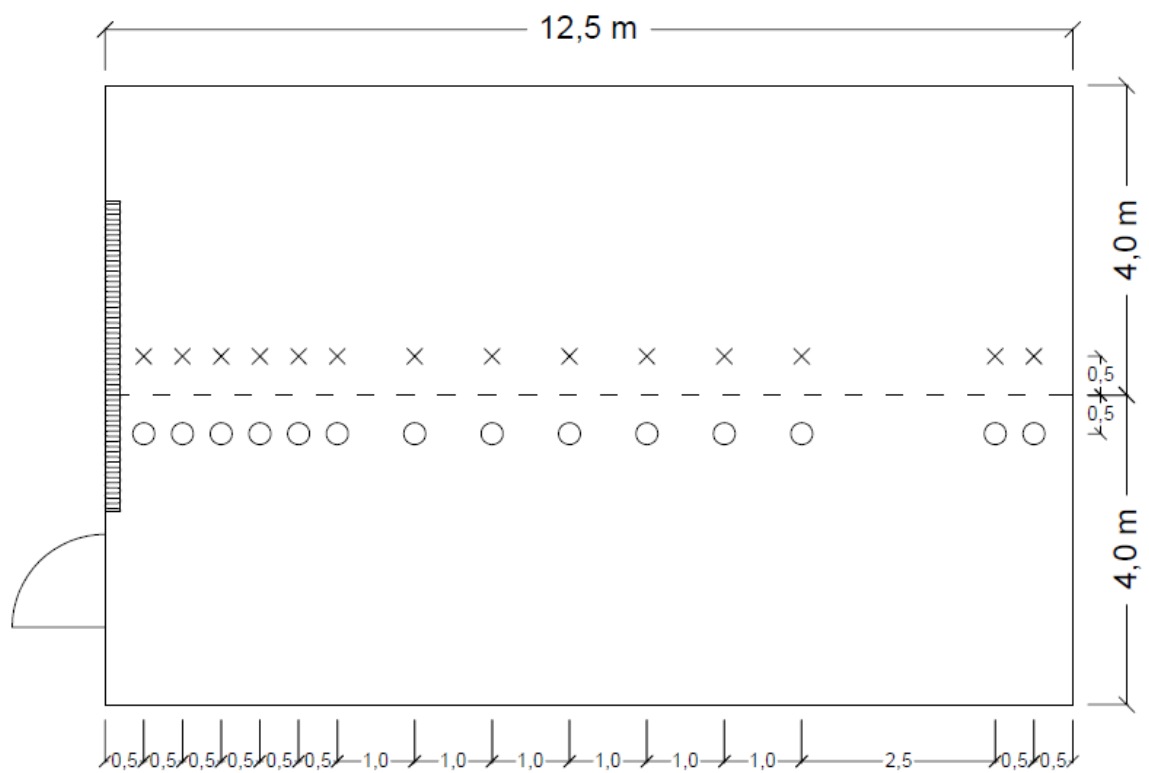
Lydopptakene ble behandlet i MATLAB. Det ble benyttet en funksjon fra MATLABs filutveksling, som er å finne i avsnitt A.1.1. Funksjonen regnet ut 1/3-oktavbåndsnivåer, og disse la grunnlag for videre beregning av 1/1-oktavbåndsnivåer. Impulsresponsmålingene gav  $C_{50}$  direkte, så disse dataene ble importert til MATLAB via Microsoft Excel, uten ytterligere behov for bearbeiding. Til beregning av  $U_{50}$  ble de samme verdiene for  $C_{50}$  benyttet, mens (2.10) ble brukt til å regne ut talenivået tilhørende de målte bakgrunnsstøynivåer, og deretter signal-støy-forholdet fra (2.19) og (2.20).



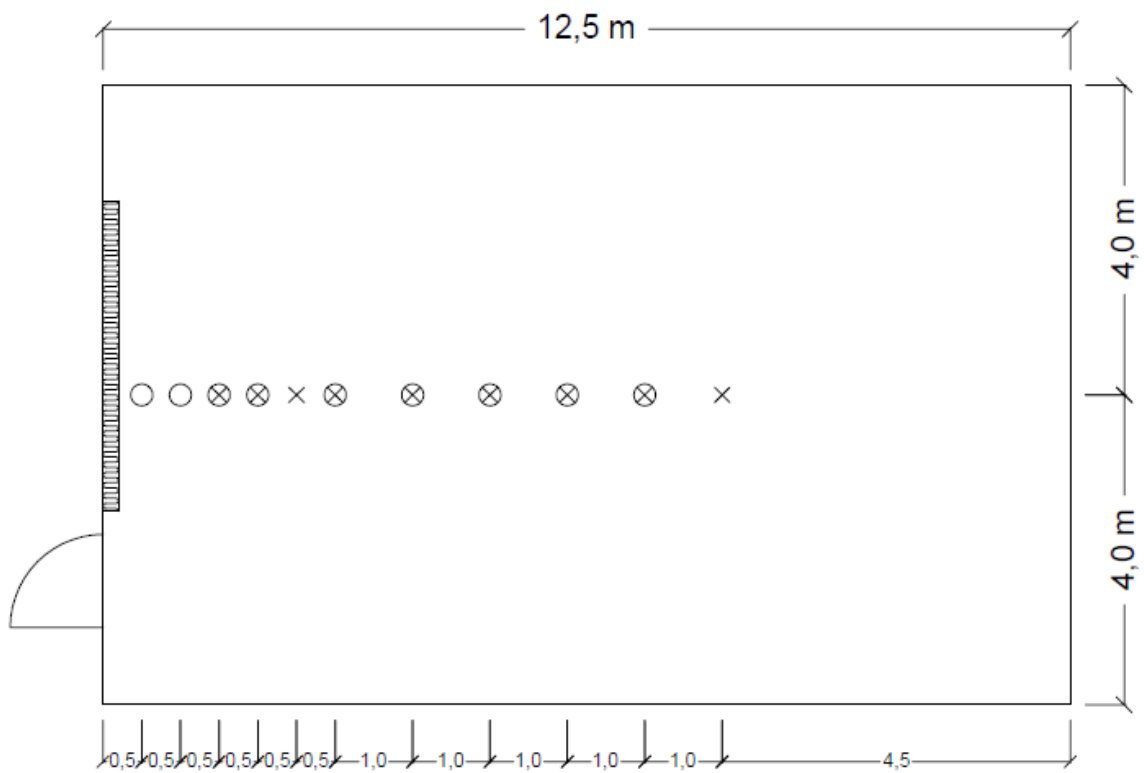
**Figur 3.4:** Måleoppsett for måling av bakgrunnsstøynivå. Tallet 1 angir de tre høyttalerposisjonene i måleserie 1, mens tallet 2 angir de tre høyttalerposisjonene i måleserie 2. Kryssene indikerer mikrofonposisjoner og de stiplede kvadratene indikerer bordenes posisjon i rommet.



**Figur 3.5:** Måleoppsett for første måleserie med impulsrespons. Kryssene indikerer mikrofonposisjoner, mens sirklene indikerer høyttalerposisjoner.

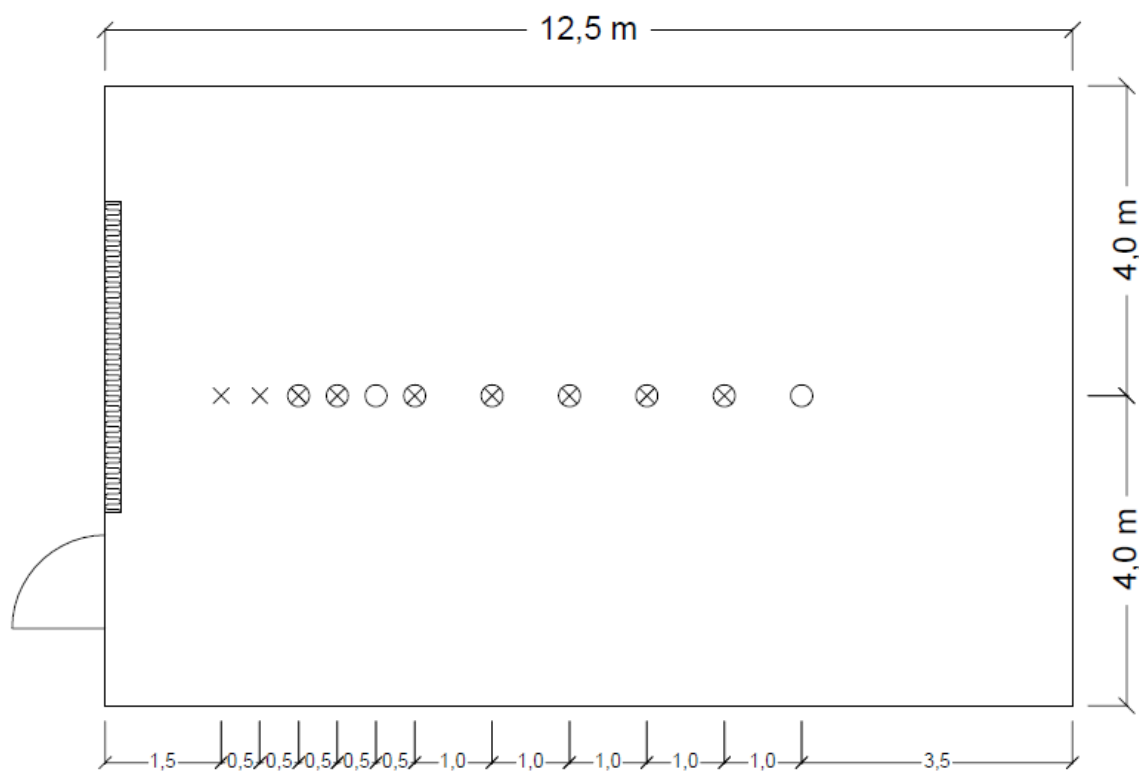


**Figur 3.6:** Måleoppsett for andre måleserie med impulsrespons. Kryssene indikerer mikrofonposisjoner, mens sirklene indikerer høyttalerposisjoner.



**Figur 3.7:** Måleoppsett for tredje måleserie med impulsrespons. Kryssene indikerer mikrofonposisjoner, mens sirklene indikerer høyttalerposisjoner. Der det er både kryss og sirkel, vil det i løpet av serien ha vært både mikrofon og høyttaler.





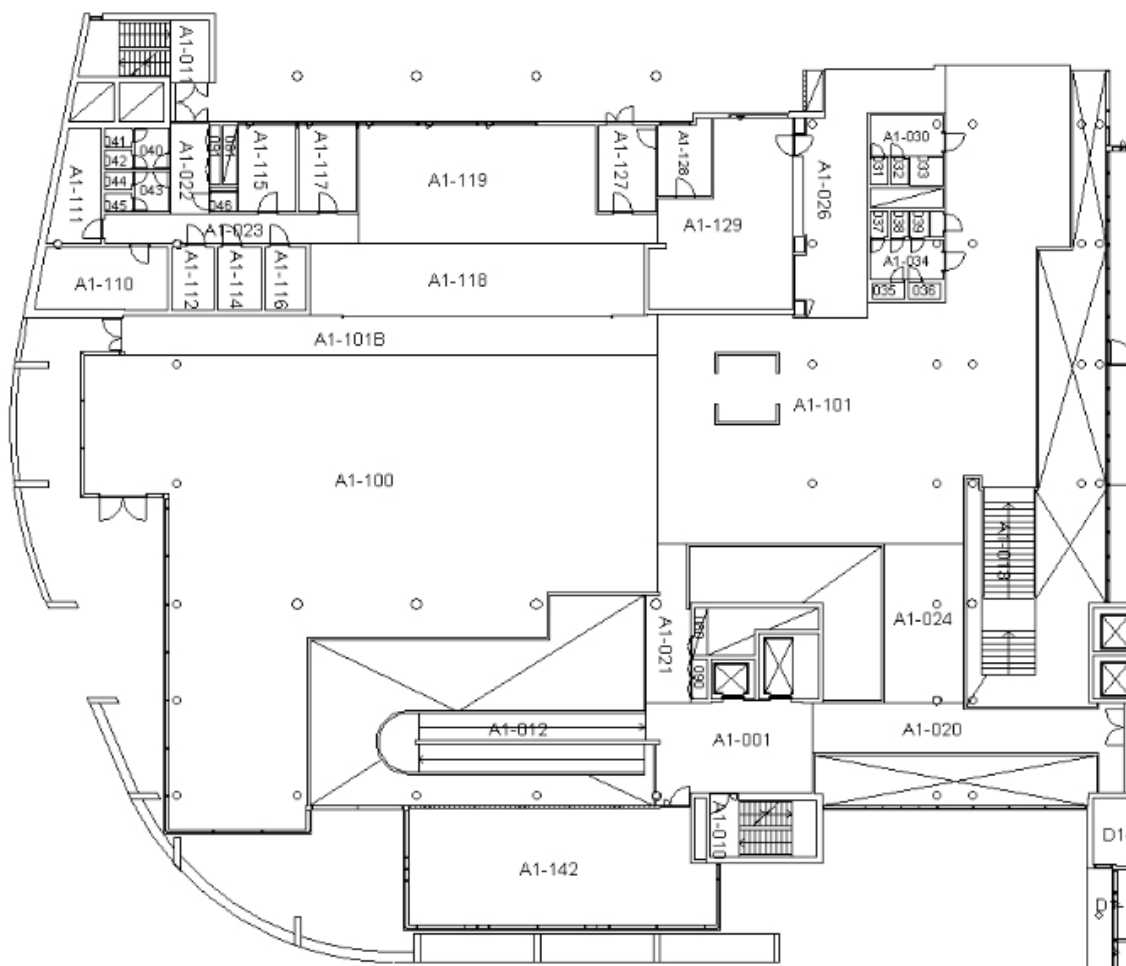
**Figur 3.8:** Måleoppsett for fjerde måleserie med impulsrespons. Kryssene indikerer mikrofonposisjoner, mens sirklene indikerer høyttalerposisjoner. Der det er både kryss og sirkel, vil det i løpet av serien ha vært både mikrofon og høyttaler.



**Figur 3.9:** Impulsresponsmåling i rommets lengderetning.

### 3.5 Beregning av akustisk kapasitet i Realfagskantina

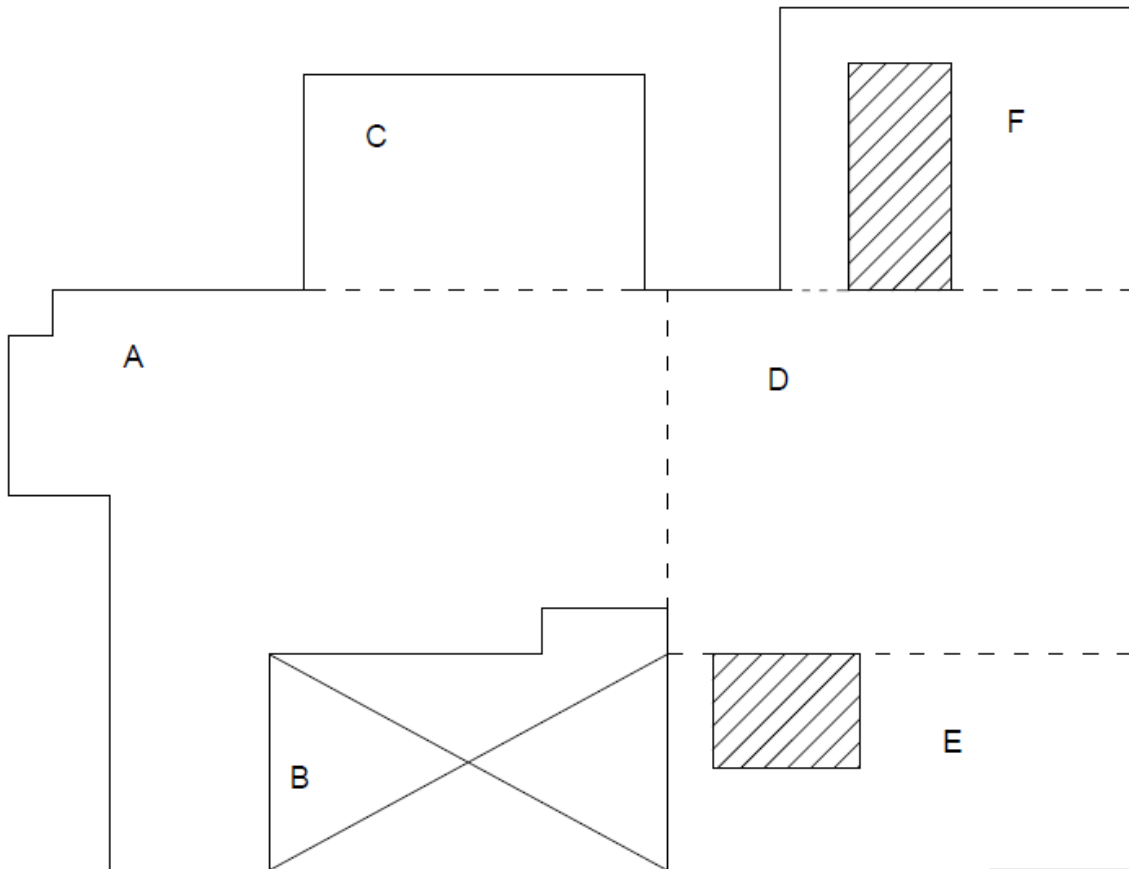
En plantegning av Realfagskantina og området rundt er vist i figur 3.10. Det som på tegningen er merket som A1-100 er selve spiseområdet, hvor det står bord og stoler. Rom A1-118 betegner området der kjøp og salg av mat og drikke foregår, mens A1-119 er kjøkkenet. A1-101B kan i praksis ses på som en del av A1-100. Utover i A1-101 er det store åpne arealer, mens området betegnet med A1-012 er åpent også ned en etasje. A1-100 og A1-012 er adskilt av et om lag 1 m høyt betongrekkverk. Normal takhøyde er 3,1 m, men midt i kantina er det et område på 13x17 m med åpen himling helt opp til toppen av bygget, og takhøyden her er cirka 16 m. Midlere etterklangstid i 1/1-oktavnåbandene 500 Hz og 1 kHz er ved en tidligere anledning målt til å være 1,66 s [25].



Figur 3.10: Utsnitt av plantegning av Realfagbyggets 1. etasje [28].

En forenkling av geometrien er vist i figur 3.11. Hele området er helt delt opp i seks mindre områder, og dimensjonene til disse områdene ble bestemt med lasermåler. De

skraverte områdene på tegningen er massive betongkonstruksjoner, og deres volum er trukket fra i beregningene.



**Figur 3.11:** Skissert oppdeling av Realfagskantina og områdene rundt.

Basert på oppdelingen i figur 3.11 ble det gjort beregninger for følgende syv ulike volum:

1. A
2. A+B
3. A+C
4. A+D
5. A+B+C+D
6. A+B+C+D+E
7. A+B+C+D+E+F

## 3.6 Utstyr

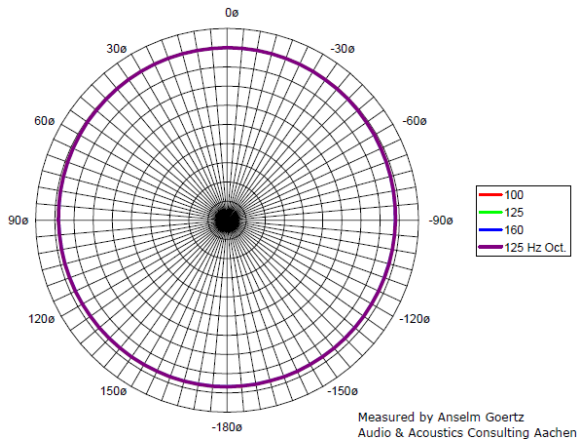
### 3.6.1 Utstysrliste

Tabell 3.1: Utstysrliste

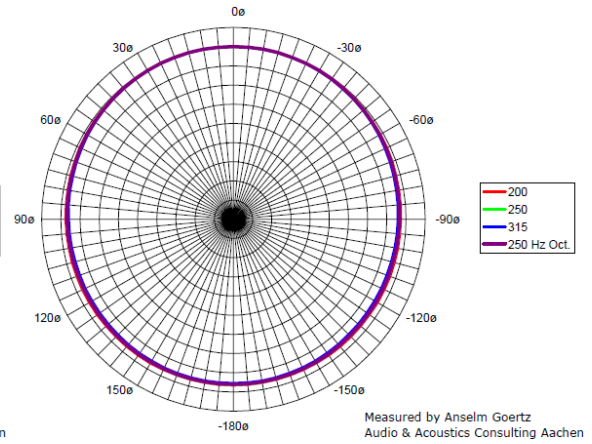
Instrument	Merke	Serienummer	Antall
Høyttaler	Dynaudio Acoustics Type BM6A	00671001	3
		00487311	
		00594923	
Mikrofon	NTI Audio TalkBox	TNN492	1
	Brüel & Kjør Type 4165	2068937	2
		2068935	
Forforsterker	Norsonic Type 1201	30517	2
		23824	
Mikrofonforsterker	Norsonic Front End Type 336	18508	1
Lydkort	Roland Octa-Capture Model UA-1010	A7E66780	1
PC	Dell Vostro 3550	DQ18BR1	1
Avstandsmåler	Bosch Type PLR 50 C	504522938	1
Programvare	EASERA 1.2.13		1
	Audacity 2.1.1		1
	MATLAB R2017a		1
Kabler	XLR – XLR		3
	6,3 mm jack – XLR		3
	BNC – XLR		2
	6,3 mm jack – 6,3 mm jack		1
	Norsonic 1408A mikrofonkabel 10 m		2
	Norsonic 1408A mikrofonkabel 5 m		2
Batteri	9 V		2
	AAA		3
Mikrofonstativ			2
Mikrofonklype			2
Stativ til TalkBox			1
Skjøteledning			3
Målebånd	2 m		1
Maskeringstape			1

### 3.6.2 Direktivitet til TalkBox

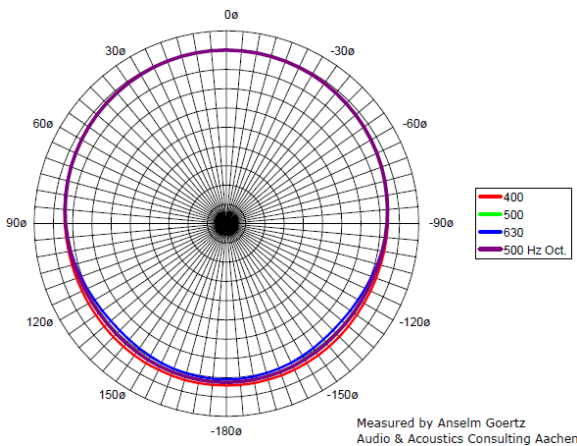
Direktiviten til kilden som ble brukt i impulsresponsmålingene, er vist i figur 3.12.



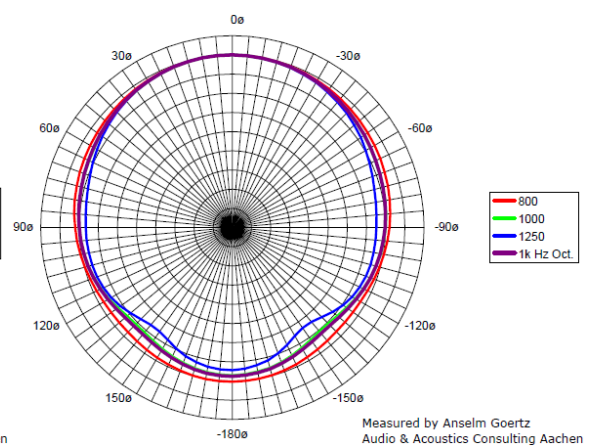
(a) 1/1-oktavbåndet 125 Hz.



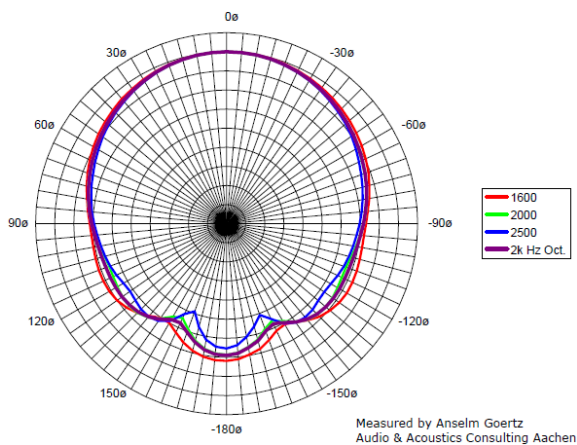
(b) 1/1-oktavbåndet 250 Hz.



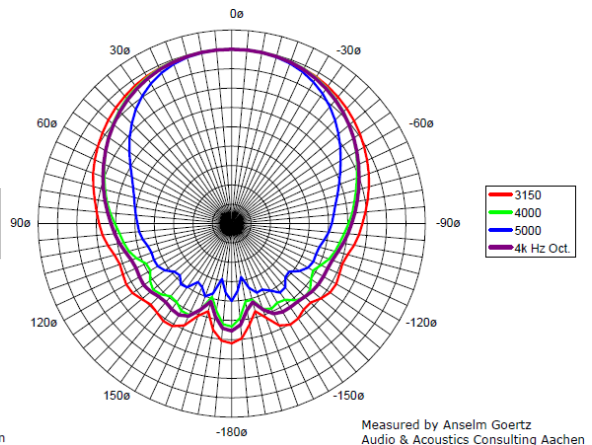
(c) 1/1-oktavbåndet 500 Hz.



(d) 1/1-oktavbåndet 1 kHz.



(e) 1/1-oktavbåndet 2 kHz.



(f) 1/1-oktavbåndet 4 kHz.

**Figur 3.12:** Direktiviteten til kilden som ble brukt i impulsresponsmålingene, fra 100 Hz til 5 kHz [29].



# Kapittel 4

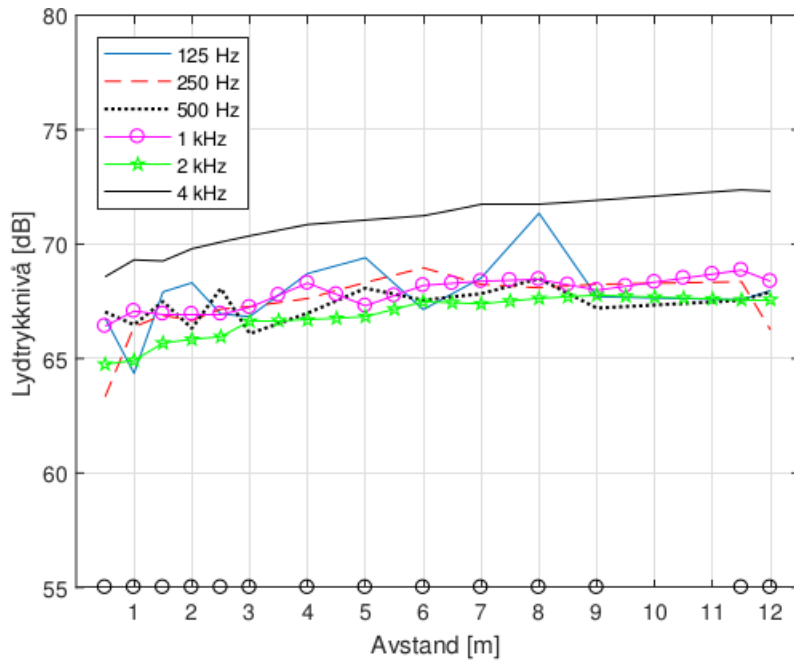
## Resultater

I dette kapitlet vil alle resultater fra målinger og beregninger bli presentert. Avsnitt 4.1 dekker måling av bakgrunnsstøynivå, mens måling av forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner,  $C_{50}$ , presenteres i avsnitt 4.2. Avsnitt 4.3 tar for seg forholdet mellom nyttig og unyttig energi,  $U_{50}$ , mens avsnitt 4.4 dekker måleresultater begrenset til 1/1-oktavbåndene 500 Hz og 1 kHz, som er det gjeldende frekvensområde for akustisk kapasitet. Til sist, i avsnitt 4.5, kommer den akustiske kapasiteten ved ulike volum i Realfagskantina.

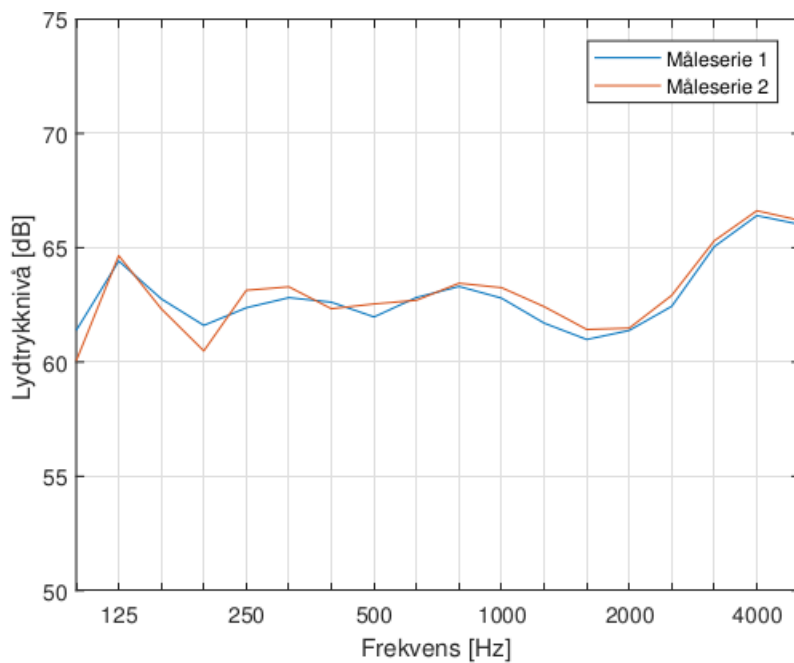
### 4.1 Bakgrunnsstøynivå

Bakgrunnsstøynivået i rommet som funksjon av avstand fra absorbenten er vist i figur 4.1. Målepunktenene er vist som svarte sirkler på  $x$ -aksen, og disse indikerer hvilke punkter på grafen som er målt, og hvilke som er beregnet ved hjelp av lineær interpolasjon. Plottet er midlet over to måleserier.

Figur 4.2 viser bakgrunnsstøynivået i rommet som funksjon av frekvens. Figuren viser begge måleseriene. Legg også merke til at  $y$ -verdiene her er angitt i 1/3-oktavbånd, og de vil derfor avvike fra  $y$ -verdiene i 4.1, som er angitt i 1/1-oktavbånd.



Figur 4.1: Bakgrunnsstøynivå som funksjon av avstand fra absorberent.

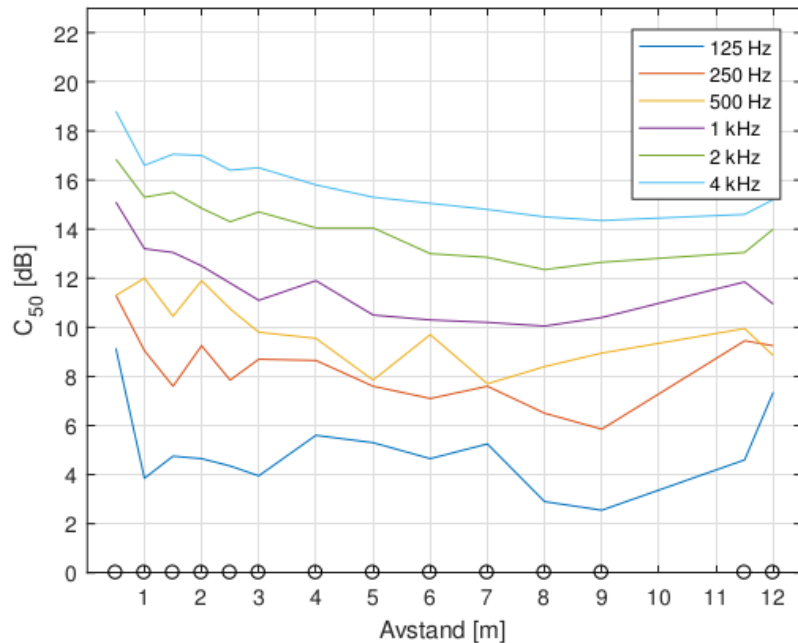


Figur 4.2: Bakgrunnsstøynivå som funksjon av frekvens.



## 4.2 Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner

Figur 4.3 viser  $C_{50}$  i rommet som funksjon av avstand fra absorberent. Plottet er midlet over to måleserier, der kilden var vendt mot henholdsvis rommets ene og andre langside. Også figur 4.4 og figur 4.5 viser  $C_{50}$  i rommet som funksjon av avstand fra absorberent, men i disse tilfellene er målingene gjort med kilden rettet henholdsvis mot og fra absorberenten. Det medfører at det er færre målepunkter som ligger til grunn for disse to plottene, og  $x$ -aksen ser derfor litt annerledes ut. Målepunktene er fremdeles vist som svarte sirkler på  $x$ -aksen. Verdier for  $C_{50}$  beregnet ved hjelp av likning (2.16) er vist i tabell 4.1.

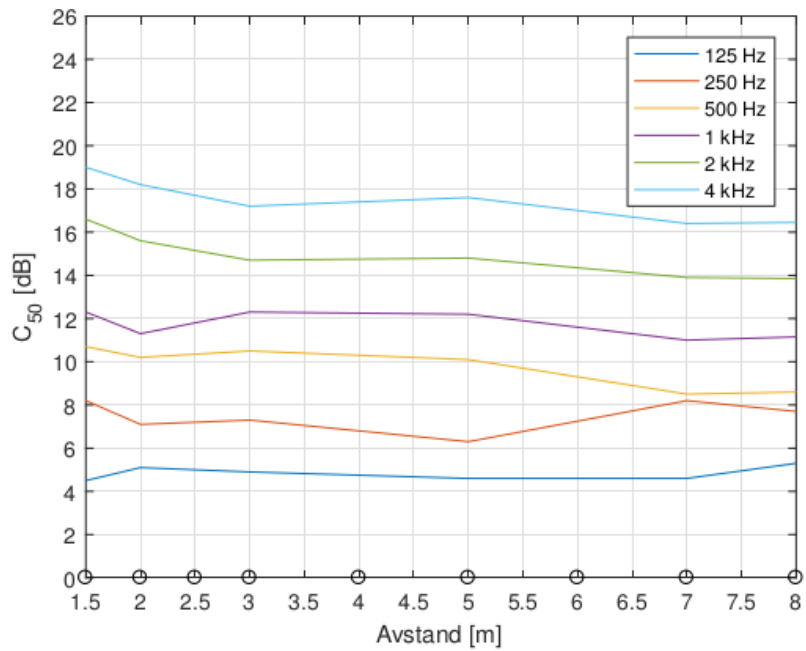


**Figur 4.3:**  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent.

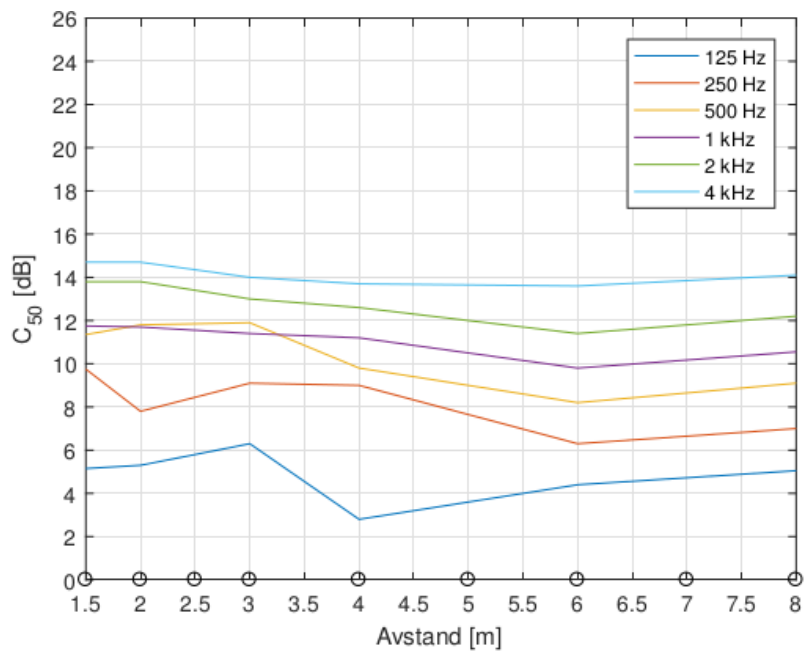
**Tabell 4.1:**  $C_{50}$  beregnet utfra (4.1).

Frekvens [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$C_B$ [dB]	3,78	5,08	7,71	7,03	7,46	7,84

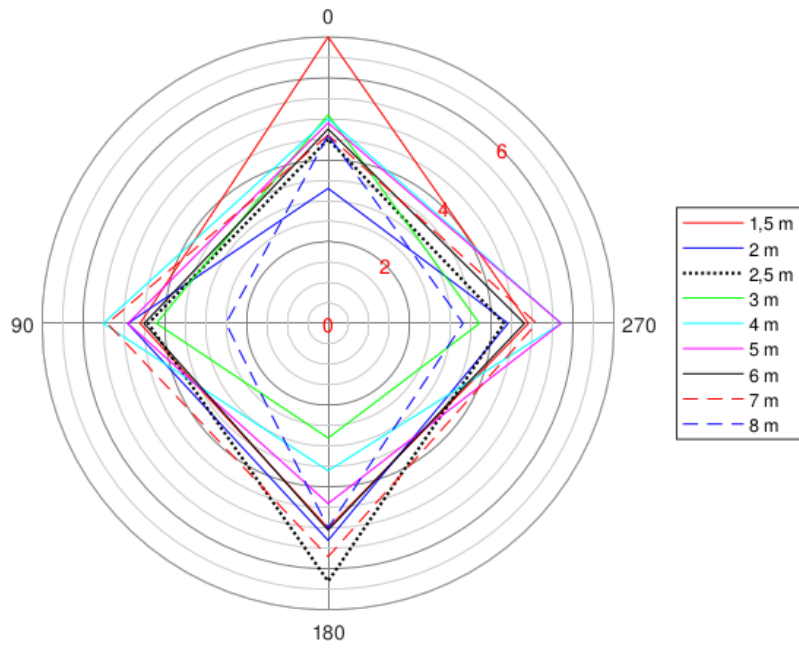
Figur 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 og 4.11 viser resultatene fra figur 4.3, 4.4 og 4.5 på 1/1-oktavbåndsnivå og i polar form. 0 grader på figurene viser måleresultatene med kilden rettet mot absorberenten. Av det følger da at 180 grader viser måleresultatene med kilden rettet vekk fra absorberenten, mens 90 og 270 grader viser hver av de to måleseriene som er midlet i figur 4.3. Ettersom alle disse måleseriene er inkludert i samme plott, er ikke alle målepunktene fra figur 4.3 tatt med her. Veggen som kilden var rettet mot på 90 grader, er i stor grad kledd med spaltepanel som ved tidligere målinger er funnet å være lite effektivt. Veggen på 270 grader består stort sett av glass, men er delvis dekket av nokså tunge gardiner. Plottenes r-akse angir  $C_{50}$  i dB.



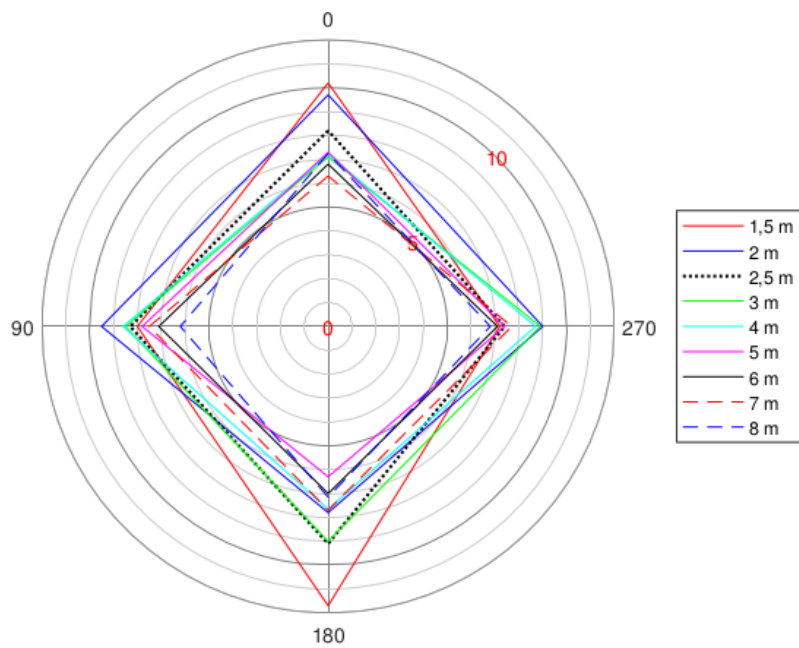
**Figur 4.4:**  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent, med kilden rettet mot absorberenten.



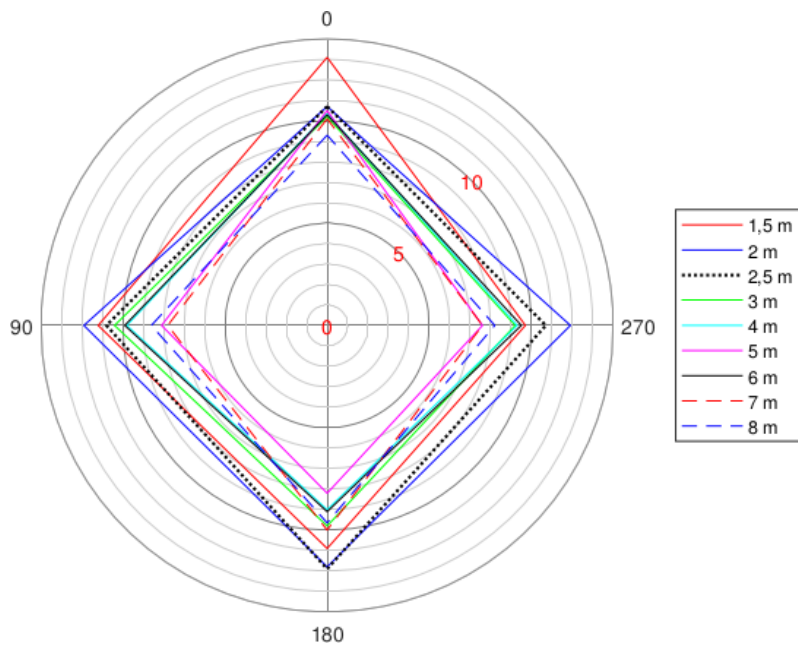
**Figur 4.5:**  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent, med kilden rettet vekk fra absorberenten.



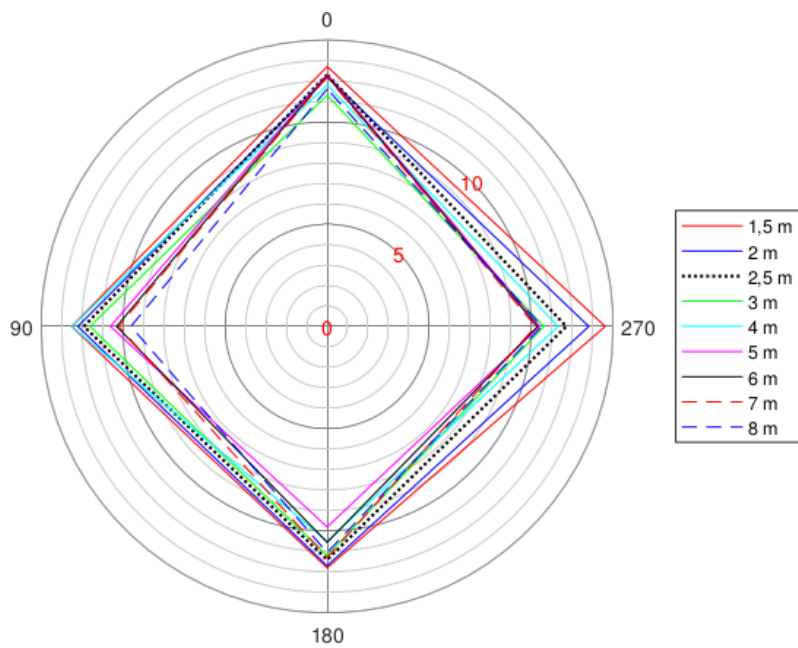
**Figur 4.6:** Polarplott av  $C_{50}$  i 1/1-oktavbåndet 125 Hz.



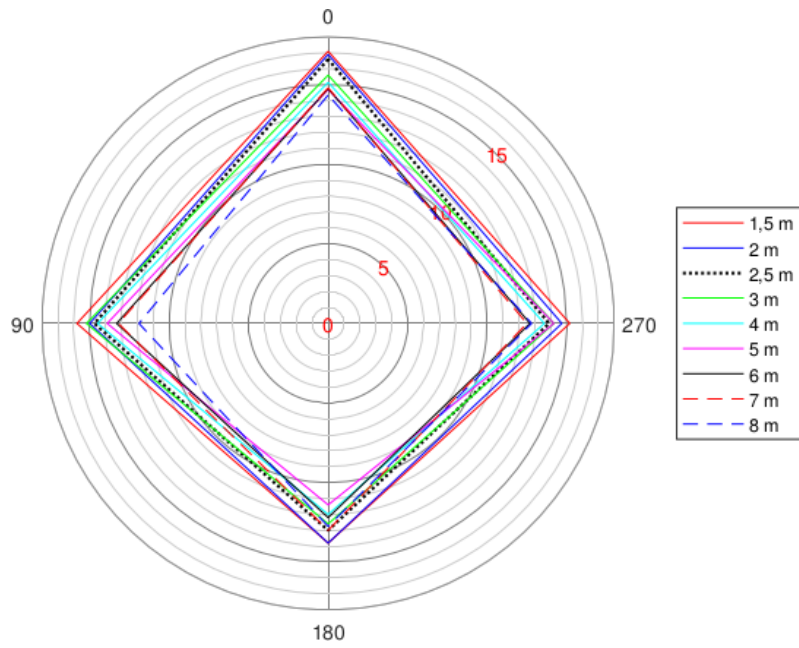
**Figur 4.7:** Polarplott av  $C_{50}$  i 1/1-oktavbåndet 250 Hz.



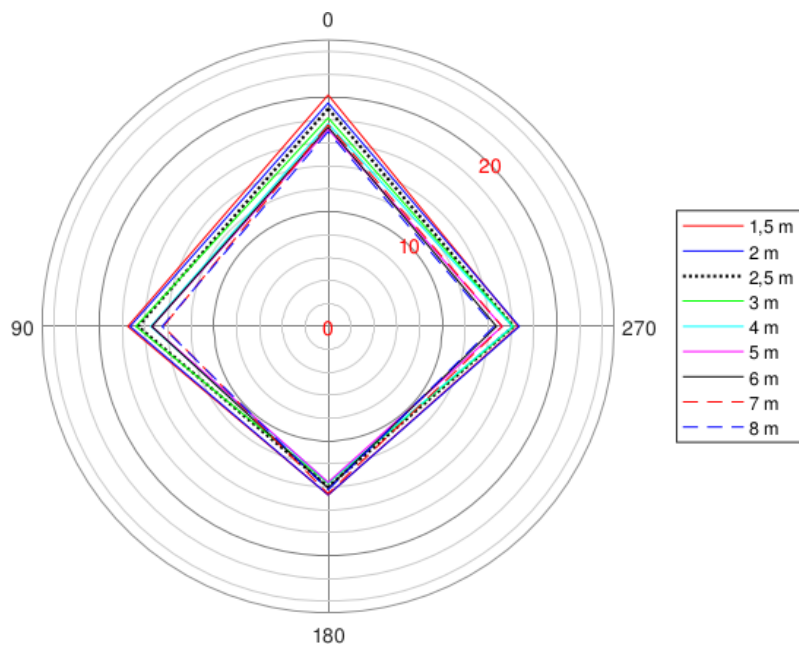
**Figur 4.8:** Polarplott av  $C_{50}$  i 1/1-oktavbåndet 500 Hz.



**Figur 4.9:** Polarplott av  $C_{50}$  i 1/1-oktavbåndet 1 kHz.



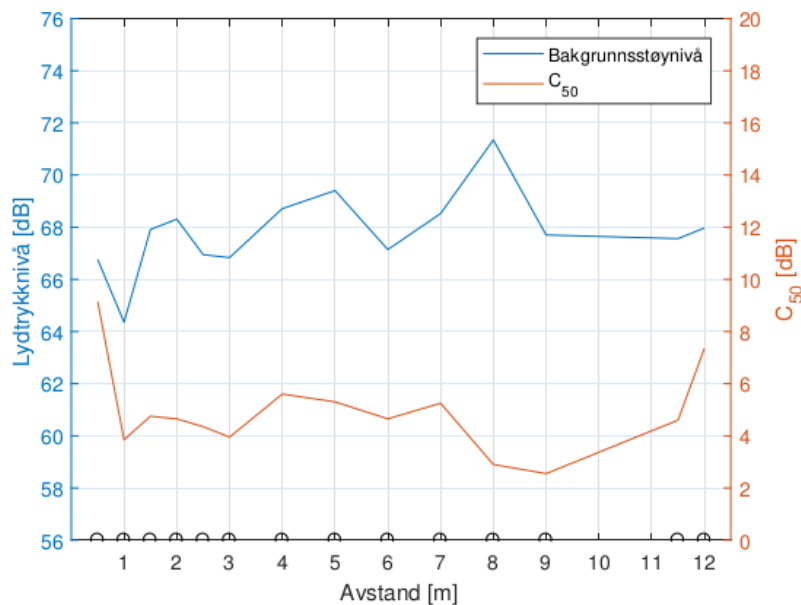
**Figur 4.10:** Polarplott av  $C_{50}$  i 1/1-oktavbåndet 2 kHz.



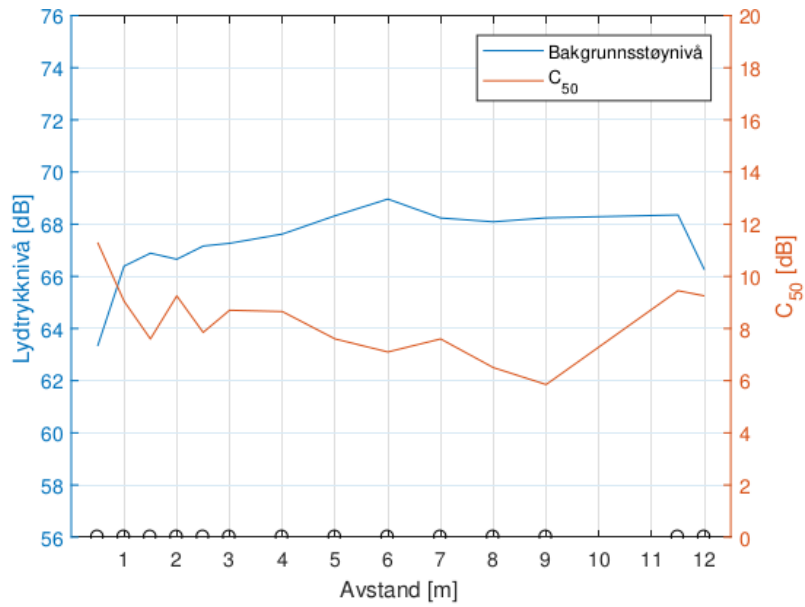
**Figur 4.11:** Polarplott av  $C_{50}$  i 1/1-oktavbåndet 4 kHz.

### 4.3 Forholdet mellom nyttig og unyttig lydenergi

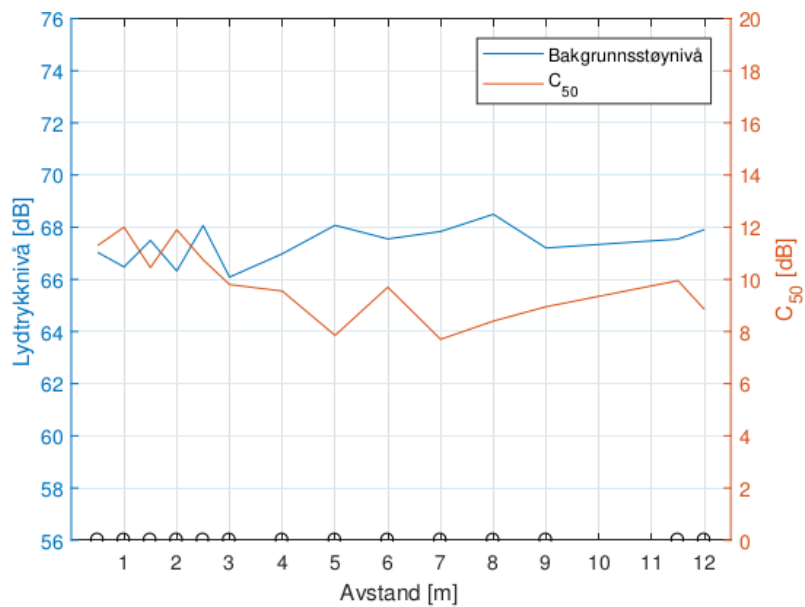
I figur 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 og 4.17 er resultatene fra figur 4.1 og figur 4.3 fremstilt på 1/1-oktavbåndsnivå. Resultatene fra de to målingene er vist på hver sin  $y$ -akse, der bakgrunnsstøynivået er å finne på aksene til venstre, mens  $C_{50}$  er å finne på aksene til høyre. Målepunktene er igjen indikert som svarte sirkler på  $x$ -aksen. Kombinert utgjør disse to parametrene  $U_{50}$ , som er vist i figur 4.18 for alle de seks aktuelle 1/1-oktavbåndene.



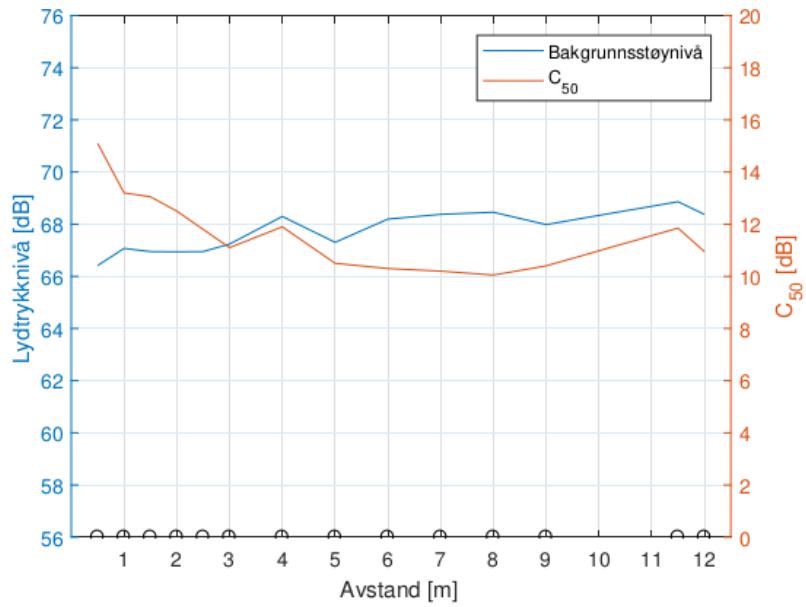
**Figur 4.12:** Bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorber i 1/1-oktavbåndet 125 Hz.



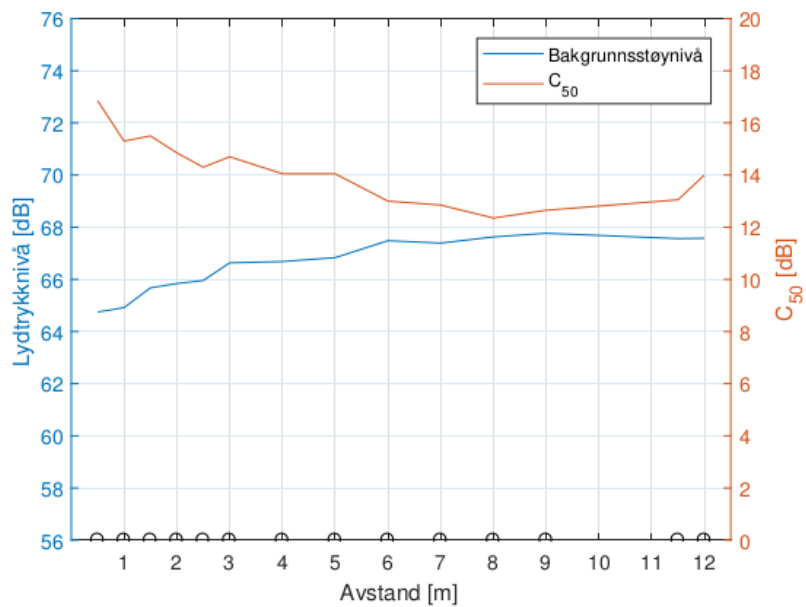
**Figur 4.13:** Bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorpent i 1/1-oktavbåndet 250 Hz.



**Figur 4.14:** Bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorpent i 1/1-oktavbåndet 500 Hz.

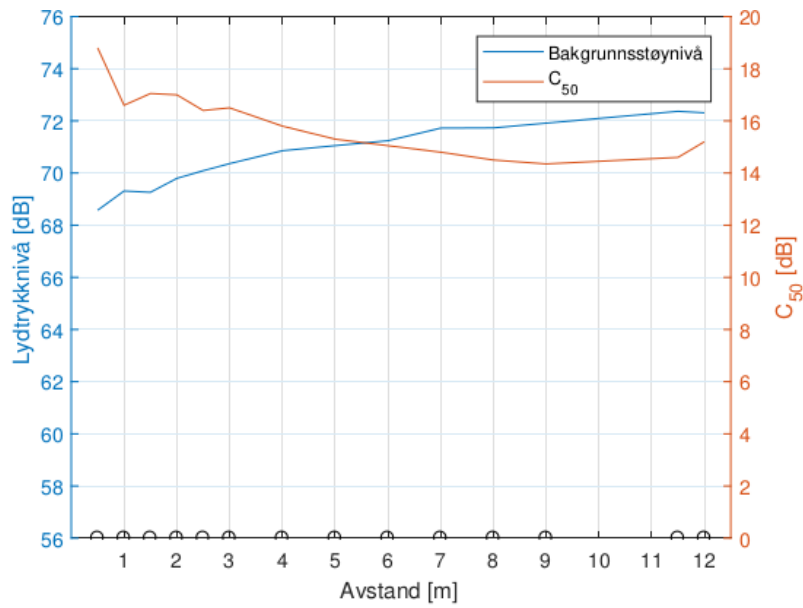


**Figur 4.15:** Bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 1 kHz.

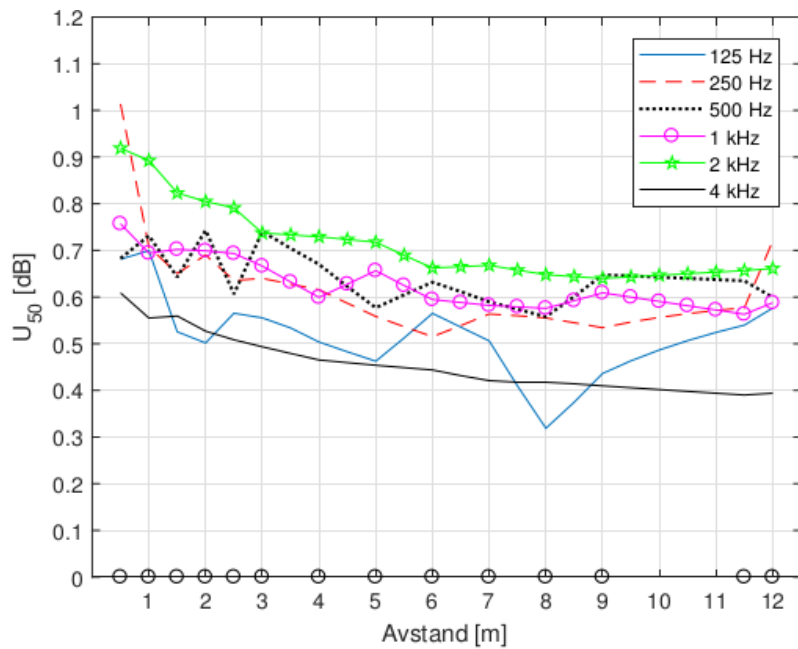


**Figur 4.16:** Bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 2 kHz.





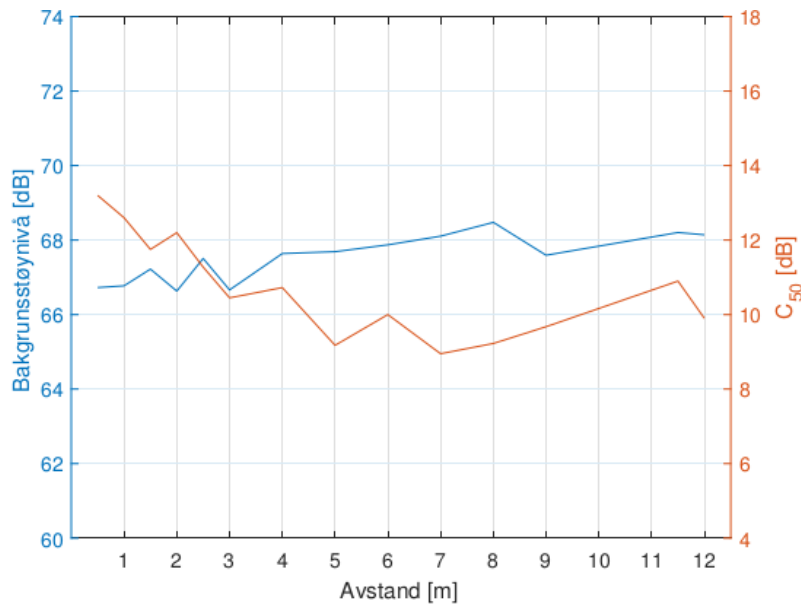
**Figur 4.17:** Bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent i 1/1-oktavbåndet 4 kHz.



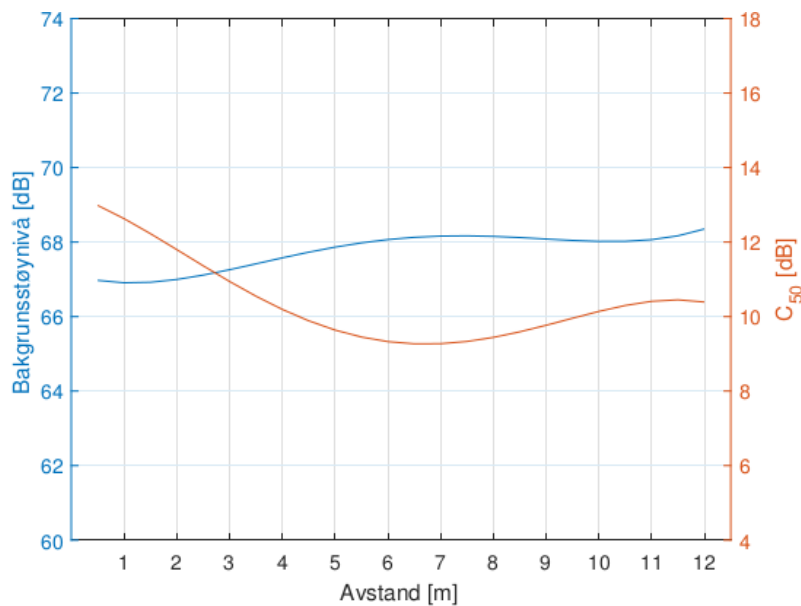
**Figur 4.18:**  $U_{50}$  som funksjon av avstand fra absorberent.

## 4.4 Resultater i frekvensområdet 500 – 1000 Hz

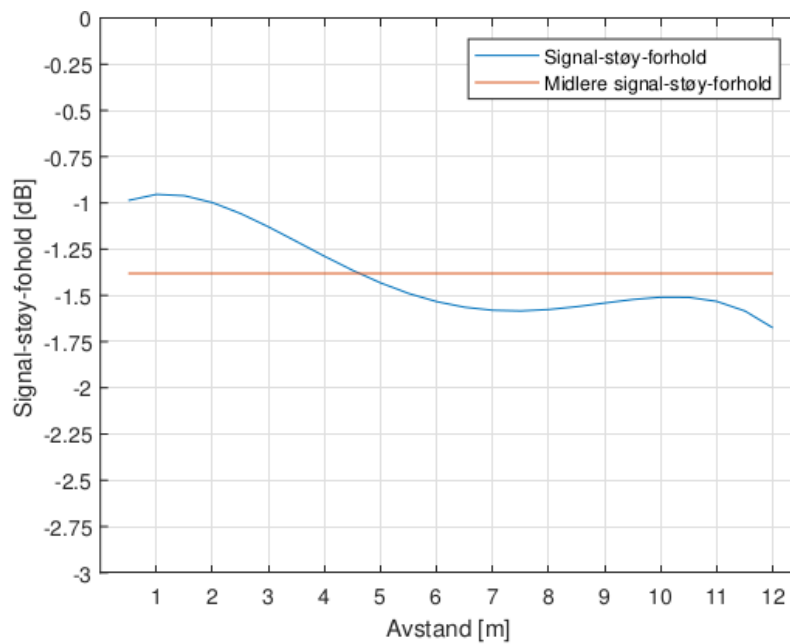
Figur 4.19 viser et gjennomsnitt av resultatene i figur 4.14 og 4.15. Det er dette frekvensområdet som er aktuelt ved beregning av akustisk kapasitet. En fjerdegrads tilnærming av figur 4.19 er vist i figur 4.20, og basert på dette er signal-støy-forholdet regnet ut ved hjelp av likning (2.10) og (2.13). Dette er vist i figur 4.21.



**Figur 4.19:** Bakgrunnstøynivå og  $C_{50}$  som funksjon av avstand fra absorber, midlet over 1/1-oktavgbåndene 500 Hz og 1 kHz.



**Figur 4.20:** Fjerdegrads tilnærming av figur 4.19.



**Figur 4.21:** Signal-støy-forhold i rommet, midlet over 1/1-oktavbåndene 500 Hz og 1 kHz.

## 4.5 Akustisk kapasitet ved ulike volum

Den akustiske kapasiteten ved ulike volumavgrensninger i Realfagskantina er vist i tabell 4.2. De ulike avgrensningene er beskrevet i avsnitt 3.5.

**Tabell 4.2:** Akustisk kapasitet i Realfagskantina ved ulike volumavgrensninger.

Avgrensning	1	2	3	4	5	6	7
Volum [m <sup>3</sup> ]	4360	5390	4810	5380	6850	7350	7810
Akustisk kapasitet	132	163	145	162	207	222	235



# Kapittel 5

## Diskusjon

I dette kapitlet kommer diskusjon og analyse av resultatene i kapittel 4. Avsnitt 5.1 dekker det målte bakgrunnsstøynivået, mens avsnitt 5.2 tar for seg målingene av forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner. I avsnitt 5.3 vil det bli analyse av fordelene ved nærhet til en absorberende flate, og dette leder til diskusjon rundt optimal absorbertplassering i avsnitt 5.4, og forslag til praktiske løsninger i avsnitt 5.5. I avsnitt 5.6 gjøres det en vurdering opp mot akustisk kapasitet, og dette avsnittet tar også for seg en analyse av parameteren  $U_{50}$ . I avsnitt 5.7 blir det diskusjon av frekvensbegrensningen som er lagt til grunn for begrepet akustisk kapasitet, og kapitlet avsluttes med avsnitt 5.8, som dekker volumets innvirkning på den akustiske kapasiteten.

### 5.1 Bakgrunnsstøynivå

I alle de seks 1/1-oktavbåndene er det en klar tendens til at bakgrunnsstøynivået øker når avstanden til absorberenten øker. Tendensen er klarest i de høyeste frekvensene, og i 4 kHz-båndet er det en økning på om lag 4 dB fra første til siste målepunkt. De laveste frekvensene har større variasjoner mellom målepunktene, og det virker naturlig at lydbildet i rommet påvirkes av rommets moder, ettersom Schroeder-frekvensen i rommet er så høy som 110 Hz. Dette støttes opp av det er jevn avstand mellom toppene i 125 Hz-båndet. Unntaket er i området nærmest den reflekterende veggen, men i disse punktene ble det ikke gjort målinger. Plottlinjen til dette oktavbåndet har også daler med nokså jevn avstand seg i mellom, og det virker sannsynlig at kurven ville fulgt et lignende mønster også mellom 9 og 11,5 m om det hadde blitt gjennomført målinger her.

Generelt er den økende tendensen sterkest i umiddelbar nærhet av absorberenten, og kurvene flater noe ut ved midten av rommet. Her ligner det mer på det man kan forvente seg av et diffust lydfelt, med små variasjoner mellom målepunktene. Med unntak av det høyeste og laveste 1/1-oktavbåndet, er det også lite variasjoner

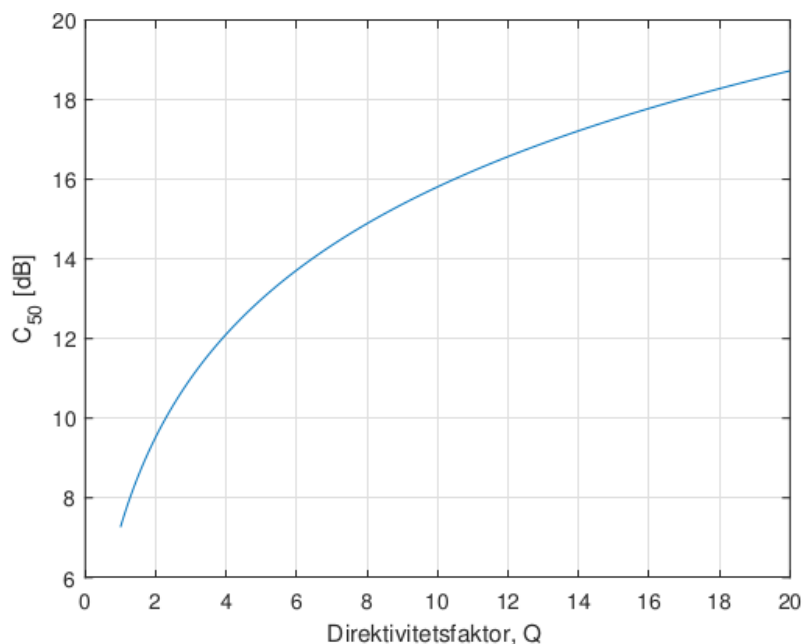
mellom frekvensene. Avviket i 4 kHz-båndet er påfallende, og kan muligens tilskrives støy fra lysarmaturen i rommet eller en feil på en av høyttalerne. Figur 4.2 er midlet over alle målepunkter, og eliminerer derfor i stor grad påvirkning fra moder.

Videre ser det ut til at den sterkeste tendensen er å finne i overkant av de dominerende frekvensene i menneskelig tale. Det gjør at effekten kanskje ikke vil oppleves like sterk som den generelle endringen i bakgrunnsstøynivå tilsier. Det er imidlertid ikke bare gjennom tale at det genereres lyd i et serveringslokale. Klirring med glass og bestikk avgir mye lyd i frekvenser over 1 kHz, og den konstante lyden av bestikk mot tallerken kan være en sann plage i et lokale med høy etterklangstid i disse frekvensene. Med andre ord har også lavere bakgrunnsstøynivå i de høye frekvensene en verdi. For øvrig er det viktig å merke seg at den aktuelle absorbenten er en porøs absorbent, og det er derfor nærliggende å tro at en absorbent som i større grad er tilpasset frekvensområdet for menneskelig tale vil gi bedre resultater nettopp i det frekvensområdet.

## 5.2 Forholdet mellom tidlige og sene refleksjoner

Ut fra skalaen i figur 2.9, er Vertshuset tilsynelatende et rom med gode til svært gode forhold for tale. Det stemmer dårlig overens med den målte etterklangstiden, som for hele frekvensspekteret ligger over det som er tillatt i henhold til NS 8175:2012, og den tilhørende akustiske kapasiteten, som er godt under halvparten av antallet stoler i lokalet. Det er da vesentlig å huske på at parameteren  $C_{50}$  i første rekke er ment til å vurdere forholdene for tale i et auditorium, teater eller lignende, som ofte er store rom der en eller flere talere skal nå et større publikum som befinner seg forholdsvis langt unna. I tillegg kan det ikke være noen tvil om at to personer som setter seg ned for å føre en samtale på en meters avstand i et tomt rom, vil ha få problemer med det under normale omstendigheter. Problemene dukker imidlertid opp når rommet blir så tett befolket at bakgrunnsstøynivået begynner å stige, og det viktige i denne sammenhengen er altså verdienes endring fra punkt til punkt i rommet, snarere enn verdienes størrelse i seg selv.

Det er også interessant å se på verdienes størrelse i ulike frekvenser, og her er det tydelig at verdiene øker merkbart i takt med frekvensen. Det vil delvis skyldes etterklangstiden i rommet, som er klart høyere opp til og med 1/3-oktavnbandet 250 Hz. Høy etterklangstid innebærer mye sene refleksjoner, som vil gi utslag i lav  $C_{50}$ . Fra 400 Hz og oppover er etterklangstiden i rommet nokså lik, så i dette området vil ikke etterklangstiden påvirke  $C_{50}$  i særlig stor grad. Det er derfor tydelig at kildens direktivitet har stor innvirkning på resultatet, og de beregnede verdiene i tabell 4.1 støtter også oppunder dette. Der er det brukbart samsvar i 1/1-oktavnbandet 125 Hz, hvor kilden er nesten omnidireksjonell, og videre øker avvikene i takt med kildens økende direktivitet. L. G. Marshall viser i sitt arbeid eksempler på  $C_{50}$  med  $Q = 1$  og  $Q = 20$ , og med en etterklangstid på 0,7 s, slik som i høy- og mellomfrekvensene i Vertshuset, vil  $C_{50}$  variere med  $Q$  mellom disse to verdiene som vist i figur 5.1.



**Figur 5.1:** Forholdet mellom  $Q$  og  $C_{50}$  ved et romvolum på  $280 \text{ m}^3$ , etterklangstid på  $0,7 \text{ s}$ , og  $1 \text{ m}$  mellom kilde og mottaker, beregnet etter (2.17).

Det innebærer at selv små endringer i direktivitet vil kunne gi betydelige utslag på  $C_{50}$ . Derfor er det verdt å merke seg at lyd-kilden som er brukt i målingene er noe mer direktiv enn et menneske, særlig ved høye frekvenser. Man må altså regne med at de faktiske forhold ved en samtale vil ligge noe under de målte verdier, men disse utslagene vil ikke ha særlig stor betydning ettersom frekvensene som rammes er lite representert i menneskelig tale.

### 5.2.1 Påvirkning av nærhet til absorpent

Også  $C_{50}$  reduseres når avstanden til absorpent øker. Denne tendensen er klart sterkest i umiddelbar nærhet av absorpent, særlig ved lave frekvenser. Ved høye frekvenser er fallet ikke fullt så sterkt over den første halvmeteren, men til gjengjeld er det en tydeligere tendens videre utover i rommet. Bunnpunktet ligger litt over halvveis ut i rommet i retning vekk fra absorpent, før det igjen kommer et merkbart oppsving når den reflekterende vegg nærmer seg.

Dette stemmer godt overens med forventningene. I nærheten av absorpent vil en stor andel av direktelyden absorberes umiddelbart, og dermed redusere den gjenværende lydenergien i rommet betraktelig. Samtidig vil det reflekteres en del mellom langveggene, og siden rommet bare er  $8 \text{ m}$  bredt, vil lydbølgene reflekteres både frem og tilbake, med en tilbakelagt avstand på  $16 \text{ m}$ , innen grensen på  $50 \text{ ms}$  etter direktelyden er nådd. Jo lenger vekk fra absorpent man beveger seg vil et stadig mindre segment av direktelyden treffe absorpent, og den gjenværende lydenergien vil være større, og ta lengre tid å bryte ned.

Nær den reflekterende veggen er det naturlig at verdiene øker igjen, ettersom det her vil komme en svært sterk, tidlig refleksjon fra denne veggen. At noen av kurvene peker nedover igjen fra målepunktet 11,5 til 12 m, stemmer dårlig overens med forventningene, men en mulig forklaring kan være at bordet som kan ses på figur 3.4 mellom cirka 9 og 11 m gir en ekstra tidlig refleksjon i målepunktet 11,5 m. Disse avvikene er uansett nokså små, og har liten innvirkning på den generelle tendensen om at  $C_{50}$  øker mot slutten av rommet. Det kan også ses en økning midt i rommet, særlig i de laveste frekvensene. Dette skyldes at det her vil komme én refleksjon fra *begge* kortveggene innen grensen på 50 ms, mens det nærmere kortveggene bare vil være den første refleksjonen fra den nærmeste veggen som rekker frem i tide.

### 5.2.2 Kildens retning i forhold til absorbenten

Med kilden rettet mot absorbenten ble resultatene tydelig bedre i 1/1-oktavbåndene 2 kHz og 4 kHz. Ved disse frekvensene er det også merkbart høyere  $C_{50}$  med kilden rettet mot sidene enn vekk fra absorbenten. Dette skyldes nok delvis at disse frekvensene absorberes noe mer på langsiden enn på den høyreflekterende kortsiden, men ettersom det er i disse to retningene målingene vist i figur 4.3 er gjort, er det tydelig at absorbenten har stor innvirkning når den er i 90 graders retning i forhold til kilden.

I de øvrige 1/1-oktavbåndene er det nokså liten forskjell å spore mellom de ulike retningene, i hvert fall i form av tydelige trender. I de laveste frekvensene er det tidvis store variasjoner mellom retningene, men her er det også så store variasjoner fra målepunkt til målepunkt at det er vanskelig å trekke noen slutninger. Resultatene lider trolig av at det ikke var mulig å måle nære veggene med både kilde og mottaker plassert langs rommets lengdeakse, og det virker sannsynlig at det vil være sterkere tendenser nærmere de to kortveggene.

Et annet viktig poeng er at disse målingene er gjort med en porøs absorbent, som vil være klart mest effektiv i den øvre delen av frekvensområdet. Ettersom det er til dels stor forskjell ved de høyeste frekvensene, virker det derfor rimelig å tro at man vil kunne se en sterkere effekt i lavere frekvenser om det var benyttet en godt fungerende resonansabsorbent. Dette vil være særlig hjelpsomt i større rom, der luftabsorpsjon vil være en sterk bidragsyter i de høyere frekvensene. Samtidig er kilden langt mer direktiv i de høye frekvensene, og det vil uten tvil påvirke resultatene slik at det alltid vil være forskjeller i de høye frekvensene.

Nå er også mennesker mer direkte i de høye frekvensene, men ikke på samme nivå som denne kilden. I tillegg er de høye frekvensene lite representert i menneskelig tale, og virker derfor tvisomt at det har noe særlig for seg å tilstrebe at så mange gjester som mulig skal være vendt med ansiktet mot en absorbent. Unntaket kan være i barnevennlige serveringslokaler, der det går an å plassere barnestoler vendt mot nærmeste absorbent, slik at høyfrekvente lyder fra barnemunn dempes så effektivt som mulig.



## 5.3 Fordel ved nærhet til absorberende flate

Det er tydelig at det er i umiddelbar nærhet av absorbenten at både bakgrunnsstøynivået er lavest, og  $C_{50}$  er høyest. Unntaket her er 1/1-oktavbåndet 500 Hz, hvor begge de to størrelsene varierer nære absorbenten, men videre utover i rommet blir bakgrunnsstøynivået høyere og  $C_{50}$  lavere, så det vil uansett oppleves som mer behagelig å være nære absorbenten også dersom 500 Hz-båndet dominerer støybildet.

Også ved den høyreflekterende veggen er  $C_{50}$  høyere enn midt i rommet, men her er også bakgrunnsstøynivået høyere, og de to vil dermed jevne hverandre ut. Dette støttes opp av  $U_{50}$ , som har en sterkere nedgang i første halvdel av rommet, før den flater mer ut i retning den reflekterende veggen. Unntaket her er 1/1-oktavbåndet 250 Hz, som har en markant økning på slutten, takket være en nedgang i bakgrunnsstøynivå på om lag 2 dB mellom målepunktene 11,5 og 12 m. Den samme ekstreme endringen kan også ses i motsatt ende av rommet, i nærheten av absorbenten, og det virker derfor trolig at dette er et resultat av rommets geometri snarere enn at akkurat dette 1/1-oktavbåndet har spesielle egenskaper.

Totalt sett ser det ut til at det er i de lave frekvensene at  $C_{50}$  påvirkes mest av avstanden til absorbenten, mens det er i de høye frekvensene at bakgrunnsstøynivået påvirkes mest. I de lave frekvensene gir også nærhet til reflekterende vegg sterke positive utslag. Går man ut fra figur 4.18 ser det da ut til at det i de høye frekvensene er en betydelig fordel å være nære absorbenten. Det er det også i de lave frekvensene, men her kan man også dra fordel ved å være nære den reflekterende veggen. Forholdene der er ikke like bra som ved absorbenten, men de er bedre enn midt i rommet. Dette er i liten grad tilfelle i de høyere frekvensene, hvor  $U_{50}$  avtar eller holder seg på et jevnt nivå fra midten av rommet og utover mot den reflekterende veggen.

## 5.4 Optimal plassering av absorbent

I praktiske situasjoner vil det være vanskelig å gjøre alle i et rom til lags. Det er tydelig at nærhet til absorbent er gunstig, mens talerens retning i forhold til absorbenten spiller mindre rolle. I alle serveringslokaler av en viss størrelse, vil det være uunngåelig at en del bord plasseres et godt stykke unna nærmeste vegg. For disse gjestene er det derfor viktig at etterklangstiden i lokalet holdes på et akseptabelt nivå, slik at den akustiske kapasiteten ikke overskrides. Samtidig bør alle tilgjengelige flater i rommets midtområde utnyttes, og så langt det lar seg gjøre kles med en passende absorbent, slik at så mange som mulig får en viss nærhet til en eller annen absorbent. I tillegg bør absorbenten der det er mulig gå helt ut til hjørnene, slik at den også fanger opp refleksjonene fra motsatt side av hjørnene.

Utover det virker det utfra disse målingene nokså åpenbart at vegger er å foretrekke fremfor himling, men et forslag om å kle alle vegger med absorbenter vil nok ikke

falle i god jord hos en del arkitekter og restauranteiere. Himlingen bør derfor ikke avskrives som aktuell flate for påmontering av absorberter, og i svært mange tilfeller vil det være helt nødvendig med god absorpsjon i himling for å få tilstrekkelig lav etterklangstid og tilsvarende høy nok akustisk kapasitet.

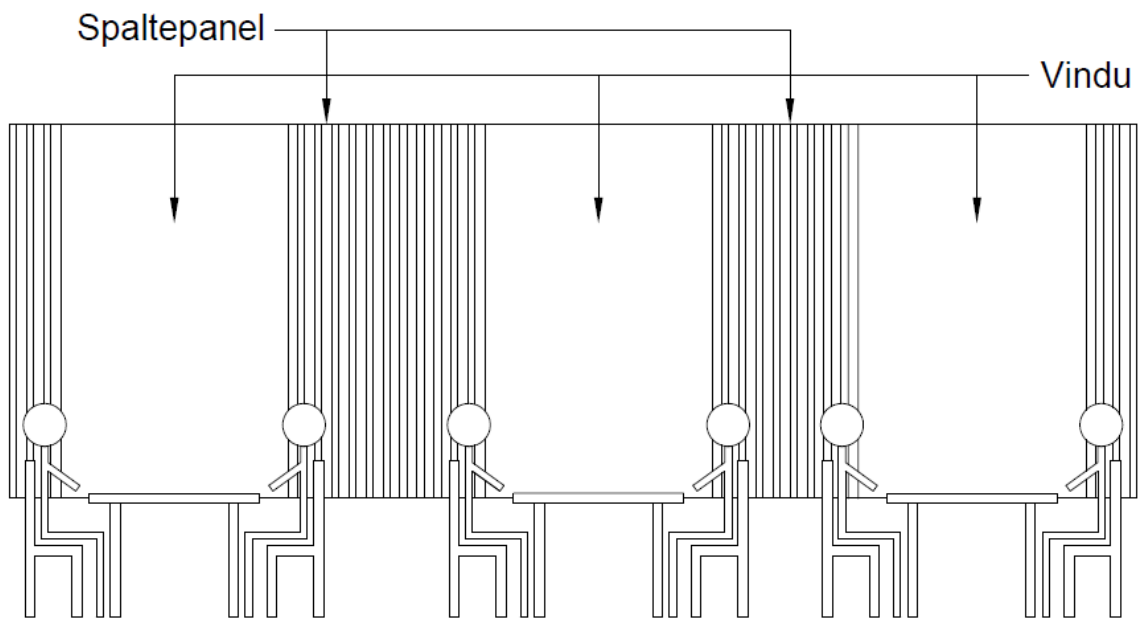
Himlingen kan også ha betydning på andre måter, for som figur 4.12–4.17 viser, er talerens retning i forhold til absorberenten nokså uviktig i frekvensene fra 1 kHz og nedover. Mennesker er litt mindre direkte i vertikalplanet enn i horisontalplanet, og i rom med lav takhøyde vil folk oppholde seg nokså nære himlingen. Er takhøyden 2,8 m, slik som i Vertshuset, og man antar at et gjennomsnittlig sittende menneske har sitt hode om lag 1,2 m over bakkenivå, er det altså bare 1,6 m opp til himlingen, mens det for en stående person på 1,8 m bare vil være 1 m opp. Dersom den samme effekten er gjeldende i vertikalplanet, vil altså samtlige personer befinne seg godt innenfor området der nærhet til absorberent er fordelaktig. Problemet med denne tesen er imidlertid at de sittende personene fremdeles vil være nærmere gulvet enn himlingen. Det bør derfor gjøres ytterligere målinger for å undersøke hvordan bakgrunnsstøynivået fordeler seg i vertikalretningen.

## 5.5 Praktiske løsninger

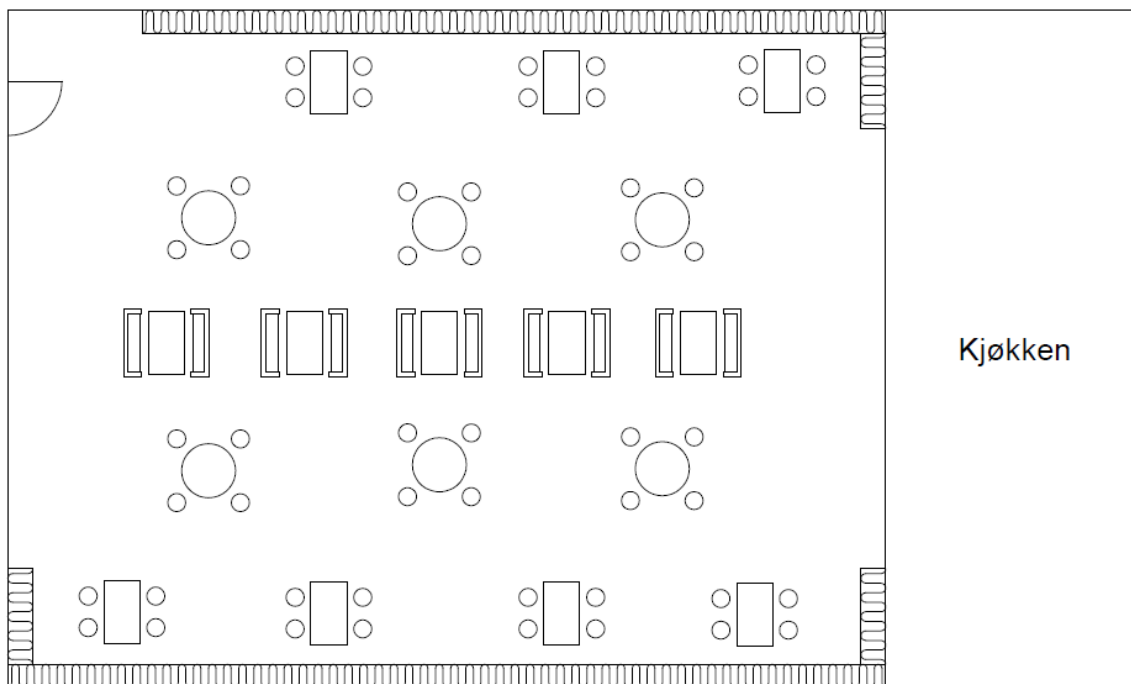
Hva som vil være aktuelt av veggabsorberter og andre tiltak, vil variere stort med etablissementets art. I finere restauranter er det åpenbart ikke ønskelig med store mengder stoff på veggene, og vindusbord er ofte populære blant lokalenes gjester. Det gjør at løsningen ikke er så enkel som å plassere absorberter der folk sitter, og kunst og annen utspjåking der det ikke er meningen at det skal sitte noen.

I lokaler der et mindre formelt estetisk uttrykk kan være aktuelt, er spaltepanel en utmerket løsning, særlig med tanke på at denne typen absorberent er gunstig i taleområdet. I nybygg går det an å kombinere vinduer og spaltepanel på en slik måte at bordene langs veggene kan plasseres ved et vindu, samtidig som spaltepanelet mellom vinduene begynner omtrent ved øret til de som sitter rundt bordet, slik at øynene kan se ut, mens ørene høster fruktene av å være rett ved absorberenten. For å imøtekomme moderne arkitekter er det heller ikke nødvendig å ha samme avstand mellom alle vinduene — for eksempel kan et langbord plasseres over et lengre strekke uten vinduer.

En annen effektiv løsning er høye sofagrupper, inspirert av båser på klassiske amerikanske dinere. Om disse trekkes opp til hodehøyde, vil de ikke bare gi et stort bidrag til å senke etterklangstiden i rommet, men også bidra til at alle som sitter i sofagruppen får nytte effekten av å være svært nære en absorberent. En fordel med denne løsningen er dessuten at slike sofagrupper også kan plasseres midt i rommet, og dermed øke antallet sitteplasser som er i nærheten av en absorberent, både direkte, i form av de som sitter i sofagruppen, og indirekte, i form av ordinære bord like ved. Dette er illustrert i figur 5.3.

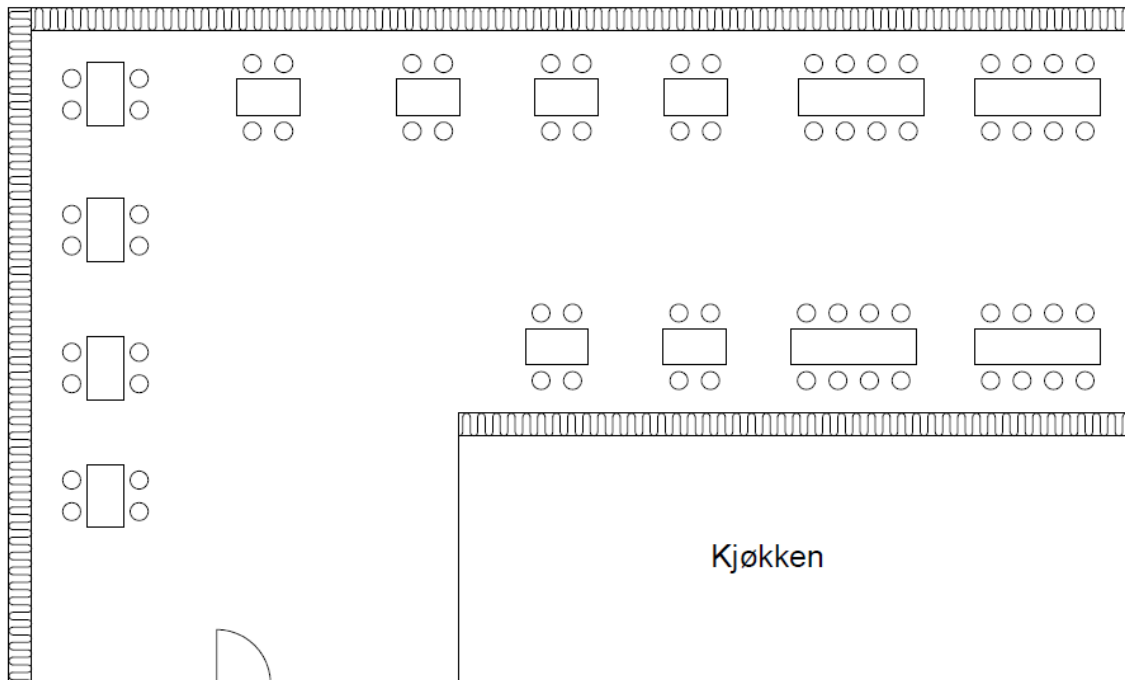


**Figur 5.2:** Eksempel på kombinasjon av vinduer og spaltepanel.



**Figur 5.3:** Eksempel på bruk av høye sofagrupper som supplerende absorbent. Vinduer kan her løses som i 5.2, eller plasseres på venstre kortside.

Figur 5.4 viser et eksempel på absorbentplassering i et L-formet lokale. Her kan den korte avstanden mellom veggene utnyttes, slik at en stor andel av bordene vil være plassert i nærheten av en absorbent.



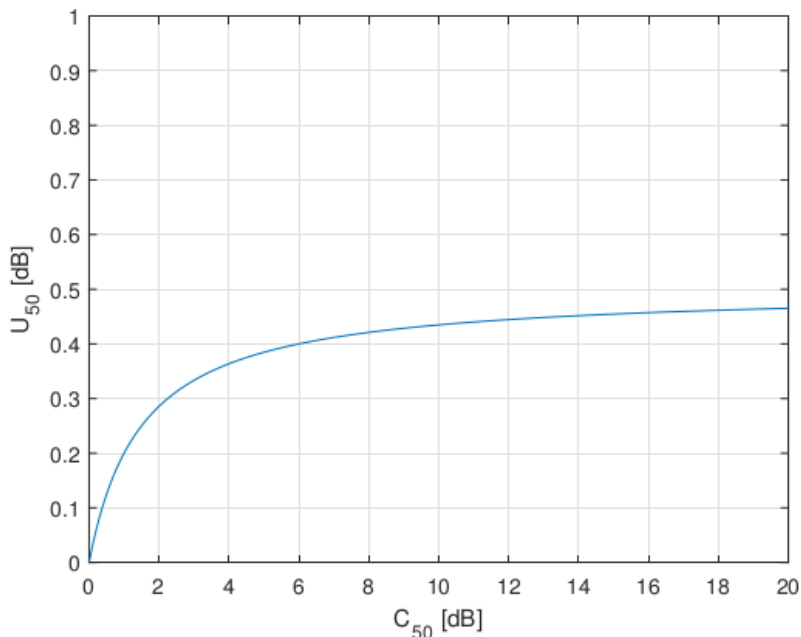
**Figur 5.4:** Eksempel på plassering av absorbenter i et L-formet rom. Vinduer kan løses som i figur 5.2, eller plasseres på L-ens kortsider.

## 5.6 Vurdering opp mot akustisk kapasitet

Som figur 4.21 viser, er signal-støy-forholdet merkbart høyere i den halvdelen av rommet som ligger nærmest absorbenten, og er på topp mellom 1 og 2 m fra. Forskjellen mellom disse to ekstremalene er cirka 0,6 dB, mens forskjellen mellom toppunktet og det midlere signal-støy-forholdet er cirka 0,4 dB. Signal-støy-forholdet ved disse målingene er cirka  $-1,6$  dB midt i rommet. Under antakelsen om at bakgrunnsstøynivået fordeler seg som dette også ved et høyere lydtryknivå, kan man altså når den akustiske kapasiteten er nådd oppnå et signal-støy-forhold på  $-2,6$  dB inne ved absorbenten, i forhold til gjennomsnittet på  $-3$  dB. Midt i rommet vil signal-støy-forholdet da være  $-3,2$  dB, og denne forskjellen vil etter Lazarus oppleves som forskjellen på utilstrekkelig når  $SNR < -3$ , og tilstrekkelig når  $0 > SNR > -3$  [16].

Med et signal-støy-forhold tilsvarende nedre grenseverdi for tilstrekkelig akustisk kapasitet,  $-3$  dB, vil  $C_{50}$  påvirke  $U_{50}$  som vist i figur 5.5. Det er her tydelig at  $U_{50}$  påvirkes lite av endringer i  $C_{50}$ , spesielt når  $C_{50}$  er så høy som i dette tilfellet. Figur 4.20 viser at  $C_{50}$  i det aktuelle frekvensområdet synker fra cirka 13 dB i høyeste punkt til ca. 9,5 dB i laveste punkt, men selv en såpass stor endring har liten innvirkning når  $C_{50}$  ligger rundt 10 dB. Midlet over alle målepunkter og frekvenser i 1/1-oktavbåndene 500 Hz og 1 kHz, er  $C_{50}$  lik 10,4 dB, og signal-støy-forholdets innvirkning på  $U_{50}$  når  $C_{50}$  er lik 10 dB, er vist i figur 5.6. Her viser  $x$ -aksen forholdet mellom energi fra bakgrunnsstøy og tale, og sammenhengen mellom denne størrelsen

og Rindels signal-støy-forhold er vist i tabell 5.1.



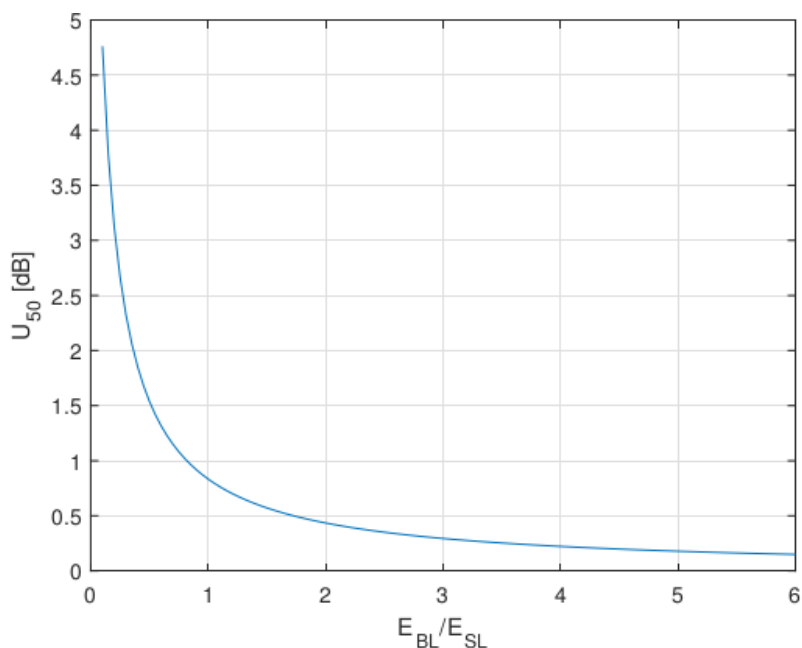
**Figur 5.5:** Hvordan  $C_{50}$  påvirker  $U_{50}$  ved et signal-støy-forhold på  $-3$  dB.

**Tabell 5.1:** Sammenheng mellom  $SNR$  og  $E_{BL}/E_{SL}$ .

$SNR$ [dB]	10	9	6	3	0	-3	-6	-7.5
$E_{BL}/E_{SL}$	0.1	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6

Dersom den akustiske kapasiteten er nådd, altså ved et signal-støy-forhold på  $-3$  dB, vil det kun resultere i en liten endring i  $U_{50}$  om man flytter seg nærmere en absorbent.  $U_{50}$  endrer seg raskere når signal-støy-forholdet er høyt, slik at ved et behagelig signal-støy-forhold på  $0$  dB, vil en endring i bakgrunnsstøynivå fra midten av rommet til nærheten av absorbenten gi større utslag på  $U_{50}$ . Problemet da er at effekten ikke vil være like kjærkommen, ettersom støynivået i rommet allerede er på et forholdsvis behagelig nivå. Unntaket er hørselshemmede, som i større grad vil oppleve ubehag også ved høyere signal-støy-forhold. For denne gruppen vil altså det å være nær en absorbent føre til enklere forhold for taleoppfattelse også i nokså stille omgivelser, og med prinsippet om universell utforming i bakhodet, bør det i aller høyeste grad tilstrebes at dette er en mulighet i de fleste lokaler.

I måleobjektet Vertshuset, er den akustiske kapasiteten så lav som  $20$ , mens det faktiske antall stoler er  $52$ . Dersom rommet er fullsatt, tilsvarer det et signal-støy-forhold på cirka  $-7$  dB, eller  $E_{BL}/E_{SL} \approx 5,6$ . Ved så støyende forhold vil det altså være minimalt med fordel å oppnå ved å plassere seg i nærheten av en absorbent. Om man ønsker å legge til rette for at dette skal være et tiltak som oppleves som positivt blant publikum, er det derfor viktig å påse at den akustiske kapasiteten ikke overskrides. Således blir akustisk kapasitet også et godt verktøy for å sikre at man oppnår en ønsket effekt av å plassere absorbenter på vegg.



Figur 5.6: Signal-støy-forholdets påvirkning på  $U_{50}$  ved  $C_{50} = 10$  dB.

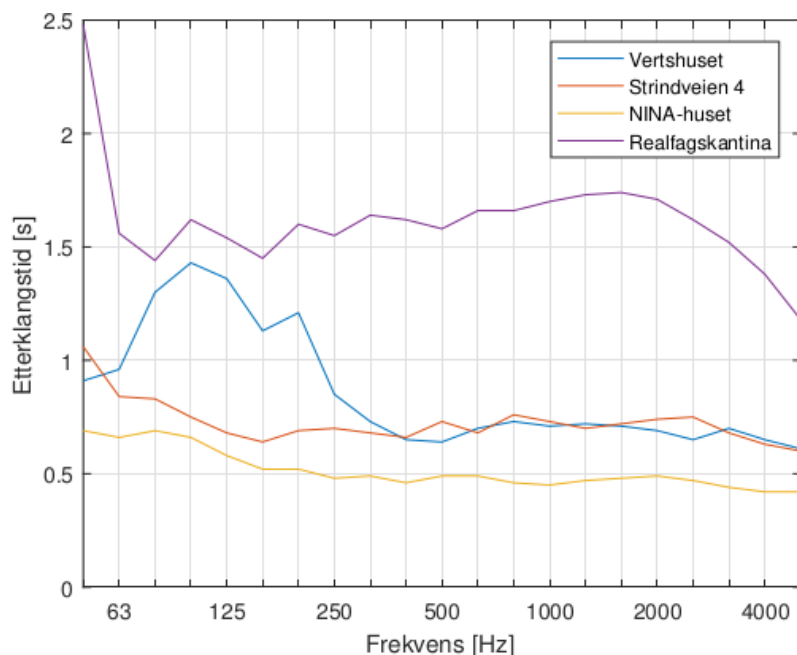
## 5.7 Frekvensområde ved beregning av akustisk kapasitet

I første omgang er begrepet akustisk kapasitet ment som en enkel kvantifisering som er lett å forstå både for restauranteiere og arkitekter. Det er altså ikke noen eksakt vitenskap, men en god pekepinn på de akustiske forholdene i et rom, sammenliknet med det antall mennesker rommet er tenkt å holde. En mer nøyaktig fremgangsmåte er beskrevet av Rindel i artikkelen ”Dynamic sound source for simulating the Lombard effect in room acoustic modeling software,” men det blir svært omstendelig, og virker derfor litt mot sin hensikt [30].

Frekvensområdet i den forenklede modellen er begrenset til 500 Hz – 1 kHz. Dette er til en viss grad åpent for tolkning, da Rindel ikke spesifiserer om det er snakk om 1/3-oktavnåbånd eller 1/1-oktavnåbånd. Om man begrenser seg til 1/3-oktavnåbånd betyr det et frekvensområde på 447 – 1122 Hz, mens en vurdering i 1/1-oktavnåbånd også vil inkludere 1/3-oktavnåbåndene 400 Hz og 1250 Hz, og dermed gi et frekvensområde på 355 – 1420 Hz.

Ved første øyekast er det tydelig at hovedvekten av det spektrale innholdet i menneskelig tale ligger under det spesifiserte frekvensområdet både for menn og kvinner, slik figur 2.1 viser. Begge kjønn genererer et høyt talenivå i 250 Hz-båndet, og siden det generelt sett er større utfordringer knyttet til etterklangstid i lave frekvenser, kan dette være en potensiell felle. Som figur 5.7 viser, er det likevel slett ikke uvanlig med tilnærmet samme etterklangstid i 1/1-oktavnåbåndet 250 Hz som i 500 Hz og 1 kHz, men i tilfeller som Vertshuset er 250 Hz-båndet et problem som vil snike seg

under radaren ved beregning av akustisk kapasitet, slik at den faktiske akustiske komforten i rommet blir dårligere enn beregningene skulle tilsi.



**Figur 5.7:** Målt etterklangstid i fire kantiner i Trondheim [25].

Et interessant moment er imidlertid hvordan menneskets spektrale innhold forandrer seg når Lombard-effekten begynner å virke, for i Lombard-tale er det, som figur 2.8 viser, frekvensområdet mellom cirka 300 Hz og 1 kHz som er dominerende. Ettersom 1/1-oktavgbåndet 500 Hz omfatter frekvenser så langt ned som 355 Hz, vil dermed mesteparten av det dominerende frekvensområdet være inkludert i beregningene også med den gjeldende begrensningen.

En annen viktig del av Rindels forenklede modell er Lombard-helningen,  $c$ , som benyttes i (2.10). Denne størrelsen forteller hvor mye talenivået øker som konsekvens av et økt bakgrunnsstøynivå, og er således en kvantifisering av hvor sterk Lombard-effekten er. Som figur 2.8 viser, er det stor forskjell fra frekvens til frekvens hvordan talenivået endrer seg når Lombard-effekten settes i sving, så Lombard-helningen er med andre ord langt fra frekvensuavhengig. Mellom cirka 500 og 900 Hz er imidlertid økningen nokså lik, og det er derfor nærliggende å tro at det er i dette frekvensområdet at  $c = 0,5$  stemmer best overens med virkeligheten.

Det virker derfor som om den gjeldende frekvensbegrensningen er en akseptabel begrensning i en forenklet modell, slik denne tross alt er. Det er Lombard-tale som vil være dominerende når den akustiske kapasiteten er nådd, og derfor er det også de dominerende frekvensene i Lombard-tale som er viktigst å få med. Er etterklangstiden mye høyere i 250 Hz-båndet enn i 500 Hz og 1 kHz vil dette allikevel by på problemer, og det virker derfor lurt å også inkludere dette 1/1-oktavgbåndet i målingene, slik at det kan gjøres tiltak om etterklangstiden viser seg å være for høy.

## 5.8 Volumets innvirkning på den akustiske kapasiteten

Et annet problem med begrepet akustisk kapasitet, er at det i likhet med likningen for etterklangstid har volumet over brøkstreken. Det innebærer at økt volum ikke bare gir økt etterklangstid, men også økt akustisk kapasitet, noe som strider mot logikken om at høy etterklangstid vil gi lav akustisk kapasitet. I prinsippet er ikke dette noe problem, ettersom det er *forholdet* mellom volum og etterklangstid som er avgjørende for den akustiske kapasiteten, slik at om volumet øker, vil etterklangstiden øke tilsvarende, og den akustiske kapasiteten vil ikke endre seg.

I rom med enkel geometri er dette heller ikke noe problem i praksis. Hvis rommet har tydelige avgrensninger er volumet fastlåst, uten noe videre grunnlag for diskusjon. Problemet dukker imidlertid opp i rom der det er en eller flere åpne flater, slik at man får et stort volum som er tilknyttet rommet. Dette ekstra volumet vil også ha en viss innvirkning på etterklangstiden, men ikke i like stor grad som det volumet som er direkte knyttet til området der lyden genereres. Den målte etterklangstiden man forholder seg til i beregningene vil derimot være den samme uavhengig av volumet som inkluderes, og volumet vil derfor ha sterk innvirkning på den beregnede akustiske kapasiteten.

Realfagskantina på NTNU Gløshaugen er et godt eksempel på et slikt lokale, der selve spiseområdet, hvor bord og stoler står plassert, bare utgjør en liten del av det omliggende volumet. Det at kantina er en del av et større volum vil ha sterk innvirkning på etterklangstiden, som forøvrig er i høyeste laget [25], og det har også positiv effekt på den akustiske kapasiteten. Om hele volumet inkluderes i beregningene vil imidlertid den beregnede akustiske kapasiteten etter alle solemerker bli for høy, og det er derfor viktig å avgrense volumet på en fornuftig måte.

I tabell 4.2 er den akustiske kapasiteten i Realfagskantina vist for ulike volumavgrensninger, og som tabellen viser er det nokså store variasjoner mellom de ulike volumene, som igjen fører til stor variasjon i akustisk kapasitet. Det er om lag 250 sitteplasser i kantina, så kapasiteten er overskredet uansett hvor generøs man er med volumet, men det er likevel stor forskjell på å overskride kapasiteten med noen få plasser, slik som ved den største avgrensningen, og med nesten det dobbelte, som ved den meste konservative avgrensningen.

Det er vanskelig å fastslå hva som er riktig bare på grunnlag av disse enkle beregningene, men det virker rimelig å anta at fasiten ligger et sted mellom avgrensning 1 og 7. Det virker naturlig å inkludere et større areal enn bare selve spiseområdet, men samtidig er dette den eneste universelle avgrensningen som kan anvendes uavhengig av utformingen til det omliggende volum. Dette kan med andre ord være et konservativt utgangspunkt, som vil sikre at den beregnede akustiske kapasiteten helt sikkert ikke er høyere enn den faktiske kapasiteten.

I Realfagskantina virker det likevel naturlig å inkludere i hvert fall område B og



D. Bidraget fra underetasjen i B kan trolig neglisjeres, ettersom himlingen her er kledd med spaltepanel. Refleksjoner her vil med andre ord dempes nokså raskt. Område C, kjøkkenet, ligger i umiddelbar nærhet av spiseområdet, men er fullt av diverse objekter som bør trekkes fra volumet. Dette vil bidra til å svekke kjøkkenets allerede beskjedne bidrag til det totale volumet, og det virker derfor greit å utelate dette området. Områdene E og F ligger på sin side i overkant langt bort fra selve spiseområdet, i tillegg til at betongkonstruksjonene som er markert på figur 3.11 sperrer for lydbølger både til og fra disse områdene, og disse kan nok derfor med nokså stor sikkerhet ses bort fra.

I tilfeller som dette, ville det vært interessant å gjennomføre målinger av bakgrunnsstøynivå når kantina er i bruk. På bakgrunn av slike målinger vil det være mulig å finne rommets absorpsjonsareal,  $A$ , ved hjelp av (2.11) og (2.12). Ved å sette  $SNR = -3$  kan da den korrekte akustiske kapasiteten finnes av (2.13), og (2.14) kan brukes til å bestemme riktig volum.

## 5.9 Feilkilder

Potensielle feilkilder i denne oppgaven er først og fremst i forbindelse med målingene. Det er gjort et lite antall måleserier, men som figur 4.2 viser, er det små forskjeller mellom de to måleseriene av bakgrunnsstøynivået. I de høyeste frekvensene ligger bakgrunnsstøynivået merkbart høyere enn i de øvrige frekvensene. Her er det minimale forskjeller mellom de to måleseriene, og mye tyder derfor på at dette iøynefallende avviket skyldes en ytre påvirkning, enten i form av preeksisterende støy fra lysarmatur i rommet, eller en skade på utstyret. I tillegg er rommets Schroeder-frekvens såpass høy at man kan forvente påvirkning fra rommets moder i de laveste frekvensene.

Et større antall måleserier ville bidratt til å senke usikkerheten også i målingene av  $C_{50}$ . Særlig i de laveste frekvensene er det en del store utslag som vanskelig å forklare, og flere måleserier ville trolig bidratt til å jevne ut disse. Bordet som står plassert mellom målepunktene 9 og 11,5 m vil også ha hatt innvirkning på resultatene. Dette gjelder både i form av refleksjoner fra bordet, men også fordi det ikke er noen målepunkter der bordet står. Større tetthet mellom målepunktene ville også bidratt til å gi bedre resultater, særlig i de laveste frekvensene, hvor det er til dels store variasjoner.

## 5.10 Videre arbeid

Et naturlig steg videre vil være å gjennomføre lignende forsøk i rom med andre dimensjoner. I større rom vil etterklangstiden normalt være høyere, i tillegg til at avstanden mellom veggene vil bli så stor at antallet tidlige refleksjoner vil minke.

I slike rom vil det også være av interesse å gjøre målinger langs flere lengdeakser, for å se hvordan nærhet til sidevegg påvirker resultatene. Det vil óg være interessant å undersøke i hvilken grad resultatene påvirkes av takhøyde og himlingens absorpsjonsfaktor.

Videre vil det kunne være aktuelt å undersøke om lydfeltet i rommet under like forhold er likt i både vertikal og horisontal retning. Ideelt sett bør dette gjøres i et kubisk rom, der man kan demontere en systemhimling og feste den på veggen, før måleprosedyren gjøres. Deretter flyttes himlingen tilbake dit den hører hjemme, og samme måleprosedyre gjentas i vertikalplanet.

Det vil også være av interesse å gjennomføre de samme målingene med flere ulike typer absorbent, for å se om resultatene samsvarer med absorbentens forventede absorpsjonsområde. I denne oppgaven ble det gjennomført målinger på en porøs absorbent, og som ventet gav dette best resultater i de høye frekvensene. Det vil derfor være meget interessant å undersøke absorbenter som i større grad er rettet mot det menneskelige taleområdet, og se om resultatene endrer seg deretter.

For å undersøke volumtilknytning i forbindelse med akustisk kapasitet, ville det vært interessant å gjennomføre målinger av bakgrunnsstøynivå i flere kantiner med kompleks geometri, når disse er i bruk. Ved å gjøre som beskrevet i siste avsnitt av avsnitt 5.8, vil det da kanskje være mulig å komme frem til en generalisering av hvor mye omliggende volum som bør inkluderes i beregningene.

# Kapittel 6

## Konklusjon

Bakgrunnsstøynivået er for alle frekvenser lavere nær absorbenten enn lengre ut i rommet. I 125 Hz-båndet er resultatene variable, noe som trolig skyldes påvirkning fra moder, men tendensen er likevel klar. I 4 kHz-båndet ligger bakgrunnsstøynivået noe over de andre 1/1-oktavnåene, men resultatene følger likevel den samme trenden også her. Det er i de høyeste frekvensene at den klareste tendensen er å finne, og dette skyldes trolig at det ble gjort målinger med en porøs absorbent, som er mest effektiv i de høyere frekvenser.

$C_{50}$  følger den samme trenden, bare med motsatt fortegn. Det ble altså målt klart høyere verdier nære absorbenten, og også dette gjelder alle frekvenser. I de høyeste frekvensene er det en tydeligere trend gjennom hele rommet, mens de lave frekvensene endrer seg mye i umiddelbar nærhet av absorbenten, før kurvene flater mer ut i midten av rommet. I nærheten av den høyreflekterende kortveggen i motsatt hjørne peker kurvene oppover igjen. Her er tendensen sterkest i de lave frekvensene.

Kildens retning i forhold til absorbenten viste seg å være av nokså liten betydning. I de to øverste 1/1-oktavnåene er det merkbart bedre resultater med kilden rettet mot absorbenten enn med kilden rettet fra absorbenten, men dette blir over det dominerende frekvensområdet i menneskelig tale, og har derfor nokså liten interesse i denne sammenheng.

Etttersom både bakgrunnsstøynivå og  $C_{50}$  gav mer positive måleresultater nære absorbenten, er det liten tvil om at det objektivt sett er en fordel å oppholde seg i nærheten av en absorbent. På grunn av økt  $C_{50}$  nære den reflekterende veggen vil også nærhet til den være å foretrekke fremfor en tilværelse midt i rommet, særlig i de lave frekvensene. Det viste seg imidlertid at parameteren  $U_{50}$  i liten grad påvirkes av endringer i  $C_{50}$  og bakgrunnsstøynivå når signal-støy-forholdet er lavt. I svært støyende lokaler vil det altså være lite lindring å oppnå nær en absorbent, og det er derfor viktig å påse at etterklangstiden holdes lav, og at den akustiske kapasitet ikke overskrides, for at nærhet til absorbent skal ha noen særlig effekt. Når disse forutsetningene er på plass, er det imidlertid tydelig at man vil kunne nyte godt av å sitte nær en absorbent, og det bør derfor legges til rette for at en så stor del av

det tilgjengelige absorpsjonsarealet som mulig plasseres på vegger i nærheten av der folk sitter.

Frekvensområdet som er gjeldende i J. H. Rindels forenklede modell om akustisk kapasitet virker i det store og hele å være fornuftig. Det kan argumenteres for at en stor del av spektralinnholdet hos både menn og kvinner ligger under dette frekvensområdet, men de fleste av disse frekvensene faller i stor grad bort når Lombard-effekten begynner å virke. Det er også innenfor dette frekvensområdet at forskjellen mellom Lombard-tale og vanlig tale varierer minst i ulike frekvenser.

Volumbegrensninger er et stort usikkerhetsmoment i begrepet akustisk kapasitet. I mer eller mindre skoeseformede rom der man enkelt kan definere rommets grenser er det uproblematisk, men rom med mer kompleks geometri der store åpne volum er tilknyttet spiseområdet, kan gi svært forskjellige resultater avhengig av hvor stort volum man velger å inkludere i beregningene. I denne typen tvilstilfeller bør en konservativ tilnærming legges til grunn for valg av volum, slik at man ikke ender opp med en for høy beregnet akustisk kapasitet, og den faktiske akustiske komforten ikke lever opp til forventningene. Om mulig bør det gjøres målinger av bakgrunnsstøynivå mens rommet er i vanlig bruk, slik at den akustiske kapasiteten kan bestemmes uten bruk av volum i beregningene.

# Kapittel 7

## Bibliografi

- [1] K. Saskela, J. Botts & L. Savijoa, "Optimization of absorption placement using geometrical acoustic models and least squares," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 137, no. 4, pp. EL274-EL280, 2015.
- [2] J. S. Bradley, H. Sato & M. Picard, "On the importance of early reflections for speech in rooms," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113, no. 6, pp. 3233-3244, 2003.
- [3] L. M. Wang & M. C. Vigeant, "Evaluations of output from room acoustic computer modeling and auralization due to different sound source directionalities," *Applied Acoustics*, vol. 69, pp. 1281-1293, 2007.
- [4] J. Peng, T. Wang & S. Wu, "Investigation on the effects of source directivity of Chinese speech intelligibility in real and virtual rooms," *Applied Acoustics*, vol. 74, pp. 1037-1043, 2013.
- [5] T. E. Vigran, *Building Acoustics*. Taylor & Francis, 2008.
- [6] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens & J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics, fourth edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [7] Standard Norge, "Lydforhold i bygninger. Lydklasser for ulike bygningstyper," *NS 8175:2012*, 2012.
- [8] M. P. Norton & D. G. Karczub, *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge University Press, 2003.
- [9] W. T. Chu, & A. C. C. Warnock, "Detailed Directivity of Sound Fields Around Human Talkers," *Research Report, NRC Institute for Research in Construction*, Issue 104, 2002.
- [10] A. Zollinger & H. Brumm, "The Lombard effect," *Current Biology*, vol. 21, no. 16, pp. 614-615, 2011.

- [11] M. Cooke & M. L. G. Lecumberri, "The intelligibility of Lombard speech for non-native listeners," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, no. 2, pp. 1120-1129, 2012.
- [12] L. M. Stowe & E. J. Golob, "Evidence that the Lombard effect is frequency-specific in humans," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, pp. 640-647, 2013.
- [13] M. Cooke, C. Mayo & J. Villegas, "The contribution of durational and spectral changes to the Lombard speech intelligibility effect," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, 2014.
- [14] Standard Norge. "Ergonomi. Vurdering av talekommunikasjon," *NS-EN ISO 9921:2003*, 2003.
- [15] J. H. Rindel, "Acoustic capacity as a means to deal with poor restaurant acoustics," *Acoustic Bulletin*, vol. 39, no. 4, pp. 27-30, 2014.
- [16] H. Lazarus, "Prediction of Verbal Communication in Noise — A Development of Generalized SIL Curves and the Quality of Communication (Part 2)," *Applied Acoustics*, vol. 20, pp. 245-261, 1987.
- [17] J. H. Rindel, "Acoustical capacity as a means of noise control in eating establishments," *Proceedings of BNAM*, 2012.
- [18] J. H. Rindel, "Verbal communication and noise in eating establishments," *Applied Acoustics*, vol. 71, pp. 1156-1161, 2010.
- [19] J. H. Rindel, "Noise problems in restaurants," *Noise & Vibration Worldwide*, 2012.
- [20] Standard Norge. "Akustikk. Måling av romakustiske parametre. Del 1: Rom for fremførelser," *NS-EN ISO 3382-1:2008*, 2009.
- [21] L. G. Marshall, "An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 96, pp. 2251-2261, 1994.
- [22] L. G. Marshall, "Speech intelligibility prediction from calculated  $C_{50}$  values," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, pp. 2845-2847, 1995.
- [23] J. S. Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, pp. 837-845, 1986.
- [24] J. S. Bradley, R. D. Reich & S. G. Norcross, "On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no. 4, pp. 1820-1828, 1999.
- [25] G. V. Holøyen, "Universell utforming av lydforhold i kantiner," 2016.

- [26] Mazemap AS, Kart over Gløshaugen, 2017. Hentet fra: <http://s.mazemap.com/2pgF25l> (Hentet 9. mai 2017)
- [27] NTI Audio, "Operating Manual," 2017. Hentet fra: <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/TalkBox-Manual.pdf> (Hentet: 9. mai 2017).
- [28] NTNU Innsida, "Leie av lokaler og utstillingsboder," Hentet fra: <https://innsida.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Leie+av+lokaler+og+utstillingsboder> (Hentet 15. desember 2016).
- [29] B. Nigsch, "Directivity of TalkBox," e-post, 15. mai 2017.
- [30] J. H. Rindel, "Dynamic sound source for simulation the Lombard effect in room acoustic modeling software," *InterNoise*, 2012.





# Tillegg A

## Matlab-skript og -funksjoner

### A.1 Skript for beregning av bakgrunnsstøynivåer

(Digitalt)

#### A.1.1 Funksjon for behandling av rådata

(Digitalt)

### A.2 Skript for plotting og beregning av C50

(Digitalt)

### A.3 Skript for plotting og beregning av U50

(Digitalt)

### A.4 Skript for analyse mot akustisk kapasitet

(Digitalt)

#### A.4.1 Skript for polynomtilnærming

(Digitalt)

**A.5 Skript for beregning av akustisk kapasitet ved ulike volum**

(Digitalt)

**A.6 Skript for lineær interpolasjon av måleresultater**

(Digitalt)

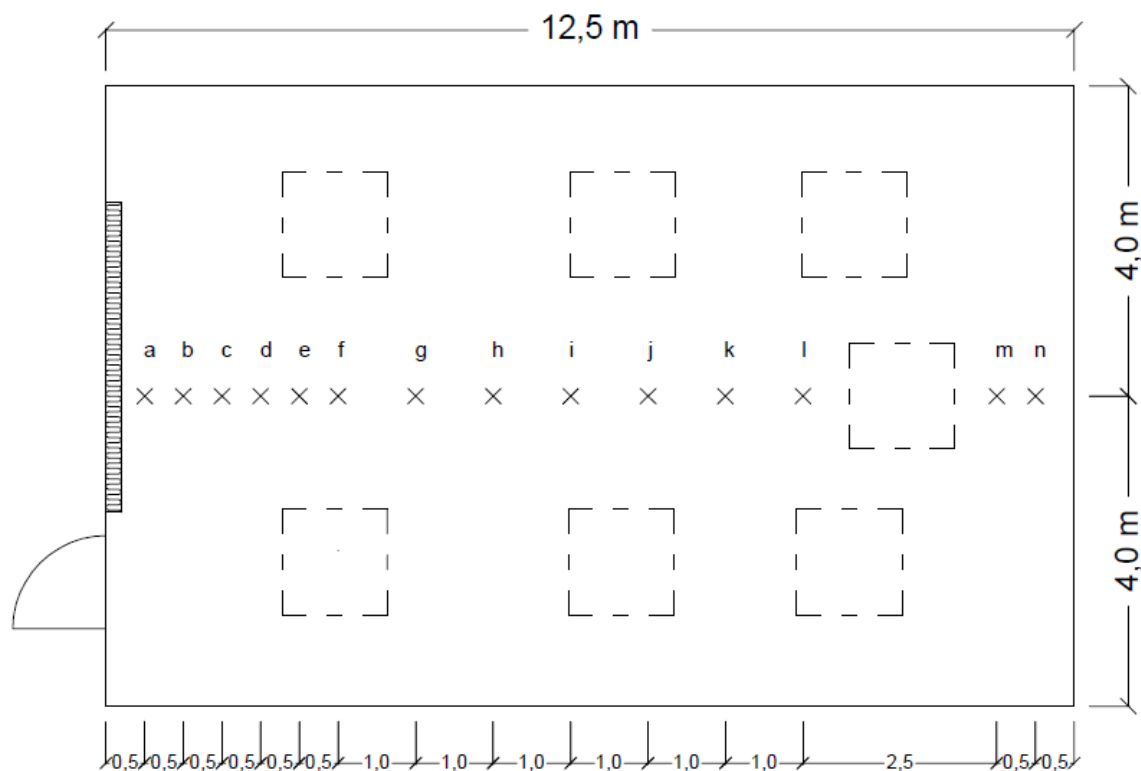
**A.7 Skript for plotting av menneskelig direktivitet**

(Digitalt)

# Tillegg B

## Måledata

Måleposisjonene er konsekvent benevnt med bokstaver fra a til n, der a er posisjonen nærmest absorbenten, og n er lengst fra. Dette kan ses i figur B.1.



Figur B.1: Benevning av måleposisjoner.

### B.1 Måling av bakgrunnsstøynivå

(Digitalt)

## **B.2 Måling av impulsrespons**

(Digitalt)

## **B.3 Måling av etterklangstid**

(Digitalt)