

# Inverkan av takabsorbenter och ljudisolering på talavskildheten mellan rum

– En studie för Ecophon AB



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Byggnadsvetenskaper / Teknisk akustik

Examensarbete:  
Akram Abdul Hamid  
Irfan Ibrahimovic



© Copyright Akram Abdul Hamid, Irfan Ibrahimovic

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Media-Tryck  
Biblioteksdirektionen  
Lunds universitet  
Lund 2011

## Sammanfattning

Syftet med detta examensarbete var att undersöka och analysera den påverkan som takabsorbenter och ljudisolering i undertaket har på talavskildheten mellan två intilliggande rum. Vi undersökte även en ny produkt som Ecophon har framställt och jämförde denna med en konkurrents produkt som redan finns på marknaden.

Talavskildhet betecknas som *SPI*, som är en förkortning av *Speech Privacy Index* och bestäms enligt den standard som är beskriven i J.S. Bradleys och B.N. Govers rapport *Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices*.

För att göra dessa undersökningar använde vi oss av Ecophons laboratorium i Hyllinge. Laboratoriet består av två intilliggande rum som har ett gemensamt undertak. Mellan rummen finns en skiljevägg med en mycket god ljudisolering, vilket gör att ljudet enklast tar sig genom det gemensamma undertaket. Utrustningen vi använde oss av bestod av: (1) en högtalare som skickar ut ljud i alla riktningar, (2) en mikrofon och (3) ett datorsystem för att behandla den data som uppmätts. Utrustningen uppfyller de krav som nämns i Bradleys och Govers rapport.

Det vi undersökte var olika typer av ljudisolering och takabsorbenter i undertaket genom att mäta ljudtrycksnivån i mottagarrummet och sändarrummet. Ljudtrycksnivåerna användes sedan för att undersöka den inverkan som undertakprodukterna hade på *SPI* och *LD(f)*. *LD(f)* beskriver skillnaden i ljudtrycksnivån mellan sändarrum och mottagarrum.

Vi gjorde tre mätningar av ljudtrycksnivån i varje rum för varje produkt. Medelvärdet av dessa använde vi sedan för att beräkna *SPI*. De mätvärden vi fick hade liten spridning vilket tyder på att mätningarna är noggrant utförda och således pålitliga.

Vi kom fram till att takabsorbenter och ljudisolering i undertaket har en betydlig inverkan på talavskildheten mellan rum. Takabsorbenter tillsammans med ljudisolering i undertaket var ur akustisk synpunkt det bästa alternativet och gav således bäst *SPI*-värde. Vid användning av endast takabsorbenter som undertak fick vi ett ganska dåligt *SPI*-värde, vilket inte ens når den lägsta hörbarhetsgränsen för talavskildheten mellan rum. Vi kom även fram till att Ecophons nya produkt har bättre *SPI*-värde än konkurrentens produkt samt övriga kombinationer av olika takabsorbenter och ljudisolering i undertaket.

Nyckelord: ljud, isolering, absorbenter, undertak, akustik, tal, avskildhet.

## English summary

The aim of this Bachelor Thesis was to examine and analyze the impact of ceiling sound absorbers and sound insulation in a false ceiling, on the speech privacy between two adjacent rooms. We also investigated a new product that one of the world leading suppliers of sound absorbing ceilings and wall absorber systems, Ecophon, has produced, and compared this with a competitor's product already established on the market.

Speech privacy is measured through the *SPI*, i.e. *Speech Privacy Index* and is determined according to a standardized method which is described in J.S. Bradley's and B.N. Gover's paper, titled *Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices*.

There are certain thresholds for the *SPI* that describes the type of speech that can be heard when the *SPI* has a certain value.

Threshold	<i>SPI</i>
Intelligibility	- 16 dB
Cadence	- 20 dB
Audability	- 22 dB

Table I: *SPI* values for the just noticeable thresholds of audibility, cadence and intelligibility. From J.S. Bradley's and B.N. Gover's report *Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices*.

*Audibility* means that some speech sounds are hearable. *Cadence* means that the cadence of speech sounds is hearable. *Intelligibility* means that at least one word of a sentence is intelligible.

To do these studies, we used Ecophon's laboratory in Hyllinge, Sweden. The laboratory consists of two adjacent rooms a shared false ceiling. The dividing wall between the rooms has a very good sound insulation, making it easier for the sound to pass through the shared false ceiling. The equipment we used consisted of: (1) an almost omni-directional speaker, (2) a microphone and (3) a computer system to process the data. This equipment meets the requirements mentioned in Bradley's and Gover's report.

We investigated different types of sound insulation and ceiling sound absorbers in the false ceiling by measuring the *sound pressure level*, *SPL*, in the source-room and the receiver room. We then used the acquired *SPL* to examine the impact that the tested products had on the *SPI* and *LD(f)*. *LD(f)* is a measurement used to describe the difference in the *SPL* between the source-room and the receiver room.

We made three measurements of the  $SPL$  in each room for each product combination. The arithmetic average of these, we then used to calculate the  $SPI$  with. The values of  $LD(f)$  that we acquired had a small variation, which suggests that the measurements were minutely made and therefore trustworthy according to the arguments that we present in the report.

The results on  $LD(f)$  and  $SPI$  were as follows:

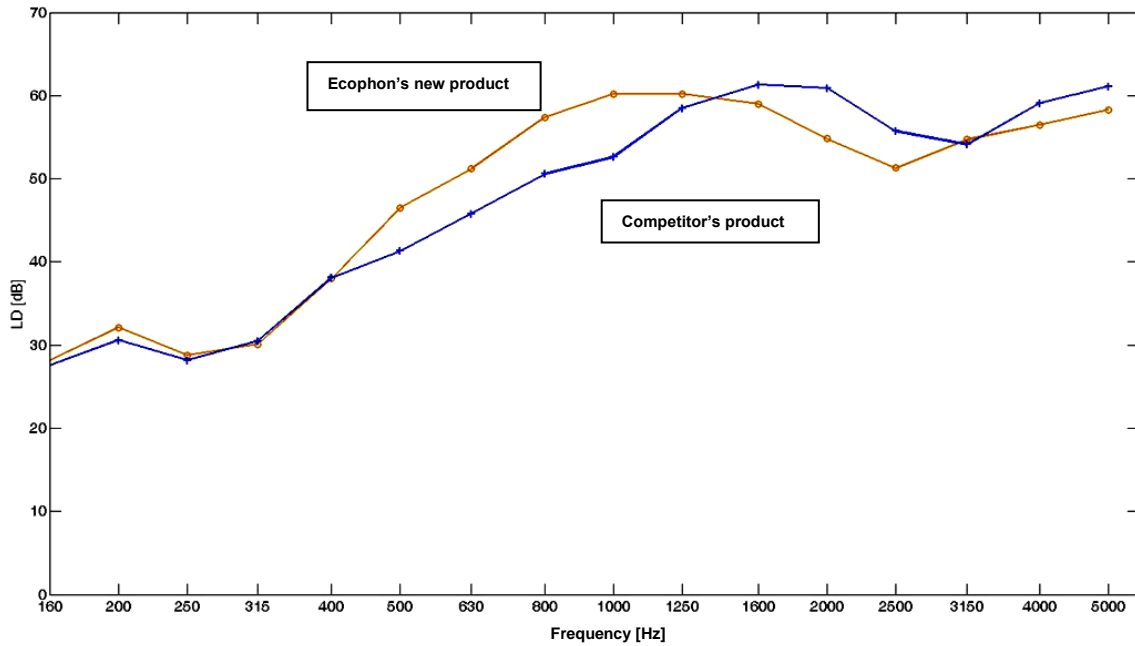


Figure I: Comparison of  $LD(f)$  between Ecophon's new product and a competitor's product.

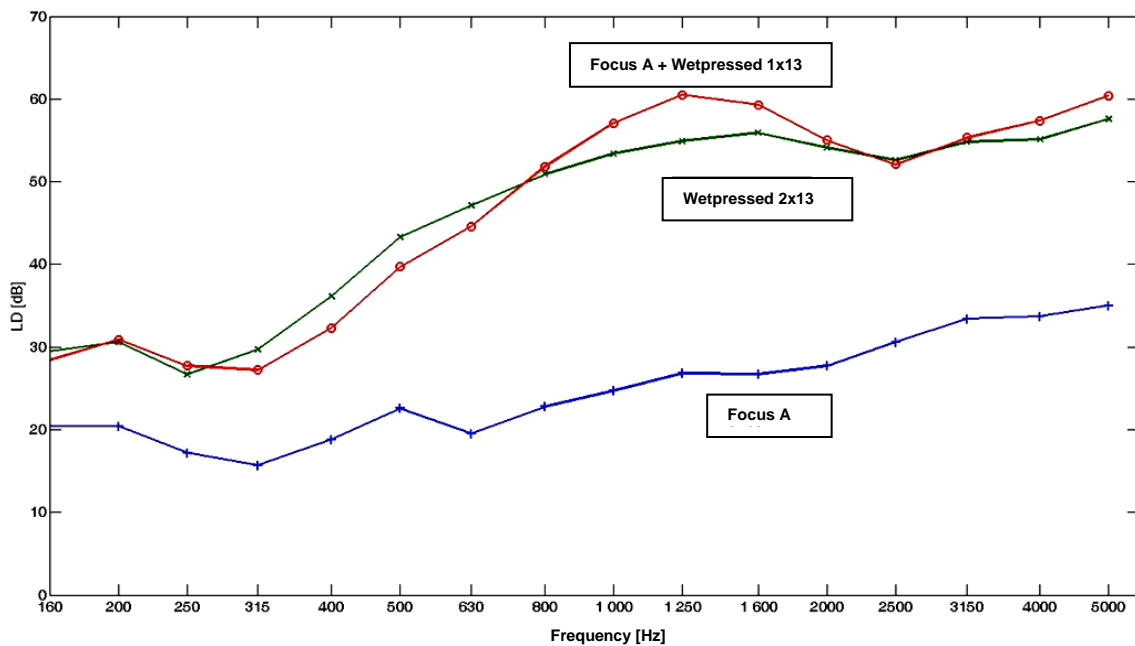


Figure II: Comparison of  $LD(f)$  between different combinations of products.

Background noise	<b><u>SPI</u></b>				
	Competitor's product	Focus A	Ecophon's new product	Wetpressed 2x13 mm	Focus A + Wetpressed 1x13mm
<b>A</b>	-12,9	9,6	-13,7	-11,5	-11,9
<b>B</b>	-39,4	-16,9	-40,1	-37,9	-38,4
<b>C</b>	-20,6	1,9	-21,3	-19,1	-19,6

*Table II: SPI given in dB, and calculated with (A) background noise measured in the laboratory, (B) background noise given in Bradley's and Gover's report and (C) background noise measured, by Ecophon, in a quiet office environment.*

We concluded that the ceiling sound absorbers and the sound insulation in the false ceiling had a significant impact on the *SPI* between the rooms. The combination of ceiling sound absorbers with sound insulation in the false ceiling was the best option from an acoustic point of view, and thus provided the best *SPI* value. When we only had ceiling sound absorbers in the false ceiling we acquired an *SPI* value which does not even reach the first threshold of audibility between rooms, i.e. speech was clearly intelligible. With Ecophon's new product we got a better *SPI* value than the one we got using the competitor's product or other combinations of other types of ceiling sound absorbers and sound insulation in the false ceiling.

Keywords: sound, insulation, false, ceiling, absorbers, building, acoustics, speech, privacy, *SPI*.





## Förord

Examensarbetet är utfört vid avdelningen för Teknisk akustik, Institutionen för Byggnadsvetenskaper, Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Ecophon i Hyllinge 2011.

Först och främst vill vi tacka våra handledare Delphine Bard på LTH och Erling Nilsson på Ecophon för möjligheten att få göra detta arbete. Vi vill även tacka dem för en god handledning, stöd och hjälp under arbetets gång.

Ett särskilt tack vill vi rikta till Ecophon för att ha bidragit med laboratoriet och den utrustning som krävdes för att kunna göra mätningarna.

Vi vill även tacka vår examinator Kristian Stålne som har varit till mycket stor hjälp under arbetets gång.

Vi har använt oss av ett par produkter som Ecophon har bett oss att inte nämna i arbetet. Dessa beskriver vi istället med andra ord, såsom ”våtpressad skiva” och ”konkurrents produkt”.

## Uppdelning

*Akram Abdul Hamid:* 2.1, 2.2.4, 2.2.11.1, 2.3, 3.1.3, 3.2, 4.1. Kontroll och redigering av all text.

*Irfan Ibrahimovic:* 1.1, 1.7, 2.2.1 - 2.2.3, 2.2.5, 2.2.6, 2.2.7, 2.2.8, 2.2.9, 2.2.10, 2.2.11, 3.1.1 – 3.1.2, 3.3.

*Gemensamt:* 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 4.2, 4.3, 5, 6, 7, 8, Förord, Sammanfattning, English summary.

# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Metod</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4 Disposition</b> .....	<b>2</b>
<b>1.5 Avgränsningar</b> .....	<b>3</b>
<b>1.6 Tidigare mätningar och undersökningar</b> .....	<b>3</b>
<b>1.7 Symbolförteckning</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Teori</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Vad är ljud?</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Ljudets rörelse .....	5
2.1.2 Vår uppfattning av ljud .....	6
2.1.2.1 <i>Filter</i> .....	7
<b>2.2 Begrepp</b> .....	<b>8</b>
2.2.1 Oktaver och terser .....	8
2.2.2 Diffusion .....	8
2.2.3 Interferens .....	8
2.2.4 Stående vågor och rummets interferens .....	9
2.2.5 Absorption .....	9
2.2.5.1 <i>Porösa absorbenter</i> .....	9
2.2.5.2 <i>Resonansabsorbenter</i> .....	10
2.2.6 Transmission och reflektion .....	10
2.2.7 Flanktransmission .....	11
2.2.8 Reduktionstal $R$ och vägt reduktionstal $R_w$ .....	11
2.2.9 Resonans .....	12
2.2.10 Koincidens .....	13
2.2.11 Efterklangstid .....	13
2.2.11.1 <i>Att tänka på vid mätning av efterklangstid</i> .....	14
<b>2.3 Speech Privacy Index – SPI</b> .....	<b>14</b>
<b>3 Mätningar och genomförande</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Mätning och beräkning av reduktionstal samt vägt reduktionstal</b> .....	<b>17</b>
3.1.1 Metod .....	17
3.1.2 Beräkning av vägt reduktionstal $R'_w$ .....	18
3.1.3 $Dnf_w$ .....	21
<b>3.2 Mätning och beräkning av SPI enligt standard</b> .....	<b>21</b>
3.2.1 Ljudkälla, signal och frekvens .....	21
3.2.2 Mätutrustning .....	22
3.2.3 Mätprocessen .....	22

3.2.3.1 Högtalar- och mikrofonposition för mätningar i sändarrummet .....	22
3.2.3.2 Mikrofonposition för mätningar i mottagarummet .....	23
3.2.4 Beräkningsprocessen.....	23
<b>3.3 SPI-mätningar på Ecophon .....</b>	<b>24</b>
3.3.1 Metod.....	25
<b>4 Analys .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Laborationsresultat .....</b>	<b>27</b>
4.1.1 SPI från $LD(f)$ .....	27
4.1.2 Grafer på $LD(f)$ .....	28
<b>4.2 Analys av undertakets påverkan på resultatet .....</b>	<b>29</b>
4.2.1 Förstärkning av absorption i undertaket .....	29
4.2.2 Resonansfrekvens för undertaket.....	30
4.2.3 Undertakets koincidensfrekvens .....	30
<b>4.3 Analys av skiljeväggens inverkan på resultatet .....</b>	<b>31</b>
4.3.1 Skiljeväggens koincidensfrekvens (kritisk frekvens) .....	31
4.3.2 Skiljeväggens resonansfrekvens .....	32
<b>5 Diskussion.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 Diskussion om genomförandet .....</b>	<b>33</b>
5.1.1 Mätmetoden .....	33
5.1.2 Laborationsuppsättningen .....	33
5.1.3 Genomförandets påverkan på våra resultat .....	34
<b>5.2 Diskussion om laborationsresultaten .....</b>	<b>34</b>
5.2.1 SPI och produkternas inverkan på talavskildhet .....	34
5.2.2 $LD(f)$ och produkternas prestation .....	35
5.2.3 Skillnaden mellan $R$ , $Dnf$ och $LD(f)$ .....	36
5.2.4 Skillnaden mellan SPI och $LD(f)$ .....	36
<b>6 Slutsats.....</b>	<b>37</b>
<b>7 Litteraturförteckning.....</b>	<b>39</b>
<b>8 Appendix .....</b>	<b>41</b>
<b>8.1 A1 – Testernas repeterbarhet .....</b>	<b>41</b>



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Många människor upplever idag buller som ett av de mest störande och stressande inslagen i samhället. Buller, som beskrivs som oönskat ljud, kan leda till ett flertal negativa företeelser hos människor. För höga ljudtrycksnivåer i hemmet eller på arbetsplatsen kan leda till hörselskador och hörselnedsättning. Höga ljudtrycksnivåer som människor vistas i, leder också till ökat blodtryck vilket i sin tur resulterar i mer stress och ökad risk för andra hälsoproblem. Buller från väg- och järnvägstrafik ger ofta upphov till sömnsvårigheter och koncentrationsproblem för människor som bor i närheten av vägar och järnvägar. Bullers effekter på arbetsprestationen har studerats under flera decennier i både naturliga arbetsmiljöer och laboratorieexperiment. Det har bevisats att buller har en klar negativ påverkan på individens arbetsprestation samt att effekterna blir större ju längre tid arbete i buller pågår (Nilsson et al., 2008).

I dagens Europa beräknas minst 25 % av befolkningen påverkas av buller i sådan omfattning att det påverkar hälsa och livskvalitet. Buller som är ett globalt hälsoproblem har också uppmärksammats av världshälsoorganisationen WHO (Nilsson et al., 2008).

Med hänsyn till ovan nämnda problem och de effekter buller har på människor är det nödvändigt att studera och analysera byggnadsakustik för att försöka komma till rätta med dessa problem. För att förbättra en befintlig byggnad ur akustisk synvinkel kan det göras flera ingrepp. Vissa är svårare och dyrare att genomföra medan andra är lättare och billigare. Dessa ingrepp kan behandla olika moment i byggnadsakustiken såsom ljudisoleringen i väggar som beskrivs med hjälp av väggens reduktionstal, rumsakustiken som beskrivs med hjälp av rummets efterklangtid, stegljudsisolering som beskrivs av stegljudsnivå etc.

Idag är det allt viktigare att nya byggnader har en god akustisk standard och att dessa uppfyller de krav som ställs i samhället. Detta på grund av att beställare i högre grad eftersträvar bättre akustisk miljö i sina bostäder och projektörer och entreprenörer måste uppfylla ökade krav på bättre akustisk miljö i byggnader som Boverket ställer. Trots att medvetenheten kring bullers skadliga inverkan har ökat, motverkas ibland bullerbegränsningar av krav på kostnadseffektiva lösningar.

För att komma till rätta med ovan nämnda problem är det viktigt att utifrån studier, mätningar och beräkningar kunna ge förslag på effektiva åtgärder som minskar buller.

Efterklangstiden är det vanligaste måttet som beskriver akustiken i ett rum. Men det finns även andra rumsakustiska mått som kan undersökas såsom taltydlighet, ljudstyrka och avståndsdämpning (Ecophon, 2011).

I öppna kontorslandskap är det ett problem och en svårighet att uppnå en god akustisk miljö med avseende på talavskildhet. Därför utvecklas nya produkter som ska användas för att åstadkomma en bättre arbetsmiljö i kontorsrum. Ett företag som tillverkar byggprodukter för akustiska ändamål är Ecophon. Deras produkter används i byggnader såsom skolor, kontor och bostadshus. Ecophon inriktar sig på att framställa ljudabsorberande undertak och väggabsorbenter (Ecophon, 2011).

## **1.2 Syfte**

Syftet med detta examensarbete har varit att undersöka och analysera den inverkan som takabsorbenter och ljudisolering i undertaket har på talavskildheten mellan två intilliggande rum. Vi har även undersökt en ny produkt som Ecophon har framställt och jämfört denna med en konkurrents produkt som redan finns på marknaden.

## **1.3 Metod**

*SPI*-värdena mättes för två rum som är skiljda åt av en dubbelvägg. Mätningarna skedde för flera olika undertaksmaterial. Den påverkan som undertaket hade på *SPI* undersöktes. De sammanlagda kraven på materialet i undertaket samt ljudisoleringen i skiljeväggen för att nå ett visst *SPI*-värde uppfylldes. Experimenten skedde på Ecophon AB i Hyllinge.

## **1.4 Disposition**

I denna rapport har vi börjat med att beskriva den grundläggande teori som ligger bakom experimenten och förklarat de begrepp som vi anser behöver förklaras. Sedan har vi beskrivit de mätmetoder som vi har använt oss av och fortsätter med att beskriva den mätprocess som vi följer. Därefter har vi presenterat resultatet av våra mätningar och diskuterat dess innebörd för att komma till en slutsats.

## 1.5 Avgränsningar

Vi har hållit oss till undersökning av olika undertaksmaterial och ändrade inte på skiljeväggens uppsättning. Endast ett fåtal produkter testades, och inte alla som finns på marknaden då vi inte har haft möjlighet till detta. Enbart undersökning av produkternas inverkan på talavskildhet och transmitterad ljudtrycksnivå gjordes. Detta har angivits i måtten *SPI* och *LD(f)*. Inverkan av produkterna på andra rumsakustiska mått såsom efterklangstid, taltydlighet och ljudstyrka har inte kontrollerats.

Vad gäller innehållet i rapporten har vi endast förklarat de begrepp som vi anser behöver förklaras för att läsaren ska kunna förstå det vi har gjort.

## 1.6 Tidigare mätningar och undersökningar

Vår informationssökning har visat att det inte finns några tidigare *liknande* arbeten som handlar om *SPI* förutom en rapport av J. S. Bradley och B.N. Gover som beskriver den standardmetod som används vid mätning och beräkning av *SPI*. Rapportens originaltitel är "*Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices*" som översatt till svenska betyder "utformning och utvärdering av arkitektonisk talsäkerhet för mötesrum och kontorsrum".

Bradleys och Govers rapport handlar om hur mötesrum utformas för att vara talsäkra och hur talsäkerheten mäts hos befintliga mötesrum. I vårt examensarbete använder vi Bradleys och Govers rapport som en viktig referens eftersom våra mätningar och beräkningar av *SPI* grundar sig på den standardmetod som beskrivs i rapporten.

Många arbeten har gjorts inom området *talsäkerhet* av Bradley och Gover. Dessa har följande titlar:

1. Measures for Assessing Architectural Speech Security
2. Measures for assessing architectural speech security (privacy) of closed offices and meeting rooms
3. Speech and Noise Levels Associated with Meeting Rooms
4. Measurement of Sound Transmission from Meeting Rooms
5. Validation of Architectural Speech Security Results

## 1.7 Symbolförteckning

Nedan följer en förteckning över de parametrar som har använts eller benämnts i examensarbetet. Dessa är i kronologiskt ordning efter uppkomst i examensarbetet. För att underlätta för läsaren att förstå beteckningar som ibland har samma beteckning men olika användningsområden har sådana beteckningar, till en del, modifierats. I dessa fall återfinns den riktiga beteckningen inom parantes.

$SPI$	<i>Speech Privacy Index</i> – ett mått för talavskildhet mellan rum, [dB]
$LD(f)$	Ljudtrycksnivåskillnad mellan sändarrum och mottagarrum, [dB]
$T$	Period - den tid det tar för en ljudvåg att göra en hel svängning, [s]
$f$	Ljutfrekvens, [Hz]
$\lambda$	Våglängden kallas längden för en hel vågsvängning [m]
$c$	Ljudets utbredningshastighet, [m/s]
$p$	Ljudtryck, [Pa]
$f_0$	Resonansfrekvens, [Hz]
$\omega$	Vinkelfrekvens, [Hz]
$D$	Luftspaltens bulkmodul, [N/m <sup>2</sup> ]
$d_1$	Luftspaltens bredd (d), [m]
$M''$	Ytvikt, [kg/m <sup>2</sup> ]
$T_{60}, T_{20}$	Efterklangstid, [s]
$K_T$	Konstant för beräkning av efterklangstid ( $K$ ), [s/m]
$V$	Ett rums volym, [m <sup>3</sup> ]
$A$	Absorptionsarea, [m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Absorptionskoefficient, [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
$R$	Reduktionstal, [dB]
$L_S$	Ljudtrycksnivå i sändarrummet, [dB]
$L_M$	Ljudtrycksnivå i mottagarrummet, [dB]
$S$	Skiljeväggens area, [m <sup>2</sup> ]
$R_w$	Vägd reduktionstal baserat på laborationsmätningar, [dB]
$R'_w$	Vägd reduktionstal baserat på fältmätningar, [dB]
$L_M(f)$	Det överförda talets medelljudtrycksnivå i mottagarrummet, [dB]
$L_N(f)$	Bakgrundsljudets medelljudtrycksnivå i mottagarrummet, [dB]
$L_S(f)$	Det överförda talets medelljudtrycksnivå i sändarrummet, [dB]
$x$	Avståndet mellan undertaket och plenum [m]
$n$	Heltalsvärde 0,1,2,3...
$h$	Materialets tjocklek, [m]
$\rho$	Materialets densitet, [kg/m <sup>3</sup> ]
$f_c$	Koincidensfrekvens även kallad kritisk frekvens, [Hz]
$K$	Materialkonstant för beräkning av kritisk frekvens, [m/s]
$\rho_0$	Luftens densitet, [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_0$	Ljudets utbredningshastighet i luft, [m/s]
$d_2$	Avståndet mellan gipsskivorna i skiljeväggen (d), [m]



## 2 Teori

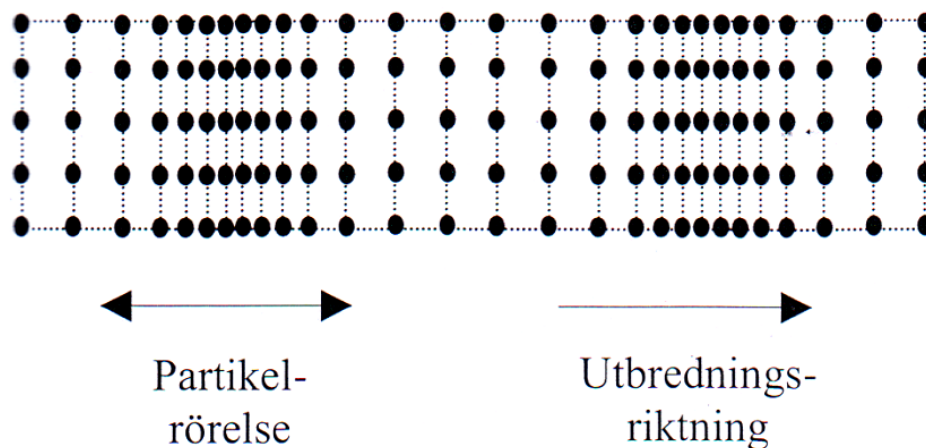
I detta kapitel har vi förklarat den teori och de begrepp som finns bakom de mätningar som vi har använt oss av för att genomföra detta arbete.

### 2.1 Vad är ljud?

Ljud är en svängningsrörelse som uppstår i ett elastiskt medium (ex. luft) genom någon slags störning i mediets jämvikt. Denna rörelse registreras sedan av trumhinnan som sätts i svängning. Örats övriga mekanismer omvandlar svängningen till elektriska impulser som uppfattas som det fenomen som vi känner till som ljud (Nilsson et al., 2008).

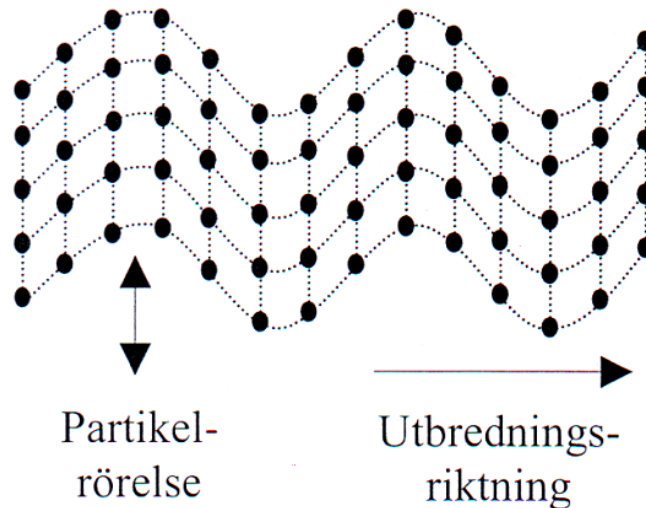
#### 2.1.1 Ljudets rörelse

Den störning som uppstår utbreder sig olika för olika medier. För luft utbreder den sig i samma riktning som partiklarna rör på sig och i detta fall kallas den våg som uppstår för en longitudinellvåg - vilket illustreras i *figur 2.1* nedan.



*Figur 2.1 från boken Grundläggande Akustik: Bild på longitudinell vågutbredning.*

I fasta material utbreder sig vågen både longitudinellt och transversellt. Att den rör sig transversellt innebär att den utbreder sig i vinkelrät riktning mot partikelrörelsen – vilket illustreras i *figur 2.2* (Nilsson et al., 2008).



Figur 2.2 från boken Grundläggande Akustik: Bild på transversell vågutbredning.

### 2.1.2 Vår uppfattning av ljud

Den störning som alstrar ljud skapar tryckvariationer i ett medium som sedan uppfattas av våra öron. Då vår hörsel är mycket känslig för dessa tryckvariationer så är det dessa som vi utgår från när vi ska beskriva ljudet. Ljudet uppfattas som ljusst eller mörkt beroende på hur snabbt tryckväxlingarna sker. Dessa tryckväxlingar sker i svängningar och tiden för en sådan svängning kallas för period. Antalet perioder per sekund anges i enheten Hertz (Hz), vilken är enheten för frekvens.

Längden för en svängning kallas för en våglängd. Då ljudets utbredningshastighet ( $c$ ) är konstant för ett visst medium med en viss temperatur (340 m/s för luft), får ljudet en kortare våglängd ( $\lambda$ ) för en högre frekvens ( $f$ ) och en längre våglängd för en lägre frekvens enligt följande samband:

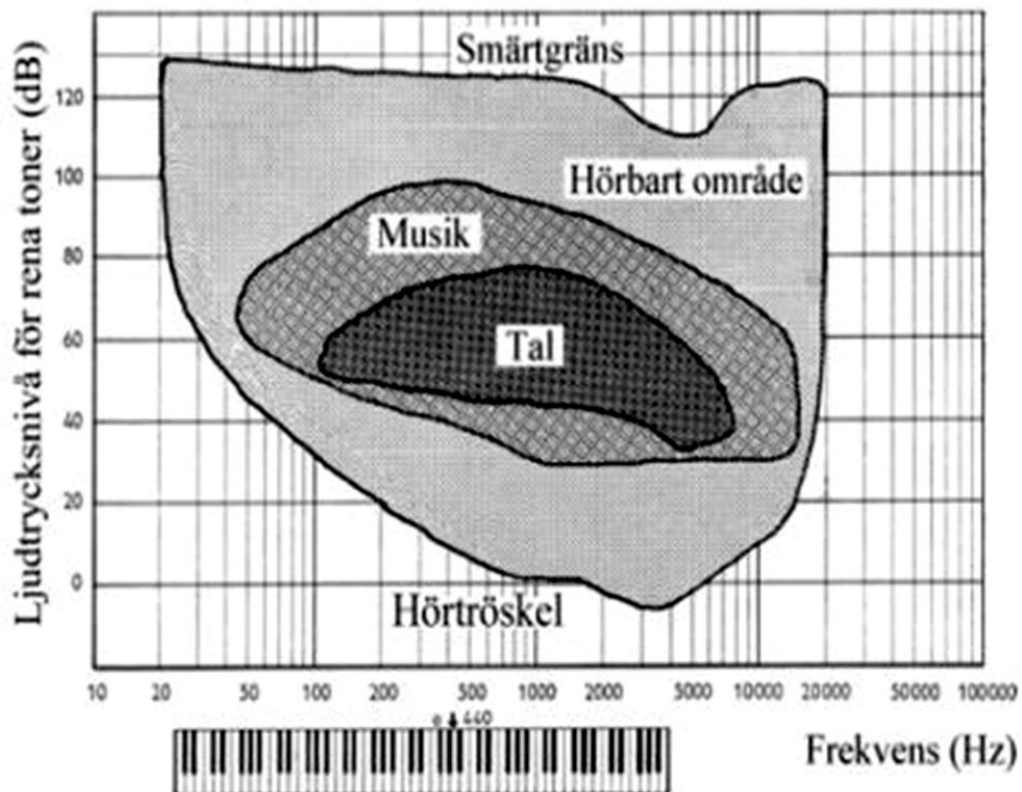
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Där  $\lambda$  är i m,  $c$  är i m/s och  $f$  är i Hz.

Det är efter frekvensen som vi anger ljudets tonart, dvs. ifall det är mörkt eller ljusst. Ljud med en hög frekvens uppfattar vi som en ljus ton och ett ljud med en låg frekvens uppfattar vi som en mörk ton. Dock är det sällan som vi uppfattar ett ljud som består av en enda ren frekvens, dvs. en ton. Oftast är det så att ett ljud är en sammansättning av flera frekvenser. De frekvenser som vi människor kan uppfatta ligger mellan ca 20 Hz och 20 kHz (Nilsson et al., 2008).

Beroende på storleken på tryckskillnaderna i ett ljud uppfattar vi det olika starkt. Då spännvidden av de tryckvariationer som våra öron kan uppfatta är mycket stor, mellan 10  $\mu\text{Pa}$  och 60 Pa, har det införts en mätstorhet som bygger på en logaritmisk skala. Denna anges i enheten decibel (dB) och anger ljudtrycksnivån i förhållande till det lägsta ljudtryck som vi kan uppfatta vid 1000 Hz vilket är 20  $\mu\text{Pa}$ .

Hörselns egenskaper varierar med frekvensen och bäst hör vi ljud som förstärks av hörselgången just på grund av deras våglängd och därmed frekvens. Hörselgångens längd är ca 25 mm och därför förstärks allt ljud i frekvenserna mellan 3-4 kHz då ljud i dessa frekvenser har ett särskilt förhållande till hörselgångens längd (Nilsson et al., 2008).



Figur 2.3 från boken Grundläggande Akustik: Illustration av örats omfång.

### 2.1.2.1 Filter

Då vi uppfattar förändringen av ljudets styrka olika för olika frekvenser har det införts filter i form av vägningskurvor som förstärker eller försvagar ljudtrycksnivån vid olika frekvenser. Dessa filter är bättre anpassade till hur vi upplever ljudtrycksnivån för en viss frekvens. Det finns A-, B- och C-filter som är anpassade för olika ändamål. A-filtret är avsett för relativt svaga ljud, B-filtret bör användas vid medelhöga nivåer och C-filtret vid höga (Nilsson et al., 2008).

En vägning kan göras för en ljudmätning enligt dessa filter. Då får enheten dB för ljudtrycksnivån ett tillägg på slutet beroende på vilket filter som har använts. Används t.ex. A-filtret så blir enheten för ljudtrycksnivån dBA istället för dB. Ytterligare information angående dessa filter och deras användning finns i boken *Grundläggande akustik* (Nilsson et al., 2008).

## 2.2 Begrepp

### 2.2.1 Oktaver och terser

Begreppet oktav motsvarar en fördubbling av frekvens. Det är alltså en oktav mellan 50 Hz och 100 Hz liksom mellan 440 Hz och 880 Hz. En oktav består av tre terser. För tersband och oktavband är bandbredden proportionell mot filtrens geometriska mittfrekvens. Mittfrekvens är en beteckning för varje filter. De olika banden ansluter till varandra så att hela frekvensområdet täcks kontinuerligt. Vid bullermätningar i oktavband används vanligen oktaver från 63 Hz upp till 4000 Hz medan för ljudtrycksnivåmätningar i rum används ofta oktaver från 100 Hz upp till 8000 Hz (Nilsson et al., 2008).

### 2.2.2 Diffusion

Diffusion av ljud innebär en spridning eller en omfördelning av ljudvågens energi. För att uppnå detta måste det skapas ett s.k. diffust ljudfält där det finns flera föremål som hjälper till att sprida och omfördela ljudenergin. Ett diffust ljudfält innebär att fas och riktning för ljudets utbredning är helt slumpvis i alla punkter i rummet (Nilsson et al., 2008).

Ett effektivt diffust ljudfält är svårt att uppnå utan särskilda lösningar. För att uppnå ett diffust ljudfält krävs geometriska irregulariteter och diffuserande föremål såsom möbler och speciellt utformade diffuserande paneler baserade på avancerad matematik. Vad som också behövs är en slumpmässig distribution av både reflekterande och absorberande ytor. Motverkan av diffusion sker av fokuserande ytor som samlar ljudenergin och desto mindre sådana ytor det finns ju bättre diffusion bildas (Bard, 2011).

### 2.2.3 Interferens

När två ljudvågor möts interfererar dessa med varandra, dvs. de påverkar varandra konstruktivt eller destruktivt. Om ljudvågorna är i fas förstärker de varandra och detta kallas konstruktiv interferens. Om ljudvågorna är fasvända kan de släcka varandra och detta kallas destruktiv interferens. Beroende på de olika vågornas fasvinkel kan detta fenomen bete sig annorlunda i olika fall. Interferens kan exempelvis ske när ljudvågorna som infaller mot en vägg möter de ljudvågor som reflekteras från väggen. De infallande och de reflekterande vågorna kan då förstärka eller försvaga varandra (Nilsson et al., 2008).

#### 2.2.4 Stående vågor och rummets interferens

Interferens kan uppstå mellan en ljudvåg som faller in mot en yta och en som reflekteras ifrån samma yta. När infallande och reflekterande våg möts mellan två reflekterande ytor som är parallella mot varandra kan en stående våg bildas. Då reflekteras ljudvågen fram och tillbaka mellan de parallella ytorna och vågen kan förstärkas eller försvagas. Då ljudvågornas våglängd och frekvens är beroende av varandra kommer en våg med en frekvens som har en våglängd, med ett särskilt förhållande till avståndet mellan de parallella ytorna, att skapa en stående våg. Därför hörs vissa frekvenser bättre på vissa ställen i ett rum än på andra (Ljud i Byggnad och Samhälle, 2011).

Rummets geometriska form har en stor betydelse för vilka ljudvågor det är som kommer att bilda stående vågor. Beroende på rummets bredd, höjd och längd kan det bildas stående vågor med en viss frekvens på olika ställen i rummet. Generellt kan det i ett rum finnas upp till sex reflekterande ytor och därför kan det finnas upp till sex dimensioner i vilka en stående våg kan bildas i olika frekvenser (Bard, 2011).

#### 2.2.5 Absorption

Absorption förklarar den förmåga ett material har att ta upp och omvandla ljudenergi till värmeenergi. Det finns i princip två olika absorberentyper.

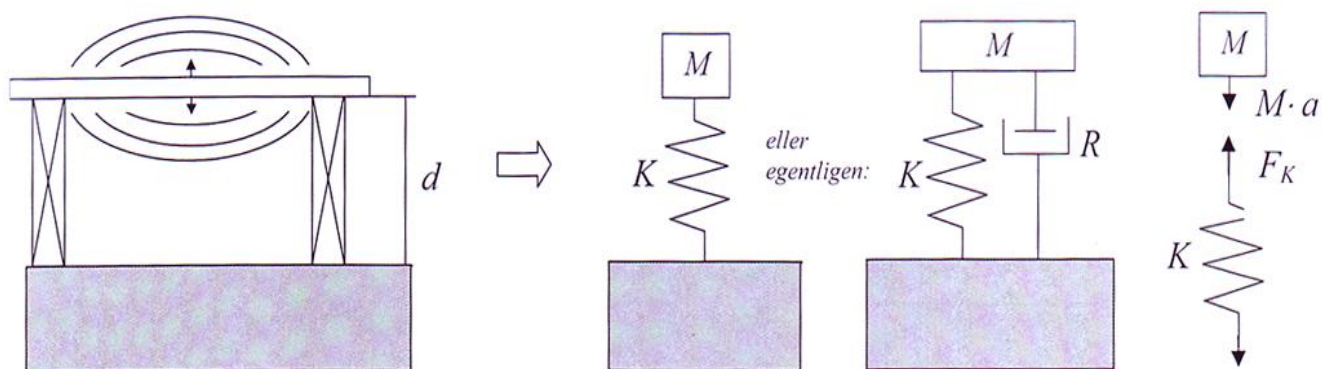
##### 2.2.5.1 Porösa absorberenter

Porösa absorberenter fungerar genom att ljudenergin övergår direkt till värmeenergi genom friktion av luftmolekyler mot en luftpors yta. Dessa fungerar bäst för högfrekventa ljud eftersom den höga frekvensen som ljudet har gör att friktionen av luftmolekylerna mot ytan i absorberenternas porer blir större och det omvandlas mer värmeenergi, dvs. ljudenergin övergår i större grad till värmeenergi. Friktionen som uppstår blir större än den som uppstår för lågfrekventa ljud pga. att molekylernas rörelse blir större för högre frekvenser.

Denna absorberentyp är inte så lämplig för lågfrekventa ljud eftersom ljud med låga frekvenser har förmågan att ta sig igenom porerna i absorberenten utan att någon avsevärd mängd ljudenergi övergår till värmeenergi på grund av att friktionen av luftmolekylerna mot ytan i porerna blir mindre (Nilsson et al., 2008).

### 2.2.5.2 Resonansabsorbenter

Resonansabsorbenter fungerar genom att luftmolekylernas rörelse sätter fart på någon struktur och därefter sker energiförluster. Resonansabsorbenter kan anpassas till att fungera bra i ett godtyckligt valt men smalare frekvensområde. Denna typ av absorbent fungerar i likhet med ett fjäder- massasystem enligt figuren nedan. I verkligheten finns det alltid inbyggt en dämpare som omvandlar ljudenergin till värmeenergi. Det är tack vare denna som ljudenergin kan minskas. För att få bättre absorptionsegenskaper i ett bredare frekvensområde läggs det ibland till lite extra dämpning i form av mineralull (Nilsson et al., 2008).



Figur 2.4 från boken Grundläggande akustik: Det tunna trägolvet utgör massan, M medan luftspalten utgör fjädern och det tunga betonggolvet utgör fast inspänning. Det är alltså luftens motstånd till rörelse som utgör dämpningen och som står för energiförlusterna.

För att undersöka vid vilken frekvens resonans inträffar används följande formel (Nilsson et al., 2008):

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{D} \sqrt{\frac{1}{M''d_1}} \approx 60 \sqrt{\frac{1}{M''d_1}} \quad (2.2)$$

Där  $f_0$  är resonansfrekvensen i enheten Hz,

$\omega$  är vinkelfrekvensen i Hz,

$D$  är luftspaltens bulkmodul i  $\text{N/m}^2$ ,

$d_1$  är luftspaltens bredd i m och

$M''$  är massa per ytenhet  $\text{kg/m}^2$ .

### 2.2.6 Transmission och reflektion

När en ljudvåg träffar ett nytt medium störs vågutbredningen av att elasticiteten, massan och densiteten inte är det samma i det nya mediet. En del av ljudenergin kommer därför att reflekteras, en del kommer att transmittas och en del kommer att absorberas genom energiförluster på grund av friktion.

Den del av ljudenergin som fortsätter in i det nya mediet är den transmitterade ljudenergin (Nilsson et al., 2008).

När en ljudvåg som avges från en ljudkälla i ett rum träffar rummets väggar kommer en del av ljudvågen att reflekteras tillbaka, en del kommer att gå igenom väggen och en del kommer att absorberas genom att energiförluster uppstår pga. friktion i väggen (Nilsson et al., 2008).

### 2.2.7 Flanktransmission

Ljudtransmission som inte sker direkt via skiljeväggen mellan två rum utan via andra vägar såsom flankerande väggar, tak och golv kallas för flanktransmission. Flanktransmission innebär att ljudvågorna i ett rum sätter dessa komponenter i svängning som sedan överför ljudet till närliggande rum (Nilsson et al., 2008).

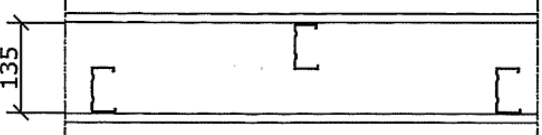
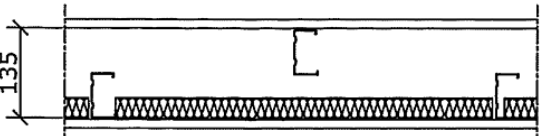
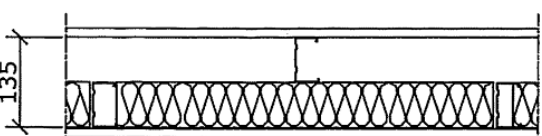
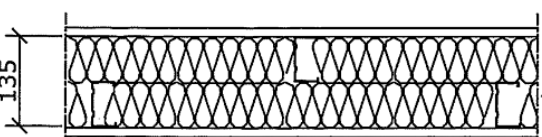
### 2.2.8 Reduktionstal $R$ och vägt reduktionstal $R_w$

Reduktionstalet är ett av de vanligaste begreppen som benämns i samband med ljudisolering i byggnader. Det är en relation mellan infallande ljudeffekt på ena sidan av en vägg och transmitterad ljudeffekt till andra sidan av samma vägg och anges i decibel, dB. Reduktionstalet beskriver enbart väggens egenskaper och ju högre reduktionstalet är desto bättre är väggens ljudisolering förmåga. I princip gäller att ju högre massa en vägg har per ytenhet desto högre blir reduktionstalet. Reduktionstalet är i regel högre för högre frekvenser förutom när *resonans* och *koincidens* inträffar. Dessa fenomen beskrivs ytterligare under respektive rubrik (Nilsson et al., 2008).

Vid mätning av reduktionstalet för en vägg erhålls ett resultat i form av en tabell eller graf som anger väggens reduktionstal som funktion av ljudets frekvens. Eftersom det är svårt att utifrån dessa ljudreduktionskurvor konstruera ett regelverk har det tagits fram en standard för framtagande av ett fåtal ensiffrvärden. Det vanligaste värdet som har tagits fram utifrån denna standard kallas *vägt reduktionstal*  $R_w$ . Det vägda reduktionstalet  $R_w$  beräknas enligt den internationella standarden SS-ISO 717/7. Ett högt vägt reduktionstal innebär bra luftljudsisolering (Nilsson et al., 2008).

För att förbättra en väggs ljudisolering förmåga utan att göra den onödigt massiv och tung byggs väggen istället som en dubbelvägg. Genom att ha en dubbelvägg som i *figur 2.5* nedan med en luftspalt emellan de två väggdelarna fås en bättre ljudisolering utan att konstruktionen blir alltför tung (första exemplet i *figur 2.5*). Fylls luftspalten med mineralull, som fungerar som absorbent, förbättras ljudisoleringen ytterligare (tre sista exemplen i *figur 2.5*). För att erhålla bra ljudisolering i väggen är det mycket viktigt att väggen

byggs tät utan springor och läckage då dessa har stor negativ inverkan på det sammansatta reduktionstalet. Om väggen är en yttervägg med fönster är det därför även viktigt att välja ett fönster med bra reduktionstal för att erhålla bra ljudisolering i väggen (Nilsson et al., 2008). När det gäller väggens konstruktion är det även väldigt viktigt att väggens stomme är *saxad*, dvs. reglerna går inte rätt igenom väggen. Detta förhindrar att *ljudbryggor* uppstår som försämrar väggens ljudisolerande förmåga.

		$R_w$ dB
	13 mm gips utan absorbent Stålreglar c 600 mm 13 mm gips	41
	13 mm gips 30 mm mineralull Stålreglar c 600 mm 13 mm gips	49
	13 mm gips 70 mm mineralull Stålreglar c 600 mm 13 mm gips	50
	13 mm gips 2x70 mm mineralull Stålreglar c 600 mm 13 mm gips	54

Figur 2.5 från boken Byggnadsakustik: Bild på dubbelväggar med isolering.

### 2.2.9 Resonans

När en ljudvåg träffar en vägg sätts väggen i rörelse. Vid låga frekvenser (omkring 100 Hz) kommer tröghetskrafterna att samverka på grund av väggens massa och väggens fjäderstyvhet, vilket gör att resonans uppstår och väggen svänger lättare. Detta innebär att väggens isoleringsförmåga reduceras för de frekvenser då resonans uppstår och ljud med en frekvens kring 100 Hz blockeras i princip inte. Resonans kan därför vara en av orsakerna till varför ljud med vissa frekvenser hörs mer än andra i ett närliggande rum till sändarrummet (Nilsson et al., 2008).



### 2.2.10 Koincidens

Koincidens är ett fenomen som inträffar för högre frekvenser och som innebär försämrade ljudisolerande förmåga för t.ex. en vägg. När ljudvågor faller in mot en vägg sätts väggen i svängning. Våglängden bestäms av utbredningshastigheten i väggen, som i sin tur beror på väggens böjstyvhet, ytvikt och frekvens. Beroende på vilken riktning och frekvens ljudet har erhålls olika svängningsmönster. När dessa överrensstämmer med den för väggen karakteristiska böjvåglängden transmitteras ljud lätt vidare till andra sidan av väggen. Detta fenomen, när luftvåglängden stämmer överens med väggens böjvåglängd för väggen, kallas koincidens. Det finns en lägsta frekvens för vilket koincidens kan inträffa och denna frekvens kallas *kritisk frekvens* (Nilsson et al., 2008).

### 2.2.11 Efterklangstid

Efterklangstiden definieras som den tid det tar för ljudet att minska 60 dB och betecknas som  $T_{60}$  eller  $T_{20}$ . Följande formel används för att beräkna efterklangstid:

$$T_{60} = K \cdot \frac{V}{A_M} \quad (2.3)$$

Där  $K = 0,16$  s/m.  $V$  är rummets volym i  $m^3$  och  $A_M$  är absorptionsarean i  $m^2$ .

Absorptionsarea är arean av ett föremål som beroende på olika frekvenser har olika stor förmåga att absorbera ljudenergi. Ett sätt att ange absorptionsarean i förhållande till materialets totala area är med absorptionskoefficienten,  $\alpha = A_M/S$ .  $S$  är föremålets eller materialets verkliga area.

Med hjälp av uppmätt efterklangstid i ett rum uppskattas hur bra eller dålig akustiken i rummet är. Att efterklangstiden är bra eller dålig beror på rummets användning. Olika efterklangstid passar för olika ändamål. Detta går vi dock inte in på i detalj i detta arbete och för den som är intresserad går detta att läsa mer i boken *Grundläggande akustik* (Nilsson et al., 2008).

Genom att mäta efterklangstiden beräknas absorptionsarean i ett rum för olika frekvenser. Denna area kan sedan användas för att bestämma ett materials absorptionskoefficient. Efterklangstid kan annars även användas för att mäta styrkan av en ljudkälla eller transmission av ljudenergi via en vägg (Bard, 2011).

### 2.2.11.1 Att tänka på vid mätning av efterklangstid

Det är viktigt att veta att *formel 2.3* är lämplig att använda när ljudfältet i rummet är hyfsat likt ett diffust ljudfält.

Interferens kan också påverka mätresultatet då vi kan få utsläckning eller förstärkning i just den position där mikrofonen står. Detta motverkas genom att flytta på mikrofonen för varje test och sedan beräknas det aritmetiska medelvärdet av resultaten. *Rosa eller vitt brus* bör användas. Med *vitt brus* menas ett ljud som sänds i alla frekvenser och har samma genomsnittliga energi över alla frekvenser. *Rosa brus* har istället en jämn fördelning av energi i alla oktaver (Nilsson et al., 2008).

För att *formel 2.3* skall fungera bra krävs att rummets mått är ungefär lika dvs. bredden, höjden och längden ska ungefär vara lika stora. Rummet bör även ha en jämn geometrisk form (Nilsson et al., 2008). För rum som har ovanlig form såsom långa och smala korridorer, rum med lågt tak eller med många fokuserande ytor ger *formel 2.3* felaktiga beräkningar av efterklangstiden. Det finns en korrektion för denna men detta går vi inte in på i denna rapport (Bard, 2011).

När efterklangstiden uppskattas för små ytor fås en överskattning av absorptionen och för att inte överskatta absorptionsmaterialets förmåga är det viktigt att det finns minst 10 m<sup>2</sup> absorbentmaterial i rummet.

Vid mätningen av efterklangstiden fås olika värden för olika frekvenser. Detta beror på att det ljudabsorberande material som finns i rummet absorberar ljud bättre för vissa frekvenser, se rubriken *Absorption*. Den mängd energi som inte absorberas reflekteras istället, vilket gör att den dröjer kvar en längre tid i rummet och ökar efterklangstiden. Därför fås oftast högre efterklangstid för de lägre frekvenserna och vice versa (Nilsson et al., 2008).

## 2.3 Speech Privacy Index – SPI

Ett värde som används för att bedöma hörbarheten och tydligheten på talljud från ett intilliggande rum är *Speech Privacy Index* (i fortsättningen *SPI*). *SPI* är ett mätvärde som anger en vägd ljudtrycksnivåskillnad från ljudkälla till mottagare över de frekvenser som omfattar mänskligt tal, vilka är mellan 160 Hz och 5000 Hz.

*Speech privacy* betyder i princip ”talavskildhet” och används för att beskriva en mängd förhållanden där det finns olika grader av svårighet att förstå tal. *Speech privacy* varierar från den nästan obefintliga talavskildheten som finns i öppna kontorslandskap till den nästan perfekta talavskildheten som kan finnas

mellan helt avskilda rum. Mötesrum som är akustiskt avskilda från den övriga byggnaden brukar oftast vara talsäkra då det är väldigt svårt för en avlyssnare att förstå det som sägs inuti mötesrummet. Med talsäkerhet menas att det finns en hög grad av talavskildhet.

Att tal från ett intilliggande rum är hörbart beror på tre faktorer: (a) ljudisoleringen mellan rummen, (b) ljudtrycksnivån på talet i mötesrummet, och (c) ljudtrycksnivån på bakgrundsljudet som finns i mottagarrummet. När det överförda talet är högt nog i jämförelse med bakgrundsljudet i mottagarens position, blir det hörbart och ibland tydligt nog att förstå.

Främst av allt är det överförda talets tydlighet relaterat till ljudtrycksnivån på bakgrundsljudet i ett rum. Ju högre det överförda talets ljudtrycksnivå är i jämförelse med bakgrundsljudets ljudtrycksnivå, desto lättare blir talet att förstå. Därför kan talets tydlighet uppskattas och vår förmåga att förstå talet genom värden som anger förhållandet mellan dessa ljud. Det finns flera sådana mätvärden och en av dessa är *SPI*. De övriga går vi inte in på i denna rapport men för den som är intresserad finns det information om dessa i våra källor.

*SPI* utvecklades från en serie noggranna och omfattande test. I dessa test etablerades: (i) hörbarhetsgränsen för olika talljud, (ii) hörbarhetsgränsen för olika tonfall eller rytmen för olika talljud, och (iii) hörbarhetsgränsen för tydligheten av olika talljud dvs. då minst ett ord är begripligt (Bradley & Gover, 2006).

De gränsvärden på *SPI* som etablerades från de olika testerna finns i följande tabell:

<b>Hörbarhetsgräns</b>	<b><i>SPI</i></b>
Tydligt tal då minst ett ord är begripligt	- 16 dB
Rytm och tonfall	- 20 dB
Knappt hörbart och går ej att begripa tal. Går ej att uppfatta rytm eller tonfall.	- 22 dB

Tabell 2.1 *SPI*-värden för knappt märkbara gränser. Från J.S. Bradleys och B.N. Govers rapport *Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices*.



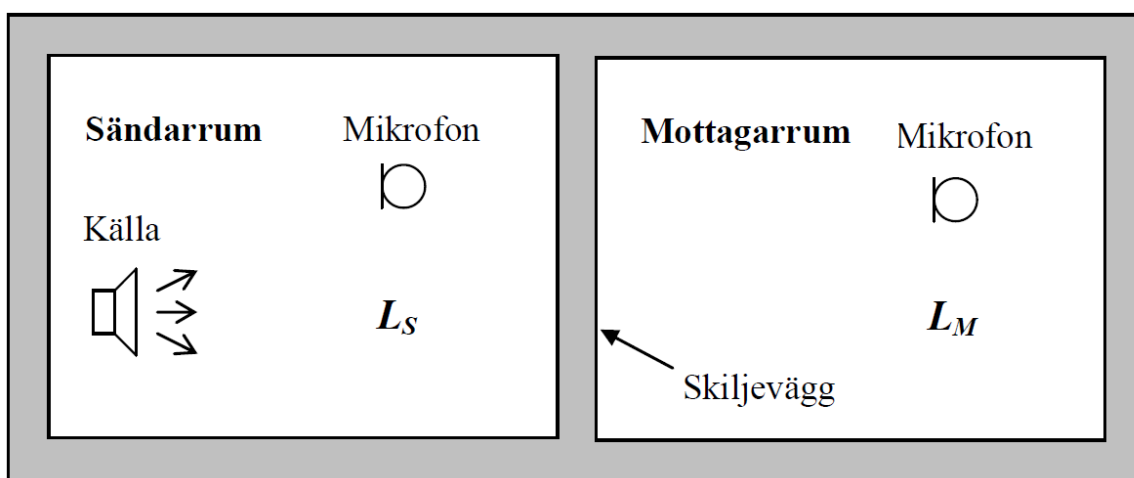
### 3 Mätningar och genomförande

#### 3.1 Mätning och beräkning av reduktionstal samt vägt reduktionstal

I svenska bostäder, skolor och kontor krävs att det kan upprätthållas en viss ljudisolering från t.ex. grannar, närliggande klassrum, närliggande kontor och trafikbuller. Det finns mätmetoder som är beskrivna i svenska standardverk som används för att kunna kontrollera hur bra ljudisolering kan erhållas i en byggnad. I byggreglerna regleras sedan vilken nivå som ska erhållas vid nybyggnation och större renoveringar beroende på vilken ljudklass det strävas efter att uppnå. En viktig standard som beskriver hur en ljudmätning skall utföras är SS-ISO 140 (Nilsson et al., 2008).

##### 3.1.1 Metod

För att beräkna reduktionstalet för skiljeväggen mäts ljudtrycksnivån i sändarrummet ( $L_S$ ) och sedan i mottagarrummet ( $L_M$ ) för olika frekvenser. Sedan mäts efterklangstiden i mottagarrummet för att kunna beräkna absorptionsarean ( $A_M$ ) i mottagarrummet. Med hjälp av denna och skiljeväggens area ( $S$ ) beräknas reduktionstalet för väggen och sedan plottas reduktionstalets kurva för olika frekvenser.



Figur 3.1 från boken Grundläggande akustik: Luftljudstransmission genom en skiljevägg med yta  $S$ .  $L_S$  och  $L_M$  är ljudtrycksnivåer i sändarrum och mottagarrum.  $A_m$  är mottagarrummets absorptionsarea.

Reduktionstalet för väggen beräknas med hjälp av följande ekvation:

$$R = L_S - L_M + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A_M}\right) \quad (3.1)$$

Ljudtrycksnivåerna i sändarrummet ( $L_S$ ) respektive i mottagarrummet ( $L_M$ ) mäts med hjälp av en mikrofon som mäter ljudtrycksnivåer för olika oktavband. Minst tre olika mikrofonpositioner bör användas och sedan beräknas ett aritmetiskt medelvärde på ljudtrycksnivåerna för olika frekvenser. På så sätt undviks problem med interferens och andra fenomen som kan medföra att mätresultaten blir felaktiga. För att beräkna mottagarrummets absorptionsarea  $A_M$  mäts efterklangstiden  $T_{60}$  för olika oktavband i mottagarrummet. Med hjälp av efterklangstiden beräknas sedan  $A_M$  för olika oktavband enligt följande formel:

$$A_M = K \cdot \frac{V}{T_{60}} \quad (3.2)$$

Där  $K = 0,16$  s/m,  $V$  är mottagarrummets volym och  $T_{60}$  är efterklangstiden.

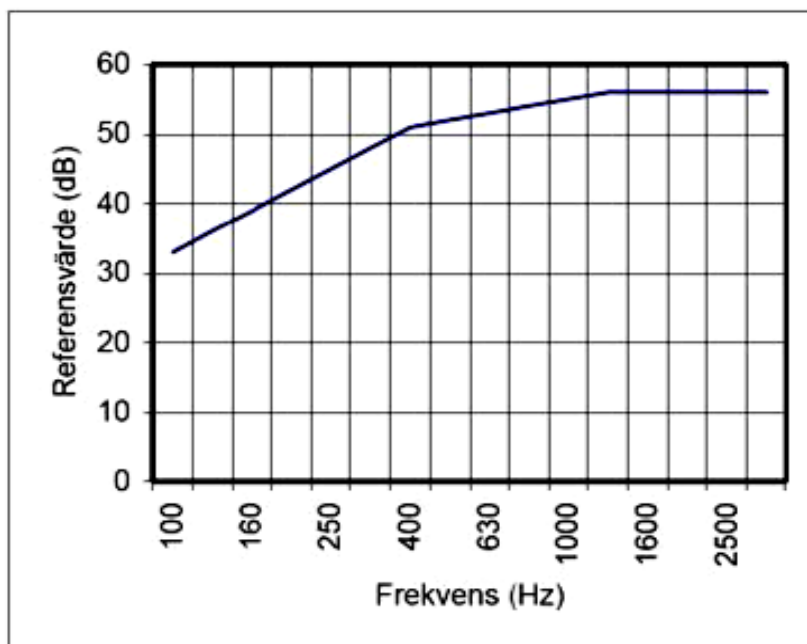
Genom att använda *formel 3.2* för att beräkna absorptionsarean för en viss frekvens och sedan använda *formel 3.1* erhålls väggens reduktionstal för denna frekvens. När detta görs för alla frekvenser erhålls väggens reduktionstalskurva som sedan kan användas för att beräkna ett *vägt reduktionstal*  $R_w$  för skiljeväggen.

Förutom transmissionen direkt genom skiljeväggen kan ljudet transmittas via flanktransmission. Vid mätning av reduktionstalet för en vägg i ett vanligt hus går det inte att vara helt säker på att det inte finns någon flanktransmission. Sådana mätningar kallas därför fältmätningar och det vägda reduktionstalet betecknas då  $R'_w$ . Observera att det vägda reduktionstalet som baseras på laborationsmätningar betecknas  $R_w$  och beräknas på samma sätt som  $R'_w$  vilket framgår av *figur 3.2*. Se även *figur 3.3* för ett exempel på en beräkning efter en fältmätning.

### 3.1.2 Beräkning av vägt reduktionstal $R'_w$

Vägt reduktionstal  $R'_w$  beräknas genom att jämföra den uppmätta reduktionstalskurvan med en referenskurva och sedan flytta referenskurvan i steg om 1 dB mot den uppmätta reduktionstalskurvan tills den ogynnsamma avvikelserna är så stora som möjligt men inte större än 32 dB. Värdet som referenskurvan intar vid 500 Hz efter att ha flyttats enligt detta tillvägagångssätt kallas *vägt reduktionstal*  $R'_w$ .

### Referenskurva för luftljudisolering:



Frekvens, Hz	Ref.värde, dB
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56

Figur 3.2 från boken Grundläggande akustik: Bild på referenskurvan som används vid beräkning av vägt reduktionstal  $R'_w$ .

Nedan följer ett exempel från boken *Grundläggande akustik* på hur  $R'_w$  beräknas för en vägg efter att reduktionstalskurvan har uppmätts för väggen:

**Exempel**

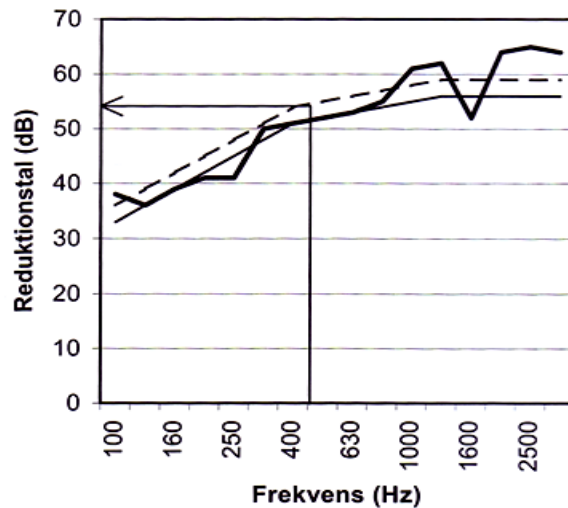
Vid en luftljudsisoleringsmätning av en vägg i fält erhöles följande reduktionstal ( $R'$ ). Beräkna vägt reduktionstal  $R'_w$ .

Frekvens [Hz]	$R'$ [dB]	Ref. kurva [dB]	Ref- $R'$	Ref+1- $R'$	Ref+2- $R'$	Ref+3- $R'$
100	38	33	-5	-4	-3	-2
125	36	36	0	1	2	3
160	39	39	0	1	2	3
200	41	42	1	2	3	4
250	41	45	4	5	6	7
315	50	48	-2	-1	0	1
400	51	51	0	1	2	3
500	52	52	0	1	2	3
630	53	53	0	1	2	3
800	55	54	-1	0	1	2
1000	61	55	-6	-5	-4	-3
1250	62	56	-6	-5	-4	-3
1600	52	56	4	5	6	7
2000	64	56	-8	-7	-6	-5
2500	65	56	-9	-8	-7	-6
3150	64	56	-8	-7	-6	-5
$\Sigma$ ogynnsam avvikelser			9	17	26	36

**Lösning**

- Jämför uppmätt kurva ( $R'$ ) med referenskurvan varvid framgår att  $\Sigma$  ogynnsam avvikelser på undersidan är 9 dB. (Fetade värden indikerar ogynnsam avvikelser.)
- Då referenskurvan förskjuts 2 dB över sitt utgångsläge, blir differensen 26 dB. Avvikelse < 32 dB.
- Om referenskurvan förskjuts 3 dB blir motsvarande summa 36 dB. Avvikelse > 32 dB.
- $R'_w$  för luftljudsisoleringen blir i detta fall 54 dB, vilket är den flyttade referenskurvas värde vid 500 Hz då villkoren uppfylls.

Svar:  $R'_w = 54$  dB



Figur 3.3 från boken *Grundläggande akustik*: Exempel på beräkning av  $R'_w$  för en vägg.

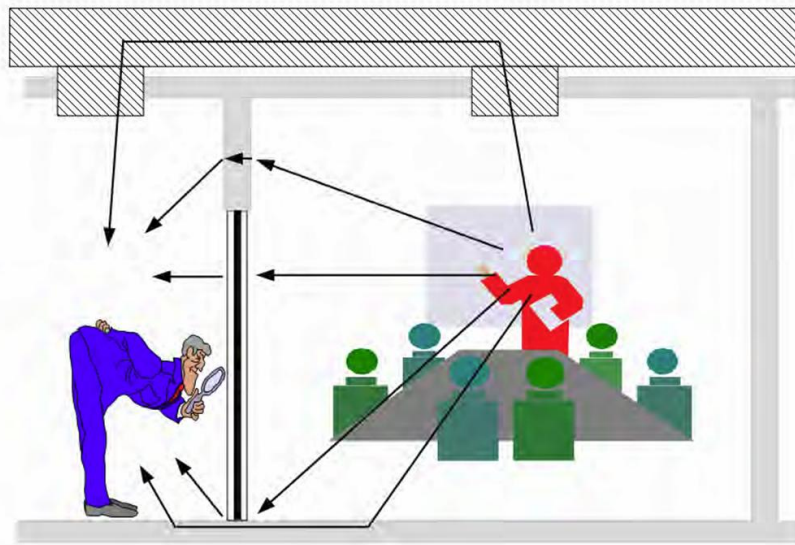


### 3.1.3 $Dnf_w$

På samma sätt som  $R$  och  $R_w$  beräknas för en vägg, beräknas  $Dnf$  och  $Dnf_w$  för ett undertak. För att göra detta finns en utarbetad standard som ska följas. Vi beskriver inte denna standard i det här examensarbetet.

## 3.2 Mätning och beräkning av $SPI$ enligt standard

Generellt gäller det att möjligheten av att tal hörs i ett mottagarrum bör bedömas. Detta bör göras för alla sidor i rummet och möjligtvis även ovan och under rummet. Det finns många möjliga vägar för ljud att färdas från ett rum till ett annat, vilket visas i *Figur 3.4* nedan.



*Figur 3.4 från rapporten Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices av J.S. Bradleys och B.N. Gover. En illustration på möjliga vägar som ljud kan färdas från ett rum till ett annat.*

### 3.2.1 Ljudkälla, signal och frekvens

För att få med alla frekvenser som ligger inom det mänskliga talet används en högtalare i sändarrummet som sänder s.k. *vitt brus*. Denna högtalare måste kunna sända ut ljud i alla riktningar i rummet och uppfylla de krav som ställs enligt ISO 3382 standarden.

Signalen som sänds till förstärkaren bör vara en stokastisk signal som innehåller en nära likformigt fördelad energi över frekvenserna för varje tersband. Detta kan uppfyllas av *vitt brus*.

Frekvensserien för mätningen måste vara i tersband mellan 160 och 5000 Hz (Bradley & Gover, 2006).

### 3.2.2 Mätutrustning

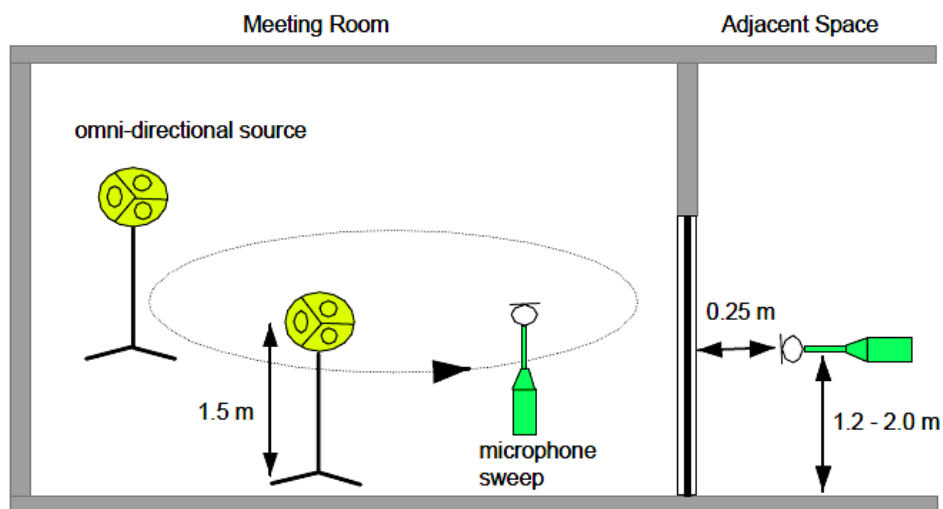
Mikrofoner, förstärkare och annan elektronisk utrustning som används för signalbehandling måste hålla kraven som ställs i ANSI S1.4 för typ 1 ljudtrycksnivåmätare.

Mikrofonen ska ha en diameter på 13 mm eller mindre och kunna mäta ljud med frekvenser under 5000 Hz från alla riktningar.

Varje tersband bör inte mätas enskilt utan alla frekvenser bör mätas på samma gång (Bradley & Gover, 2006).

### 3.2.3 Mätprocessen

Beroende på rummets volym används olika antal positioner för högtalaren. För stora rum över 200 m<sup>3</sup> med en efterklangstid på mindre än 0,5 sek bör det användas minst fyra positioner. För rum mindre än så används minst två positioner som är minst 2 m ifrån varandra och 1 m från rummets gränser (väggar). Används en högtalare som sänder ut ljud i alla riktningar, reduceras antalet nödvändiga positioner i mottagarrummet mycket. Högtalaren bör vara placerad 1,5 meter över golvet (Bradley & Gover, 2006).



Figur 3.5 från rapporten *Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices* av J.S. Bradley och B.N. Gover. Illustration av mätprocedur.

#### 3.2.3.1 Högtalar- och mikrofonposition för mätningar i sändarrummet

För varje högtalarposition mäts sändarrummets medelljudtrycksnivå. Denna mäts med en mikrofon som placeras på minst fyra olika positioner. Dessa positioner bör vara minst 1 m ifrån varandra och rummets gränser eller reflekterande ytor samt minst 1,5 m från ljudkällan (Bradley & Gover, 2006).

En s.k. ”microphone sweep” kan göras och då cirkuleras mikrofonen runt i rummet under mätningen. Detta beskriver vi dock inte något ytterligare i

denna rapport men för den som är intresserad går det att läsa mer om detta i Bradleys och Govers rapport.

### 3.2.3.2 Mikrofonposition för mätningar i mottagarrummet

Mätningar i mottagarrummet bör göras i de delar av rummet där det misstänks att talavskildheten kan vara sämre. Nära dörrar, fönster, och andra positioner där ljud överförs lättare från ett rum till ett annat bör inkluderas. Generellt gäller att mikrofonen placeras 0,25 m ifrån dessa komponenter. För att identifiera dessa positioner och olika ljudläckor, dvs. positioner där talavskildheten är sämre än i övriga rummet, placeras högtalaren i sändarrummet nära mottagarrummets mitt. Då sänds en signal på 80 dB för att sedan identifiera dessa positioner genom att en person går runt och lyssnar efter läckor.

Förutom de positioner som identifieras ha sämre talavskildhet än i övriga rummet, bör även andra positioner mätas för att få en komplett mätning av hela rummets talavskildhet.

Mikrofonen bör placeras minst 0,25 m från någon reflekterande yta i rummet och vara mellan 1,2 och 2 m över golvet. Mätningen av ljudtrycksnivån bör göras i minst 15 sekunder för varje position.

Antalet positioner beror på rummets geometri och mängden ljudläckor som identifieras. Även positioner där det inte misstänks finnas någon ljudläcka bör inkluderas i mätningar. Dessa positioner ska vara 0,25 m från rummets gränser (Bradley & Gover, 2006).

### 3.2.4 Beräkningsprocessen

*SPI* är det vägda värdet för förhållandet mellan ljudkälla och mottagare och ges av den ovägda summan av tersbandens ljudtrycksnivåskillnader enligt följande:

$$SPI = \sum_{f=160}^{5000} \frac{[L_M(f) - L_N(f)]}{16} \quad (3.3)$$

där frekvensen  $f$  är varje tersband,

$L_M(f)$  är det överförda talets medelljudtrycksnivå i mottagarrummet, och

$L_N(f)$  är bakgrundsljudets medelljudtrycksnivå i mottagarrummet.

Om värdet inom klammern blir lägre än -32 dB är det långt under gränsvärdet för hörbarhet, vilket i sin tur är en extrem överskattning av talavskildheten

mellan rummen. Därför är det nödvändigt att ”klippa” eller ”begränsa” skillnaden mellan ljudtrycksnivåerna från källa till mottagare för varje tersband så att detta värde inte blir lägre än -32 dB (Bradley & Gover, 2006).

Används *vitt brus* och ett antal olika positioner för att mäta ljudtrycksnivåerna, kan genomsnittliga värden fås på ljudtrycksnivåerna som beskriver rummets helhetliga akustiska egenskaper på ett bra sätt. Då transmissionens egenskaper bestäms från skillnaden i ljudtrycksnivåerna mellan de intilliggande rummen representerar dessa genomsnittliga värden en talare som kan stå i vilken position som helst i rummet. Dessa värden kan då användas för att beräkna *SPI* genom att skriva om *ekvation 3.3* till:

$$SPI = \sum_{f=160}^{5000} \frac{[L_S(f) - LD(f) - L_N(f)]}{16} \quad (3.4)$$

$LD(f) = L_S(f) - L_M(f)$ , frekvensen  $f$  är varje tersband,  $L_S(f)$  är det överförda talets medelljudtrycksnivå i sändarrummet och  $LD(f)$  är ljudtrycksnivåskillnaden mellan sändarrummets medelljudtrycksnivå och mottagarpositionens medelljudtrycksnivå.

Då värdet inom klammern oftast inte är mindre än - 32 dB kan *ekvation 3.4* skrivas om till en enklare form:

$$SPI = L_S(avg) - LD(avg) - L_N(avg) \quad (3.5)$$

Där  $L_S(avg)$ ,  $LD(avg)$  och  $L_N(avg)$  är aritmetiska medelvärden för tersband mellan 160 och 5000 Hz (Bradley & Gover, 2006).

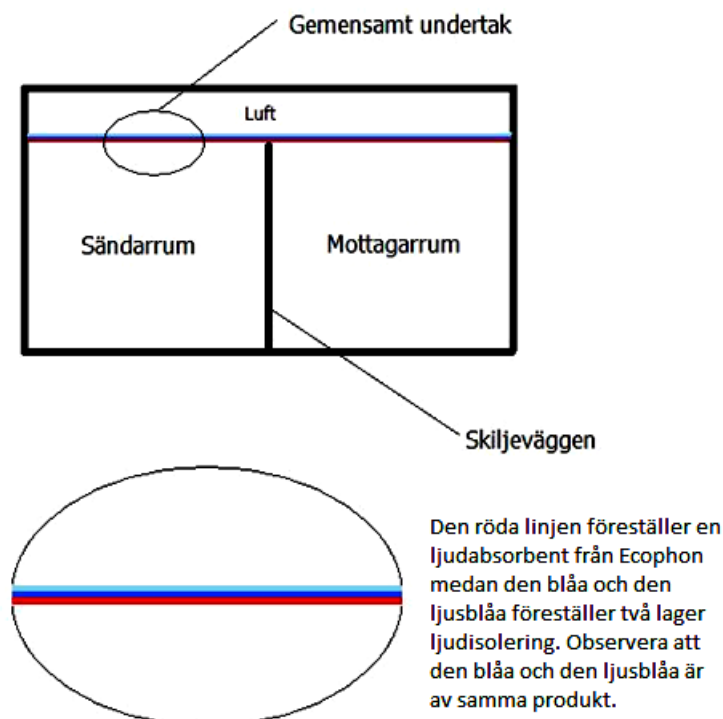
### 3.3 *SPI*-mätningar på Ecophon

Vi fick i uppgift av Ecophon att undersöka och analysera Ecophons nya produkt och dess förmåga att minska ljudöverföringen från ett kontor till ett intilliggande kontor med syfte att åstadkomma ett bättre *SPI*-värde. För att genomföra våra mätningar följde vi i princip den tillgängliga standarden som används för mätning och beräkning av *SPI*. Denna beskrivs ovan under rubriken *Mätning och beräkning av SPI enligt standard*. Nedan beskriver vi mer noggrant hur vi genomförde våra mätningar som i vissa detaljer inte följde beskriven standard.

### 3.3.1 Metod

På Ecophons laboratorium i Hyllinge finns två intilliggande rum med en avskiljande vägg emellan dem som går upp till undersidan av det gemensamma undertaket. Väggen fortsätter inte hela vägen upp till plenum, se *figur 3.6* nedan. På detta sätt minskar flanktransmissionen och endast effekten av ljudisoleringen som ligger i undertaket mäts, då ljudet enklast tar sig genom det gemensamma undertaket. Skiljeväggen har en mycket bra konstruktion avseende ljudisolering som tar hänsyn till flanktransmission. Den är uppbyggd på följande sätt: 2x13 mm gips på vardera sidan, en saxad stomme med 95 regler. Utrymmet mellan gipsväggarna är 200 mm och är fyllt med glasull. Väggen har ett  $R_w$  på 56 dB.

Vi hade möjligheten att ändra på undertakets uppsättning genom att plocka bort eller lägga på de produkter som Ecophon ville testa.



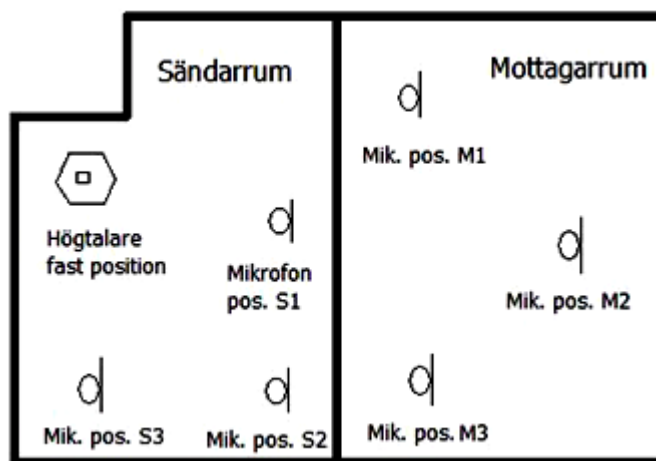
*Figur 3.6: Illustration av laboratoriet.*

Under första testet hade vi ett lager ljudabsorberande material och två lager ljudisolerande material. Det första lagret bestod av absorbenten Focus A och de två andra lagren ovan absorbenten bestod av en ljudisolerande skiva av våtpressat material. Kombinationen av dessa två är Ecophons nya produkt som vi ville testa. Den våtpressade skivan hade en bredsida som var målad och vi ville även testa om vi fick någon skillnad i resultaten beroende på hur de målade ytorna på de två lagren låg i förhållande till varandra. Vi testade om, och hur, resultatet förändrades när de målade ytorna låg mot varandra, jämfört med när de målade ytorna låg vända åt motsatta riktningar.

I det andra testet plockade vi bort det absorberande lagret och undersökte vad som hände med *SPI* när det endast var två lager *våtpressade skivor* i undertaket.

Det tredje testet gick ut på att plocka bort de våtpressade skivorna och undersöka vad som händer när endast takabsorbenten Focus A utgjorde undertaket.

Under alla tester hade vi samma mätprocedur och position på vår högtalare medan vi för varje test hade tre olika mikrofonpositioner för sändarrummet respektive för mottagarrummet. Dessa mätpositioner för sändarrummet betecknas *mikrofon pos. S1, S2 och S3* medan de för mottagarrummet betecknas *mikrofon pos. M1, M2 och M3* enligt *figur 3.7* nedan.



*Figur 3.7: Illustration av den beskrivna mätproceduren.*

Vi mätte först ljudtrycksnivån i sändarrummet där högtalaren var placerad. Sedan mätte vi ljudtrycksnivån i mottagarrummet för att se vad de produkter som vi ville testa hade för inverkan på minskningen av ljudtrycksnivån i mottagarrummet jämfört med sändarrummet. Detta är nödvändigt att veta för att kunna beräkna *SPI*, enligt *ekvation 3.5*.

Högtalaren och mikrofonen var kopplade till en dator med ett program som kunde beräkna ljudtrycksnivån i sändarrummet respektive i mottagarrummet när mikrofonen hade mätt *vitt brus* som hade sänts i 21 sekunder från högtalaren. När vi genomförde alla planerade tester analyserade vi erhållna resultat med hjälp av programmet Excel.

## 4 Analys

### 4.1 Laborationsresultat

Frekvens	<u>Undertak: <math>LD(f)</math> i ekvation 3.4</u>					$L_S(f)$ i ekvation 3.4	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>
	Konkur. produkt **	Focus A	Ecophons nya produkt	Våtpr. skiva 2x13 mm	Focus A + Våtpr. skiva 1x13mm **		$L_N(f)$ i lab. **	$L_N(f)$ enligt Bradleys och Govers rapport	$L_N(f)$ för kontorsrum enligt mätning i fält **
160	27,6	20,4	28,2	29,5	28,4	44,3	27,1	53,3	34
200	30,6	20,4	32,1	30,6	30,9	49,0	21,3	51,7	32
250	28,2	17,2	28,8	26,7	27,7	53,0	18,3	50,0	31
315	30,5	15,7	30,1	29,7	27,2	51,3	15,2	48,3	31
400	38,1	18,8	38,0	36,1	32,3	54,4	15,6	46,7	24
500	41,3	22,6	46,5	43,3	39,7	56,7	16,1	45,0	22
630	45,8	19,5	51,2	47,1	44,6	54,7	15,0	43,3	27
800	50,6	22,8	57,4	50,9	51,8	51,6	15,1	41,7	22
1000	52,6	24,7	60,2	53,4	57,1	50,1	12,6	40,0	20
1250	58,5	26,8	60,2	54,9	60,5	51,1	12,0	38,3	19
1600	61,3	26,7	59,0	55,9	59,3	49,1	11,1	36,7	18
2000	60,9	27,7	54,8	54,1	55,0	44,6	9,2	35,0	17
2500	55,7	30,6	51,3	52,6	52,1	43,9	10,0	33,3	17
3150	54,1	33,4	54,7	54,8	55,3	43,5	10,6	31,7	16
4000	59,1	33,7	56,5	55,1	57,4	42,6	10,5	30,0	12
5000	61,1	35,0	58,3	57,6	60,4	39,1	10,4	28,3	11
<b>Medel</b>	<b>47,3</b>	<b>24,8</b>	<b>48,0</b>	<b>45,8</b>	<b>46,2</b>	<b>48,7</b>	<b>14,4</b>	<b>40,8</b>	<b>22,1</b>
							<b><u>Vägd ljudtrycksnivå i dBA</u></b>		
							<b>24,0</b>	<b>51,5</b>	<b>32,5</b>

\*\* Mätningar gjorda av Erling Nilsson.

Tabell 5.1: Uppmätta värden för  $L_S$  och  $L_N$  samt beräknade värden för  $LD(f)$ . Beräkning av den vägd ljudtrycksnivån gjordes enligt metod beskriven i boken Grundläggande akustik.

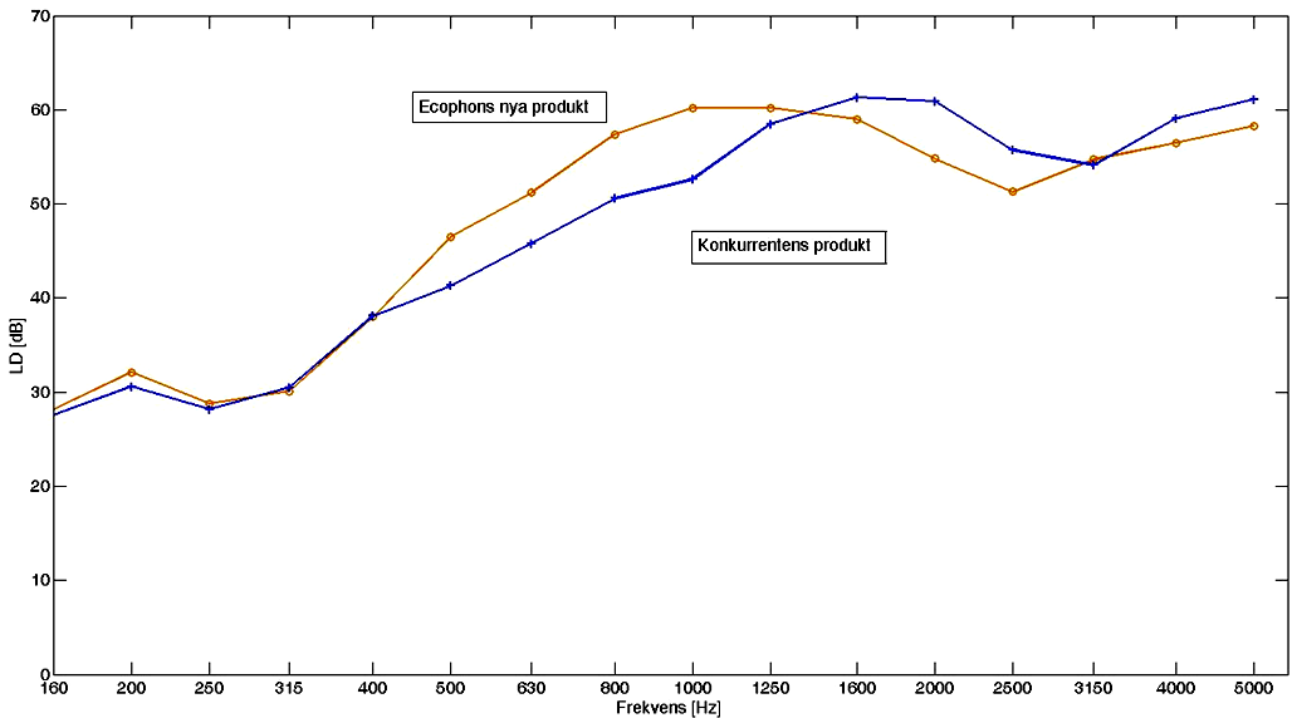
#### 4.1.1 SPI från $LD(f)$

$SPI$  beräknas sedan enligt ekvation 3.5 och vi erhåller följande resultat:

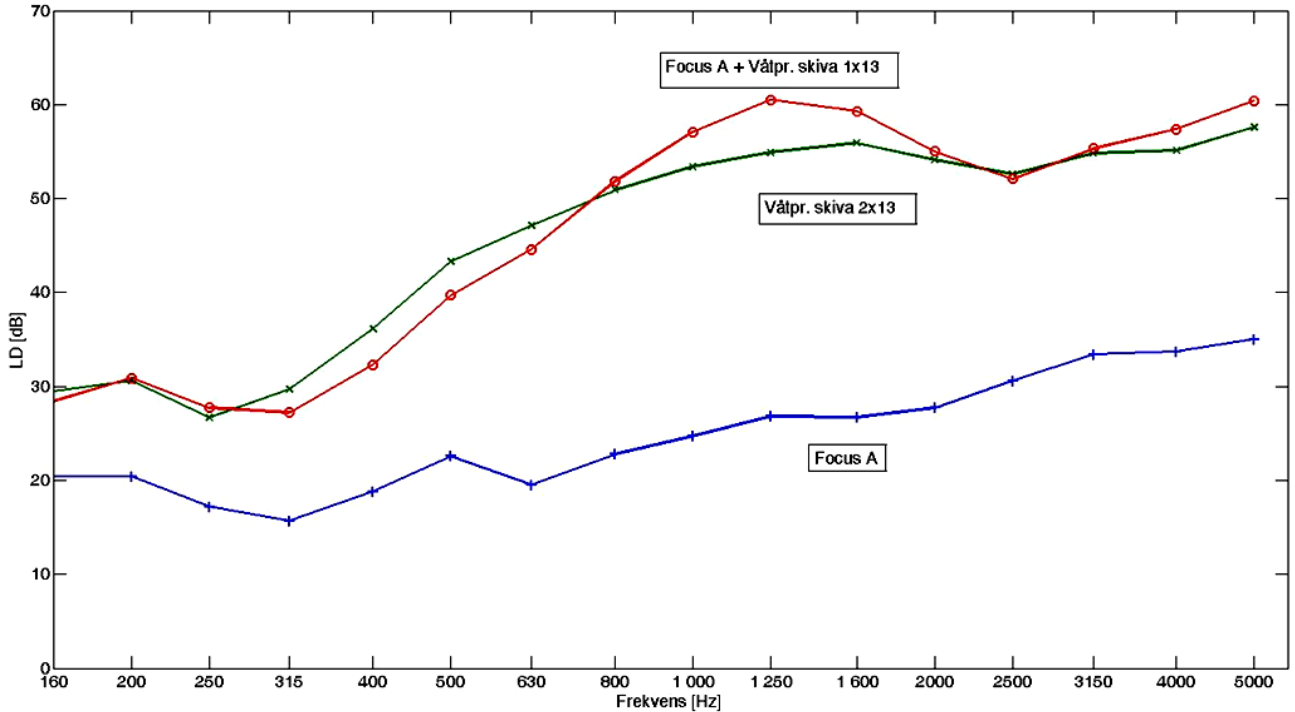
$L_N$ enligt	<u><math>SPI</math></u>				
	Konkur. produkt	Focus A	Ecophons nya produkt	Våtpr. skiva 2x13 mm	Focus A + Våtpr. skiva 1x13mm
<b>A</b>	-12,9	9,6	-13,7	-11,5	-11,9
<b>B</b>	-39,4	-16,9	-40,1	-37,9	-38,4
<b>C</b>	-20,6	1,9	-21,3	-19,1	-19,6

Tabell 5.2: Beräknade  $SPI$ -värden enligt  $L_N$  från a, b, c från Tabell 5.1.

#### 4.1.2 Grafer på $LD(f)$



Figur 4.1: Graf för jämförelse av  $LD(f)$  för Ecophons nya produkt och konkurrentens produkt.



Figur 4.2: Graf för jämförelse av  $LD(f)$  för Ecophons Focus A, Våtpr. skiva 2x13 och Focus A + Våtpr. skiva 13.



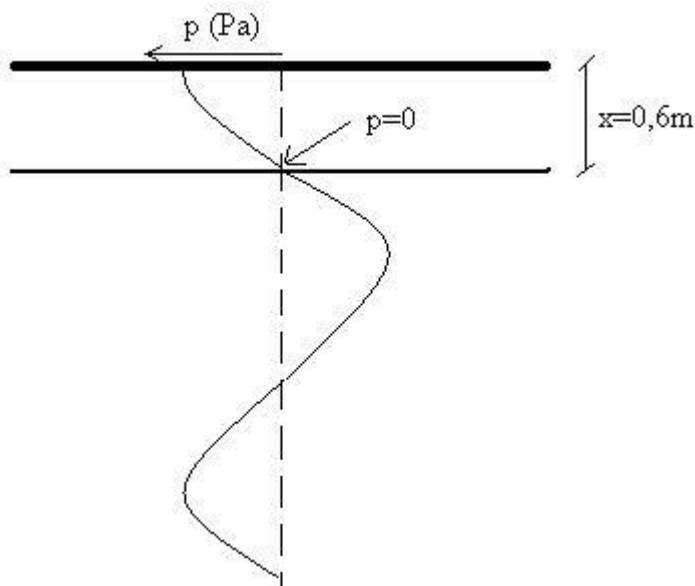
## 4.2 Analys av undertakets påverkan på resultatet

### 4.2.1 Förstärkning av absorption i undertaket

När en ljudvåg faller vinkelrät mot det absorberande och ljudisolerande undertaket kommer det vid vissa frekvenser uppstå en förstärkning av absorptionen som gör att  $LD(f)$ -kurvan för dessa frekvenser kommer att få en topp. Detta uppstår pga. att molekyler i luften har störst rörelse när ljudtrycket är noll. När molekyler i luften har störst rörelse blir friktionen störst och ljudenergi övergår då som mest till värmeenergi i absorbenten. Det första tillfället då ljudtrycket är noll när ljudvågen passerar absorbenten är vid en fjärdedelsvåglängd dvs.  $\lambda/4$  (Ljud i byggnad och samhälle, 2011). De frekvenser för vilka absorptionen blir som störst, kan beräknas enligt följande ekvation:

$$f = \frac{c}{4x} \cdot (1 + 2n) \quad (4.1)$$

Där  $f$  är frekvensen,  $c$  är ljudets utbredningshastighet för luft,  $x$  är luftspaltens bredd och  $n$  är heltal t.ex. 0, 1, 2, 3... osv.



$$f = \frac{340}{4 \cdot 0,6} \cdot (1 + 2 \cdot 0) = 142 \text{ Hz}$$

Första frekvensen där absorptionen blir som störst är vid 142 Hz, nästa är vid 425 Hz, och sedan 708 Hz osv.

Vid ungefär ovan nämnda frekvenser borde det synas en mindre topp i  $LD(f)$ -kurvan vilket beror på att absorptionen blir större vid dessa frekvenser och medför större ljudtrycksnivåskillnad mellan sändarrummet och

mottagarrummet. Men graferna i *figur 4.1* och *4.2* går inte lägre än 160 Hz då dessa värden ska användas för att beräkna *SPI* och därför syns inte den lägsta toppen. En förklaring till att övriga toppar inte syns är pga. att ljudvågor inte endast faller vinkelrätt in mot undertaket. Detta gör att absorptionens förstärkning blir diffus och jämnar ut sig.

#### 4.2.2 Resonansfrekvens för undertaket

Vi vill undersöka när resonansfrekvens för undertaket inträffar för att se om den har någon inverkan på våra *LD(f)*-grafer. Detta görs med hjälp av *formel 2.2* som beskrivs under rubriken *Resonansabsorbenter*.

Ytvikt i *formel 2.2* beräknas enligt följande formel:

$$M'' = \rho \cdot h \quad (4.2)$$

Materialbenämning	Tjocklek <i>h</i> [m]	Densitet $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Ytvikt <i>M''</i> [kg/m <sup>2</sup> ]
Focus A (glasull)	0,02	55	1,1
Våtpressat material	0,013	237	3,081
Konkurrentens produkt (stenull)	0,05	180	9

*Tabell 4.1: densitet, tjocklek och ytvikt på de olika undertaksmaterialen.*

$$f_0 \approx 60 \sqrt{\frac{1}{M''d}} = 60 \cdot \sqrt{\frac{1}{(0,02 \cdot 55 + 0,013 \cdot 237) \cdot 0,6}} = 38 \text{ Hz}$$

Eftersom resonansfrekvensen inträffar vid så låga frekvenser utgör den ingen påverkan på våra *LD(f)*-grafer då dessa inte täcker frekvenser under 160 Hz. Att resonansfrekvensen inträffar så tidigt visar att undertaket är bra ur akustisk synvinkel.

#### 4.2.3 Undertakets koincidensfrekvens

Koincidensfenomenet är inte lämpligt att undersöka för det undertak som vi testar då koincidens inträffar när ett material har högre böjstyvhets än vad våra undertaksmaterial har, enligt Erling Nilsson. Eftersom material som Focus A av glasull och det våtpressade materialet inte har någon betydande böjstyvhets kommer inte koincidensfenomenet att kunna inträffa och således kan vi inte beräkna den.

### 4.3 Analys av skiljeväggens inverkan på resultatet

#### 4.3.1 Skiljeväggens koincidensfrekvens (kritisk frekvens)

Enligt tidigare förklarade begrepp och teorier kan koincidensfenomenet medföra en försämrad ljudisolerande förmåga för en vägg eller ett ljudisolerande undertak. Inverkan av koincidens på våra  $LD(f)$ -grafer skall därför undersökas i detta avsnitt. Den lägsta frekvens för vilket koincidens kan inträffa kallas för kritisk frekvens och det är den som är väsentlig att undersöka i detta sammanhang eftersom andra koincidensfrekvenser ligger utanför vårt begränsade frekvensområde. Formeln för beräkning av kritisk frekvens följer nedan:

$$f_c = \frac{K}{h} \quad (4.3)$$

Där  $f_c$  är kritisk frekvens som anges i Hz,  $K$  är en materialkonstant dvs. ”koincidenstal” som anges i m/s och  $h$  är väggens tjocklek i m (Ljud i Byggnad och Samhälle, 2011). Eftersom skiljeväggen i laboratoriet är en dubbelvägg med två olimnade gipsskivor på vardera sidan går det att anta att den fungerar som en vägg med endast en gipsskiva enligt akustikspecialist Erling Nilsson på Ecophon.  $K$  för gips är 32 m/s och  $h$  är 0,013 m.

$$f_c = \frac{K}{h} = \frac{32}{0,013} = 2462 \text{ Hz}$$

Den kritiska frekvensen för skiljeväggen förväntas inträffa vid ca 2460 Hz enligt beräkningen.

På våra  $LD(f)$  grafer märks tydligt att den kritiska frekvensen inträffar vid frekvensområdet kring 2500 Hz vilket då försämrar  $LD(f)$ -värdet och således även  $SPI$ -värdet för frekvenser kring 2500 Hz.

Att dippen i  $LD(f)$ -graferna vid ca 2500 Hz beror just på väggens koincidens bevisar även Ecophons laborationsmätningar i Holland. Ecophon har nämligen sitt bästa laboratorium i Holland där de mäter och undersöker absorptionsdata för olika produkter. Skiljeväggen i laboratoriet i Holland är mycket bättre ur akustisk synpunkt än i laboratoriet som vi använde oss av på Ecophon i Hyllinge. Därför är  $LD(f)$ -grafer som grundar sig på laborationsmätningar i Holland fria från någon dipp vid ca 2500 Hz. Skiljeväggen är så bra ur akustisk synpunkt att koincidens inte inträffar inom frekvensområdet som är intressant att testa såsom mänskligt tal mellan 160 Hz till 5000 Hz (Nilsson, 2011).

### 4.3.2 Skiljeväggens resonansfrekvens

När det gäller skiljeväggens resonansfrekvens skulle den också kunna påverka våra  $LD(f)$ -grafer negativt om resonansen skulle inträffa för någon frekvens som ligger i frekvensområdet som vi undersöker. Därför undersöks detta för att se när resonans inträffar. Formeln för beräkning av resonansfrekvens för en dubbelvägg följer nedan:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot (M''_1 + M''_2)}{M''_1 \cdot M''_2 \cdot d_2}} \approx 60 \sqrt{\frac{M''_1 + M''_2}{M''_1 \cdot M''_2 \cdot d_2}} \quad (4.4)$$

Där  $c_0$  är ljudets utbredningshastighet i luft, 340 m/s,  $\rho_0$  är luftens densitet, 1,21 kg/m<sup>3</sup>,  $d_2$  är avståndet mellan gipsskivornas innersida på 0,2 m,  $M''_1$  är gipsskivornas ytvikt på ena sidan skiljeväggen och  $M''_2$  är gipsskivornas ytvikt på andra sidan skiljeväggen (Vigran, 2002).

Ytvikten beräknas enligt *formel 4.2* där  $\rho$  är materialets densitet, för gips ca 700 kg/m<sup>3</sup> och  $h$  är materialets tjocklek, 0,026 m för två gipsskivor.

$$M''_1 = 700 \cdot 0,026 = 18,2 \text{ kg/m}^2$$
$$M''_1 = M''_2$$

$$f = 60 \sqrt{\frac{18,2 + 18,2}{18,2 \cdot 18,2 \cdot 0,2}} = 44,5 \text{ Hz}$$

Skiljeväggens resonansfrekvens inträffar för så låg frekvens som 44,5 Hz vilket gör att den inte påverkar våra  $LD(f)$ -grafer då dessa inte tar hänsyn till frekvenser lägre än 160 Hz.

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion om genomförandet

#### 5.1.1 Mätmetoden

Mätningarna som genomfördes baserades på den metod som är beskriven i Bradleys och Govers rapport om *SPI*. Denna finns beskriven ovan under rubriken *Mätning och beräkning av SPI enligt standard*. Vi har dock gjort ett par saker annorlunda och inte hållit oss helt till den beskrivna standardmätningen: (a) vi har inte flyttat på högtalaren i sändarrummet, (b) vi har använt oss av tre mikrofonpositioner i sändarrummet och inte av minst fyra positioner, (c) vi har använt oss av tre mikrofonpositioner i mottagarrummet och inte försökt identifiera ljudläckor före mätningar och (d) mikrofonens avstånd från väggen eller andra reflekterande ytor var i vissa positioner mindre än 1 m och därmed inte enligt standard.

Anledningen till att vår mätmetod har skilt sig från standard är för det första på grund av rummens storlek och geometriska form. Då de båda ska föreställa kontorsrum är de små i både yta och volym. Detta innebär att ifall vi skulle ha försökt uppfylla kravet på avståndet mellan en reflekterande yta och mikrofonen i mottagarrummet så skulle vi inte kunnat uppfylla kravet på avståndet mellan mikrofonen och ljudkällan, dvs. högtalaren. Då vi även hade en högtalare som skickade ut ljud i alla riktningar, och dessutom rum med så små volymer, ansåg vi att det inte skulle göra någon betydelsefull skillnad att flytta på högtalaren.

Vad gäller att identifiera ljudläckor före mätningar så gjorde vi inte detta då vårt syfte med detta arbete skiljer sig från den beskrivna standardmetodens syfte. I standardmetoden utförs mätningar för att kontrollera talsäkerheten i ett rum. Den talsäkerhet som syftas på är ett skydd mot tjuvlyssnare så att ingen i ett intilliggande rum ska kunna höra vad som sägs på t.ex. ett sekretessbelagt möte. Vårt mål har inte varit detta, utan endast att minska störningen som kan upplevas p.g.a. tal från ett intilliggande rum och *SPI* är ett utmärkt mått för att uppnå detta. Därför har vi valt de positioner som vi använde oss av då vi ansåg att dessa passade in på det syftet. Dessa positioner är där personer kan tänkas befinna sig och prata.

#### 5.1.2 Laborationsuppsättningen

Alla krav som ställs enligt standardmetod för *SPI*-mätning vad gäller mätutrustning och laboratorium uppfylldes. Förutom det så håller skiljeväggen en mycket god standard vad gäller ljudisolering. Väggen har ett vägt reduktionstal på 56 dB, vilket är minst 10 dB större än undertaket reduktionstal. Enligt akustikspecialist Erling Nilsson på Ecophon innebär detta

att det mesta av ljudet som transmitteras mellan rummen går via undertaket. Således innebär detta att våra mätresultat är tillförlitliga för vårt arbete.

### 5.1.3 Genomförandets påverkan på våra resultat

För att jämma ut den påverkan som stående vågor och interferens kan ha haft på mätvärdena i vår mätning, mätte vi på flera punkter i rummen för att få ett medelvärde för hela rummet.

Då vi gjort tre mätningar per test för att få ett medelvärde för varje term i *ekvation 3.5* och dessa mätvärden hade en liten spridning innebär detta att våra resultat är noggranna. På Ecophon har det gjorts ett flertal tester enligt denna metod för att beräkna *Dnf* för ett flertal undertak. Resultatet av dessa tester finns i *Appendix*, där det i grafen syns att repeterbarhet för denna metod är väldigt god.

## 5.2 Diskussion om laborationsresultaten

### 5.2.1 *SPI* och produkternas inverkan på talavskildhet

I tabellen för beräknad *SPI* under rubriken *Resultat* syns tydligt att Ecophons nya produkt har bäst värde. I fallande ordning följer sedan: (2) konkurrentens produkt, (3) Focus A + *Våtpressad skiva 1x13*, (4) *Våtpressad skiva 2x13* och (5) Focus A.

*Tabell 5.2* visar att...

... *SPI* beräknat med det bakgrundsljud som fanns i laboratoriet är så dåligt i samtliga fall att minst ett ord är begripligt vid tal, enligt *tabell 2.1*. Då endast Focus A används, är talet fullt begripligt.

... *SPI* beräknat med det bakgrundsljud som anges i Bradleys och Govers rapport är så pass bra att tal är knappt hörbart förutom för Focus A då minst ett ord är begripligt.

... då vi använder värden på bakgrundsnivån som Erling Nilsson har uppmätt i kontorsmiljö hamnar *SPI*, för alla produktkombinationer förutom för den enskilda Focus A skivan, nära hörbarhetsgränsen för tonfall och rytm – dvs. ”mummel”. Detta är bra men på en arbetsplats kan vi ändå bli störda av mummel i bakgrunden då vår hjärna automatiskt försöker tolka detta.

Bakgrundsljudet som anges i Bradleys och Govers rapport är väldigt högt och mycket högre än det uppmätta i laboratoriet. Detta gör att det beräknade *SPI* värdet med det bakgrundsljud som de anger är överskattat. Men bakgrundsljudet som vi hade i laboratoriet är så pass lågt att det är sovrumslikt, vilket å andra sidan ger en underskattning av den inverkan som produkterna har på *SPI*. Då vi använder värden på bakgrundsnivån som Erling Nilsson har uppmätt i kontorsmiljö får vi ett mera realistiskt *SPI* och ett

rimligare sådant för att kunna bedöma produkternas inverkan på det ljud som transmitteras från mottagarrummet till sändarrummet. Detta bakgrundsljud är dock uppmätt för ett tyst fläktbatter. I bullrigare miljöer blir *SPI* givetvis bättre och i praktiken ligger sanningen någonstans mellan det sämsta och det bästa värdet som vi har fått på *SPI* för varje produktkombination.

### 5.2.2 $LD(f)$ och produkternas prestation

Genom att endast titta på  $LD(f)$  för varje produktkombination observeras dess inverkan på talavskildheten utan att det tas hänsyn till bakgrundsljudet. För att kunna göra en noggrann bedömning av produktkombinationernas påverkan på transmission av tal från sändarrummet till mottagarrummet, bör därför deras prestation i olika frekvenser granskas. Detta syns i *figur 4.1* och *figur 4.2*.

I *figur 4.2* syns den skillnad antalet lager av ljudisolering (material med högre densitet) och ljudabsorbenter (poröst material) gör på  $LD(f)$ . Jämförs kombinationen *Våtpressad skiva 2x13* med kombinationen *Focus A + Våtpressad skiva 1x13*, presterar de ungefär lika. Dock skiljer de sig åt för olika frekvenser. *Focus A + Våtpressad skiva 1x13* presterar lite bättre än *Våtpressad skiva 2x13* för högre frekvenser och vice versa. Detta beror på att *Focus A* är en porös absorbent som fungerar bäst för högre frekvenser, medan den våtpressade skivan har en högre densitet och blockerar ljudvågor med lägre frekvenser bättre.

Jämförs ytvikten för de olika produkterna och produktkombinationerna enligt densiteten som anges i *tabell 4.1* ger detta att konkurrentens produkt har störst ytvikt på  $9 \text{ kg/m}^2$ . I fallande ordning följer sedan: (2) *Ecophons* nya produkt, (3) *Våtpressad skiva 2x13*, (4) *Focus A + Våtpressad skiva 1x13* och (5) *Focus A*. Detta skiljer sig från den rangordning de har vad gäller deras inverkan på *SPI* enligt rubriken *SPI och produkternas inverkan på talavskildheten*. Densiteten för materialet är således inte det viktigaste för valet av material men spelar ändå en stor roll.

Observera att i *figur 4.1* presterar *Ecophons* nya produkt bättre än konkurrentens produkt i frekvensområdet 400 – 1250 Hz. För lägre frekvenser än 400 Hz presterar de båda produkterna i stort sett likadant. För frekvenser högre än 1250 Hz presterar konkurrentens produkt bättre.

I alla grafer bortsett från *Focus A* och konkurrentens produkt, faller  $LD(f)$  för frekvensen 2500 Hz. För konkurrentens produkt faller  $LD(f)$  istället för 3150 Hz. Detta har vi visat beror på fenomenet koincidens som är direkt kopplat till materialets böjstyvhet, ytvikt och frekvens.

Våra mätvärden och grafer anger skillnaden i  $LD(f)$  då vi använder oss av olika undertaksmaterial vilket beskriver de olika materialens påverkan på ljudöverföringen mellan rummen. Dock påverkas  $LD(f)$  inte enbart av absorbenterna och ljudisoleringen. Även andra komponenter i rummet har en stor påverkan på  $LD(f)$ : (i) skiljeväggs ljudisolering och konstruktion, (ii) flanktransmission via golvet och flankerande väggar, (iii) transmission av ljud via fönster och (iv) fenomenen interferens, koincidens och resonans. I fält skulle även transmission räknas med pga. otätheter eller ljudöverföring via ventilationsdon och andra installationer mellan rummen som t.ex. rör för radiatorer mellan rum och elektriska installationer såsom eluttag, internetuttag osv.

### 5.2.3 Skillnaden mellan $R$ , $D_{nf}$ och $LD(f)$

$R$  och  $D_{nf}$  beräknas enligt *formel 3.1*. Denna tar hänsyn till absorptionen av ljud i rummet med hjälp av efterklangstid genom en korrektion ( $+10 \cdot \log\left(\frac{S}{A_M}\right)$ ) så att ett reduktionsstal fås som beskriver endast väggens eller undertakets reduktionsförmåga.

Vi använder dock inte  $R$  och  $D_{nf}$  då vi vill att absorptionen ska påverka resultaten. Istället använder vi därför  $LD(f)$  som inte har en sådan korrektion och tar därför hänsyn till absorptionen, vilket är väldigt passande för vårt arbete då ett delmål i arbetet är just att undersöka absorptionsmaterialets påverkan på talavskildheten mellan rummen.

Vi tar dock upp  $R$  och  $D_{nf}$  för att läsaren ska få en uppfattning om hur det vanligtvis görs en uppskattning av reduktionsförmågan för en vägg eller ett undertak samt hur vår metod skiljer sig från detta.

### 5.2.4 Skillnaden mellan $SPI$ och $LD(f)$

Det är viktigt att förstå skillnaden mellan  $SPI$  och  $LD(f)$ .  $SPI$  är plats- specifik och anger inte enbart hur det enskilda systemet påverkar talavskildheten, utan tar även hänsyn till det bakgrundsljud som finns på platsen där mätningarna äger rum.  $LD(f)$  är system- specifikt och anger hur systemet överför ljud från det ena rummet till det andra, dvs. gäller det för systemet takabsorbent + ljudisolering i undertaket + skiljevägg + ovan utrymme. Dock kan vi säga att det mesta av ljudet överförs via undertaket enligt resonemang under rubriken *Laborationsuppsättningen*.



## 6 Slutsats

Syftet med arbetet har uppfyllts och vi har fått pålitliga värden som vi har kunnat använda oss av för att räkna fram *SPI*. Med hjälp av *SPI* och *LD(f)* kan vi nu bestämma den påverkan som takabsorbenter och ljudisolering i undertaket har på talavskildheten mellan rum.

I *tabell 5.2* syns tydligt att antalet lager undertaksmaterial gör skillnad. Det som också gör skillnad är vad för material används i undertaket, detta syns vid jämförelse av *Våtpressad skiva 2x13* med kombinationen Focus A + *Våtpressad skiva 1x13*. Då fås ett bättre *SPI* med den senare kombinationen.

Den testade produkten från Ecophon hade bättre *SPI*-värde än övriga produkter, inklusive konkurrentens produkt som redan är etablerad på marknaden. *LD(f)* och de grafer som har presenterats i *figur 4.1* och *figur 4.2* visar dock att varje produkt har ett särskilt frekvensområde där den är effektivare än en annan produkt i samma graf.

Våra undersökningar har visat att ljudisolering i undertaket är effektivare för lägre frekvenser medan takabsorbenterna är effektivare för högre frekvenser. Kombinationen av dessa är dock det mest effektiva och det bör eftersträvas en balans mellan dem vad gäller deras inverkan på *SPI*.



## 7 Litteraturförteckning

Delphine Bard (2011) *Building Acoustics*, kompendium.

J.S. Bradley & B.N. Gover (2006), *Designing and Assessing the Architectural Speech Security of Meeting Rooms and Offices*, National Research Council Canada.

Erling Nilsson, Ann-Charlotte Johansson, Jonas Brunskog, Lars-Göran Sjökvist, Dag Holmberg (2008) *Grundläggande Akustik*, KFS i Lund.

Ecophon (Ecophon), *God ljudmiljö i det moderna kontoret*,  
< [http://ecophon.se/Documents/16.Sverige/Broschyer/Ladda\\_ner/Kontorsbroschyr\\_110117\\_2.pdf](http://ecophon.se/Documents/16.Sverige/Broschyer/Ladda_ner/Kontorsbroschyr_110117_2.pdf) > (2011-05-17)

Föreläsningar och kompendium i kursen *Ljud i Byggnad och Samhälle* på LTH av Kristian Stålné år 2011.  
<[http://www.akustik.lth.se/utbildning/kurser/vta\\_f01%2C\\_ljud\\_i\\_byggnad\\_och\\_samhaelle/](http://www.akustik.lth.se/utbildning/kurser/vta_f01%2C_ljud_i_byggnad_och_samhaelle/)> (2011-05-27)

Leif Åkerlöf (2001), *Byggnadsakustik, en praktisk handbok*, Svensk Byggtjänst.

Handledning med Erling Nilsson den 25e Maj 2011, akustikspecialist på Ecophon.

Tor Erik Vigran (2002), *Byggnadsakustik*, Tapir Akademisk förlag, 7005 Trondheim.



## 8 Appendix

### 8.1 A1 – Testernas repeterbarhet

Frequency (Hz)	case 44	case 44	case 42	case 42	case 54	case 54
100	24,03	23,1	23,1	23,7	23,0	23,8
125	23,58	23,9	24,3	23,6	24,0	24,2
160	26,02	25,4	25,4	25,3	26,2	27,7
200	26,76	26,3	26,4	26,6	29,8	30,7
250	22,40	22,0	21,1	22,6	26,0	26,1
315	22,00	22,5	21,1	21,5	25,9	29,2
400	29,56	28,5	27,8	27,7	33,3	33,1
500	34,91	34,9	32,7	32,9	40,8	41,4
630	37,82	35,9	32,6	32,9	43,4	45,1
800	41,34	41,8	37,0	36,7	50,2	50,2
1000	45,98	46,5	41,0	40,5	54,5	55,0
1250	50,98	50,7	44,2	42,5	59,2	60,2
1600	52,96	53,8	45,5	44,6	62,0	62,2
2000	54,03	53,3	48,4	47,1	57,8	58,5
2500	53,51	52,5	49,9	49,1	54,9	54,7
3150	57,16	57,1	54,1	53,6	57,9	56,9
4000	58,59	59,0	55,6	56,7	58,7	58,7
5000	59,75	59,9	58,2	57,3	60,3	59,7

