



LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Lunds universitet

Teknisk akustik

GRUNDLÄGGANDE AKUSTIK

E Nilsson
A-C Johansson
J Brunskog
L-G Sjökvist
D Holmberg

Lund, januari 2005
TVBA-3116
Tredje upplagan



LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Lunds universitet

Teknisk akustik

GRUNDLÄGGANDE AKUSTIK

E Nilsson
A-C Johansson
J Brunskog
L-G Sjökvist
D Holmberg

Lund, januari 2005
TVBA-3116
Tredje upplagan
(Första upplagan 2002)

1 ALLMÄNT OM BULLER	5
1.1 Inledning	5
1.2 Kursinnehåll	6
1.3 Introducerande exempel	7
1.4 Bullrets effekt på människan.....	9
1.4.1 Hörselskador.....	9
1.4.2 Effekter på talkommunikation, prestation och inläring.....	10
1.4.3 Effekter på sömn	10
1.4.4 Psykosociala och medicinska effekter.....	11
1.5 Riktvärden och rekommendationer	12
1.5.1 Lagstiftning	12
1.6 Exempel på föreskrifter och råd angående buller	13
1.7 Övningsuppgifter.....	15
 2 HUR BESKRIVER VI LJUD?	 16
2.1 Inledning	16
2.2 Vad är ljud?	16
2.3 Objektiva mått.....	16
2.3.1 Ljudets utbredning.....	16
2.3.2 Ljudets frekvens	18
2.3.3 Ljudets styrka	20
2.3.4 Ljudets våglängd	21
2.3.5 Tid - Rum	22
2.3.6 Tid - Frekvens	22
2.3.7 Oktavband – Tersband.....	23
2.4 Örat och hörseln	25
2.4.1 Örat.....	25
2.4.2 Hörseln	26
2.4.3 Tal.....	28
2.5 Subjektiva mått.....	29
2.6 Övningsuppgifter.....	33
 3 GEOMETRISK AVSTÅNDSBEROENDE – HUR SPRIDER SIG LJUD?	 35
3.1 Inledning	35
3.2 Ljudutbredning i frifält.....	35
3.2.1 Beskrivning av ett experiment, frifält.....	35
3.2.2 Effekt och intensitet.....	37
3.2.3 Sfärisk källa.....	38
3.2.4 Andra källor.....	40
3.3 Ljudutbredning utomhus	42
3.3.1 Vind.....	42
3.3.2 Temperatur	43
3.4 Fler än en källa.....	43
3.4.1 Fas	44
3.4.2 Addition av ljudtryck.....	45
3.4.3 Ton eller brus?.....	47
3.4.4 Två sfäriska källor	48
3.5 Vad händer om man för in begränsningsytor?	49
3.5.1 Interferens i markplanet och andra plana ytor.....	49

3.5.2	Diffraktion	52
3.5.3	Bullerskärmar	53
3.6	Ljudutbredning i rum	54
3.6.1	Beskrivning av experiment, i rum	54
3.6.2	Hur sprider sig ljud - i rum?	55
3.7	Övningsuppgifter.....	56
4	LJUDISOLERING	57
4.1	Ljudisolering - Introduktion	57
4.2	Ljudisoleringsklasser.....	58
4.3	Inledande demonstration	59
4.4	Luftljudsisolering	60
4.4.1	Transmission och reflektion	60
4.4.2	Reduktionstal	60
4.4.3	Mätning av luftljudsisolering	60
4.4.4	Beräkning av ensiffervärden	62
4.4.5	Bestämning av luftljudsisolering enligt norm	62
4.5	Stegljudsisolering.....	65
4.5.1	Mätning av stegljudsisolering	65
4.5.2	Bestämning av stegljudsisolering enligt norm	66
4.6	Enkelväggar och dubbelväggar	68
4.6.1	Principiellt beteende för en enkelvägg	68
4.6.2	Principiellt beteende för en dubbelvägg.....	71
4.7	Flanktransmission	74
4.8	Fasadisolering, sammansatt reduktionstal	79
4.8.1	Sammansatt reduktionstal.....	79
4.8.2	Tätning av fönster.....	79
4.8.3	Ventilationskanaler, dörrar	81
4.9	Springläckage.....	81
4.10	Övningsuppgifter.....	83
5	ABSORPTION OCH AKUSTIKREGLERING	85
5.1	Inledning	85
5.2	Energi och efterklangstid	85
5.3	Akustikreglering.....	89
5.4	Moder och stående vågor	93
5.5	Transmissionens inverkan.....	96
5.6	Ljudabsorbenter.....	96
5.6.1	Porösa absorbenter	96
5.6.2	Resonansabsorbenter	98
5.7	Strålgång	100
5.8	Övningsuppgifter.....	102
6	BILAGA 1, UTDRAK UR SS 02 52 67.....	103
7	REPETITIONSFRÅGOR.....	105
7.1	Kapitel 1	105
7.2	Kapitel 2	105
7.3	Kapitel 3	106

7.4 Kapitel 4	106
7.5 Kapitel 5	108
8 SVAR OCH LÖSNINGAR.....	109
9 INDEX	116

1 ALLMÄNT OM BULLER

1.1 INLEDNING

Buller¹ i vår omgivning på våra arbetsplatser och i våra bostäder upplevs av många människor som ett av de mest störande och stressande inslagen i vårt samhälle. Att höga ljudnivåer kan ge hörselskador är många medvetna om och att det är viktigt att skydda hörseln i bullriga miljöer för att undvika bestående hörselskador. Mindre känt och undersökt är de psykosociala och medicinska effekterna av att t.ex. ständigt arbeta i en bullrig miljö även om ljudnivåerna ligger en bra bit under vad som anses ge upphov till hörselskador. Buller brukar definitionsmässigt beskrivas som oönskat ljud. Den störande effekten av buller är svår att mäta eftersom störningsgraden är en subjektiv reaktion och varierar från individ till individ. Beroende på inställning till bullersituationen, hälsotillstånd mm kan störningsgraden bedömas helt olika. En hel del erfarenhet finns när det gäller samband mellan störning och bullerexponering från väg- tåg- och flygtrafik och även i viss mån från skjutfält och industri. En rad undersökningar har också visa bullrets effekt på sömn, talkommunikation och inlärning. Vi återkommer till detta lite längre fram i texten.

Utvecklingen av det moderna samhället har lett till att antalet bullerexponerade människor ständigt ökar. Även om bullerproblem möjligen ses som ett modernt fenomen knutet till ett hektiskt storstadsliv så uppmärksammades bullrets negativa effekter redan på medeltiden. I vissa städer i det medeltida Europa förbjöds vagn- och hästtransporter genom städerna för att värna om invånarnas goda nattsömn. I dagens Europa beräknas minst 25 % av EU:s befolkning påverkas av buller i sådan omfattning att det påverkar hälsa och livskvalitet. I Europeiska gemenskapens sjätte miljöhandlingsprogram² formuleras som mål *att minska det antal personer som regelbundet påverkas av varaktigt höga bullernivåer (uppskattningsvis 100 miljoner år 2000) med ca 10% till 2010 och med ca 20 % till 2020.*

Buller som ett globalt hälsoproblem har också uppmärksammats av världshälsoorganisationen WHO³. I deras informationsblad från februari 2001 påpekas bl.a. att hälften av Europas invånare lever i bullriga miljöer och en tredjedel upplever sömnstörningar pga. buller. I USA var 1990 ca 30 miljoner människor under arbetstid utsatta för bullernivåer över 85 dB(A) jämfört med ca 9 miljoner 1981. I Tyskland är ca 12-15% av den arbetsföra befolkningen exponerade för bullernivåer över 85 dB(A). Att under en arbetsdag (8 timmar) vistas i bullernivåer över 85 dB(A) innebär risk för bestående hörselskador. En konsekvens av en hörselnedsättning är svårigheten att uppfatta tal vilket också innebär ett allvarligt socialt handikapp. Långvarig påverkan av höga bullernivåer innebär inte bara en risk för hörselskada utan kan också medföra andra medicinska åkommor såsom t.ex. högt blodtryck.

Medvetenheten om bullrets skadliga inverkan har ökat men samtidigt motverkas ibland bullerbegränsningar av utvecklingens krav på kostnadseffektiva lösningar. Så kan t.ex. krav på högre prestanda hos olika motorer, fläktar mm leda till att varvtalen ökas vilket oftast leder till högre bullernivåer. För att begränsa bullret i samhället och för att minska dess störande inverkan finns en rad myndigheter och organisationer som ger ut råd och föreskrifter angående buller. Riktvärden och rekommendationer ges ofta i form av bullernivåer som inte ska överskridas och som krav på ljudisolering.

¹ Beskrivs ibland som oönskat ljud.

² Europeiska Gemenskapernas Kommission, Sjätte miljöhandlingsprogrammet, 2001/0029 (COD)

³ WHO Information, Occupational and Community Noise, Fact Sheet Nr 258, Feb 2001

1.2 KURSINNEHÅLL

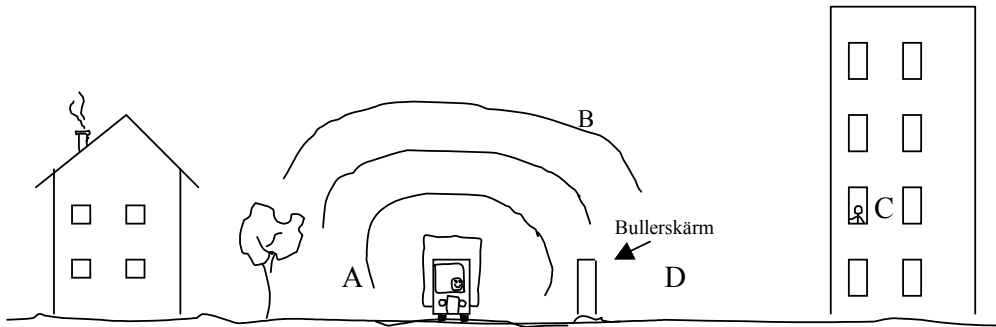
För att kunna analysera och åtgärda bullerproblem på ett effektivt sätt krävs kunskaper i akustik. Akustik är namnet på den vetenskap som omfattar ljudets beteende i olika medier. Syftet med den här kursen är att ge en introduktion till ämnet med inriktning mot att förstå hur bullerproblem kan analyseras och åtgärdas. Efter detta inledande kapitel om bullrets effekter på människan och något om riktvärden och rekommendationer för att begränsa bullrets negativa effekter kommer vi i kapitel 2 att gå igenom några grundläggande begrepp inom akustiken och hur dessa kan användas för att beskriva olika ljudkällor. Kapitel 3 behandlar ljudutbredning dvs. vad som händer med ljudet på vägen mellan ljudkällan och mottagaren. Inverkan av avstånd mellan källan och mottagaren, reflekterande ytor, väderförhållanden mm. diskuteras. För att förhindra bullrets utbredning och för att skapa en god boendemiljö utan störande buller är de grundläggande principerna bakom ljudisolering värdefulla att känna till. I många fall är de ljudisolering åtgärderna dimensionerade för en byggnad. Att försumma ljudisoleringen i en projektering kan kosta mycket i slutändan. Ljudisoleringen behandlas i kapitel 4 och detta kapitel får anses som centralt för kursen. Det är inte alltid som det primära målet är att eliminera buller. Ibland är det möjligheten att åstadkomma en god akustisk miljö för ett speciellt ändamål som är i centrum. Det kan vara att skapa goda förhållanden för inlärning i ett klassrum eller att anpassa akustiken för så bra musikåtergivning som möjligt. En vanlig metod för att reglera akustiken i ett rum är att använda ljudabsorberande material. Principerna bakom ljudabsorption och akustikreglering diskuteras i det avslutande 5:e kapitlet. Varje kapitel avslutas med en antal övningsexempel. Under föreläsningarna kommer demonstrationer att genomföras i syfte att förtydliga innehållet i kursen.

Målsättningen med kursen är att deltagarna efter genomförandet ska

- ha kännedom om bullrets effekt på människan och något om de riktvärden som finns för att begränsa bullrets skadliga och störande inverkan.
- förstå grundläggande akustiska begrepp och känna till hur ljud mäts och analyseras.
- förstå grundläggande principer för ljudisolering och hur god ljudisolering åstadkoms.
- förstå grundläggande principer för ljudutbredning och ljudabsorption.

1.3 INTRODUCERANDE EXEMPEL

Vi börjar med att studera den bullersituation som illustreras i Figur 1. Bullret från biltrafiken sprider sig till ett närliggande bostadsområde. Mellan vägen och bostadsområdet finns en bullerskärm. Ljudets förändring mellan de olika positionerna A till D kommer att demonstreras med ljudexempel under föreläsningen.



Figur 1

Utgående från situationen i Figur 1 ska vi nu kortfattat exemplifiera innehållet i kursen. Ljudkällan i det här fallet utgörs av biltrafiken. För att kvantifiera bullret mäts vanligtvis ljudtrycksnivån som är ett logaritmiskt mått. Ljudtrycksnivån brukar betecknas med L och anges i dB (decibel). När det gäller biltrafiken varierar förstås ljudnivån med hur tätt bilarna kommer. För att hantera detta görs en medelvärdesbildning av ljudenergin över tiden tillräckligt länge för att erhålla ett representativt värde. Detta värde benämns ekvivalent ljudnivå med beteckningen L_{eq} och anges också i dB. Örats känslighet är olika för olika frekvenser. För att ta hänsyn till detta brukar ljudnivåmätarna förses med ett filter ett s.k. A-filter som efterliknar denna egenskap hos hörseln. En ljudtrycksnivå mätt med detta filter brukar benämnas A-vägd ljudtrycksnivå och anges i dB(A). Sättet att beteckna A-vägd ljudtrycksnivå kan variera men ett vanligt skrivsätt är L_A . Den A-vägd ljudtrycksnivå ger ett värde som svarar mot det totala ljudinnehållet i ett buller. Ingen information ges om hur ljudenergin fördelas över olika frekvenser. Två bilar kan mycket väl ge samma ljudtrycksnivå men låta helt olika. För att få en uppfattning om ljudets karaktär och hur ljudenergin fördelas över olika frekvenser mäter man upp ett ljudspektrum. Ett ljudspektrum visar vanligen ljudtrycksnivån som funktion av frekvensen. Genom ljudspektrats utseende får man en viss uppfattning om ljudets karaktär. Ljudet från en lastbil t.ex. är oftast mer lågfrekvent än ljudet från en personbil.

När ljudet utbreder sig från ett fordon kommer ljudenergin att fördela sig över allt större yta. Detta innebär att ljudtrycksnivån avtar med ökande avstånd från fordonet, s.k. geometrisk avståndsdämpning. Om ljudet fördelar sig halvsfäriskt över ljudkällan kommer ljudtrycksnivån att avta med 6 dB för varje avståndsfördubbling från källan. Om t.ex. ljudnivån på 10 meters avstånd från fordonet är 80 dB kommer nivån att vara 74 dB på 20 meters avstånd och 68 dB på 40 meters avstånd osv.

Under sin färd mot mottagaren, i detta fall personen som sitter i huset vid position C i Figur 1, kommer ljudet att påverkas av en rad faktorer som påverkar ljudtrycksnivån. Förutom av den geometriska avståndsdämpningen inverkar:

- vindriktningen och temperaturens variation med höjden över marken
- förekomst av reflekterande ytor såsom bullerskärmar, husfasader etc.
- markytans beskaffenhet

Det sista hindret innan ljudet kommer in i bostaden utgörs av husfasaden. Det är därför viktigt att fasaden har tillräcklig ljudisolering så att bullret från trafiken inte stör inomhus. I de flesta fall är det fönstren och eventuella friskluftsinsläpp som är den svaga länken i fasaden. Dimensionerande krav för fasadens ljudisolering är i regel att sömnen inte ska störas pga. trafikbullret. God ljudisolering kräver ofta höga krav på monteringen. Otätheter i en fasad kan vara förödande och sabotera ljudisoleringen i en i övrigt bra fasad.

När ljudet tagit sig igenom fasaden och kommer in i bostaden uppstår en något annorlunda situation än den utomhus. Ljudet är nu omgärdat av väggar, golv och tak som reflekterar ljudet fram och tillbaka. När ljudet rör sig i ett begränsat område kan resonanta fenomen uppkomma vilket betyder att vissa ljudkomponenter (frekvenser) i bullret kommer att höras starkare. Vilka dessa ljudkomponenter är bestäms väsentligen av rummets dimensioner men i regel märks dessa resonanser främst i det lågfrekventa området (basljud). Ljudet kommer också att påverkas av inredningen. Mycket porösa material i rummet som soffor, fätöljer etc. absorberar ljud och kommer att bidra till att ljudtrycksnivån sänks.

När trafikbullret når personen i fätöljen i Figur 1 har det alltså förändrats på vägen. Inte bara ljudtrycksnivån har förändrats utan även den spektrala uppbyggnaden av ljudet har ändrat utseende. Detta beror på att många av de faktorer som påverkar ljudet under utbredningen såsom meteorologiska parametrar, markdämpning, bullerskärmar, fasadisolering, ljudabsorptionen i rummet mm påverkar olika frekvenser i bullret olika mycket. Trafikbullret kommer därför att låta annorlunda i bostaden än vid vägen. Eftersom låga frekvenser påverkas något mindre än höga av de nämnda faktorerna kommer trafikbullret att låta mera dovt och lågfrekvent i bostaden än vid vägkanten.

Slutligen når ljudet personens öron. Bullret som utgör små tryckvariationer i luften kommer nu att processas via hörselorganet och generera en ljudsensation i huvudet. Även här sker en omvandling och tolkning av ljudet som skiljer sig från det fysikaliska ljudtryck som ljudnivåmätaren registrerar. Det är därför i regel svårt att finna något entydigt samband mellan de dB-nivåer vi mäter och den subjektiva upplevda störningen av bullret.

1.4 BULLRETS EFFEKT PÅ MÄNNISKAN⁴

Effekter av ljud- och bullerexponering är mycket komplexa och kan bestå av allt från en direkt fysisk skada på hörselorganet till olika typer av reflexer och sekundära reaktioner som uppträder efter tolkning och värdering av ljudet.

1.4.1 Hörselskador

När örat utsätts för höga ljud kan en tillfällig (temporär) eller bestående (permanent) skada uppkomma. Den bestående hörselskadan utvecklar sig successivt under flera års exponering för starka bullernivåer i t.ex. industrin. Också kortvariga, starka ljud, t.ex. skottljud, eller vissa typer av leksaker kan ge en hörselskada som kan utvecklas omedelbart.

Hörselnedsättningen åtföljs mycket ofta av tinnitus (öronsus). Symtomet tinnitus innebär ett ständigt närvarande ljud och upplevs ofta som mycket besvärande. Många bullerskadade lider mer av tinnitus än av själva hörselnedsättningen. I många fall och i synnerhet vid tidiga skador kan tinnitus förekomma utan att personen fått en hörselnedsättning. Tillfällig tinnitus är vanlig vid t.ex. diskotekbesök. I omedelbar anslutning till exponering för höga ljudnivåer från t.ex. musik kan man också få bestående tinnitus⁵.

Temporär hörselnedsättning kan uppkomma vid en ekvivalent ljudnivå av 75 dB(A) efter flera timmars exponering. Kortvariga ljud (< 1 sek) med nivåer över 115 dB(A) kan ge permanent hörselnedsättning. Efter flera års exponering för kontinuerligt buller över 85 dB(A) mer än åtta timmar per dag, mätt som ekvivalentnivå, föreligger risk för hörselskada. Vid nivåer under 75 dB(A) ekvivalentnivå är risken minimal för bestående hörselnedsättning.

Barn utgör en särskild riskgrupp. Hos vuxna innebär resonansen i hörselgången normalt att ljud får en maximal förstärkning vid 2500 Hz. Barn har en kortare och smalare hörselgång. Detta kan innebära att den maximala förstärkningen sker högre upp i diskantområdet där ljud lättare orsakar skada. För att uppnå fullgott skydd även för mindre barn bör ljudnivåerna hållas extra låga.

Musiken på diskotek och pop/rockgalor framförs vid höga ljudnivåer. Ofta är också basfrekvenserna kraftigt förstärkta för att få fram en känsloupplevelse av musiken. Tekniken för högtalaranläggningar har utvecklats så att mycket höga ljudnivåer kan framföras utan att musiken låter sprucken och oren. Flera studier har visat att ljudnivån höjs successivt vid en konsert eller en diskotekafton. Ljudnivån vid rockgalor och i diskotek är många gånger så hög att risk föreligger både för tillfälliga och permanenta hörselnedsättningar och/eller tinnitus. Risken med bärbara stereoanläggningar med hörlurar tycks dock för flertalet vara mindre än man tidigare förmodat. Dessa anläggningar kan dock utsätta användare för både höga ljudnivåer och lång exponeringstid.

⁴ Texten består av valda delar ur Socialstyrelsens allmänna råd om buller inomhus och höga ljudnivåer SOSFS 1996:7 (M).

⁵ Att då och då höra pip eller sus i öronen får betraktas som fullt normalt.

1.4.2 Effekter på talkommunikation, prestation och inläring

Ljud kan påverka uppfattbarheten av tal (talmaskering) genom att ljudnivån överstiger talets. Då ett eller flera viktiga ord maskeras kan den totala informationen bli oförståelig. Buller som har en frekvenssammansättning som sammanfaller med talet, t.ex. trafikbuller, medför större risk för talmaskering. Buller i kombination med lång efterklangstid försämrar taluppfattbarheten ytterligare. Efterklang kan delvis liknas vid bakgrundsbuller - tidigare uttalade talljud eller buller "lever kvar" i rummet och bidrar till maskering av efterföljande ljud.

I situationer där talmaskering förekommer, t.ex. i undervisningslokaler, kompenserar talaren reflexmässigt denna effekt genom att höja rösten, vilket kan medföra stämbandsbesvär. En hög bakgrundsbullernivå, t.ex. i daghem och skollokaler, leder också ofta till förhöjda ljudnivåer totalt genom att de som vistas i lokalen höjer sina röster. Talmaskering kan medföra ökad olycksfallsrisk eftersom instruktioner eller varningsrop inte uppfattas. Svårighet att kommunicera med tal kan leda till minskad social kontakt – särskilt drabbade är personer med hörselnedsättning.

Buller kan leda till negativa effekter på prestation och inläring genom att koncentrationsförmågan och möjligheten att uppfatta tal störs. Effekter av buller på arbetsprestationen blir större ju längre tid arbete i buller pågår, ökad ansträngning kan kortvarigt kompensera bullrets negativa effekter, men i förlängningen uppstår ökad trötthet, nedsatt koncentrationsförmåga och sämre arbetsresultat.

Skolan är en speciell riskmiljö genom att buller stör talkommunikationen mellan lärare och elever och försämrar koncentrationsförmågan. I skollokaler, där avståndet mellan talare och lyssnare oftast är långt, krävs en förhållandevis lägre bullernivå än på andra arbetsplatser eller i bostäder för att uppnå bra taluppfattbarhet. I skolor, daghem och liknande lokaler är det också viktigt att efterklangstiden är kort. Undervisningslokaler kan kräva ljudnivåer ner till 25 dB(A) för att taluppfattbarheten skall vara godtagbar för känsliga grupper.

1.4.3 Effekter på sömn

Ostörd sömn är väsentlig för hälsa och välbefinnande och en förutsättning för att vi skall fungera väl i vårt dagliga liv. Sömnstörningar är därför en av de allvarligaste effekterna av bullerexponering. För den största delen av befolkningen är vägtrafiken den helt dominerande bullerkällan nattetid och utgör därmed den vanligaste externa orsaken till sömnstörningar. Vissa grupper såsom äldre, sjuka och bullerkänsliga personer är känsliga för sömnstörningar på grund av buller. Skiftarbetare är mer utsatta för bullerstörningar under sömnen beroende på att de ofta har sin sömnperiod under dagen då bullernivåerna är högre. Oregelbunden dygnsrytm i sig har också negativ inverkan på sömnen, särskilt för personer över 40-50 år.

Buller ger upphov till effekter både under insomningsfasen och sömnfasen. Detta leder till eftereffekter under dagen. Vissa komponenter i bullret har en starkare störningseffekt på sömnen. Intermittent⁶ buller samt stora skillnader mellan bakgrund och toppnivå medför större risk för sömnstörningar än ett jämnt och regelbundet eller förutsägbart buller.

⁶ Med intermittent buller menas buller där ljudnivån varierar i tiden, t.ex. trafikbuller.

Den allvarligaste konsekvensen av bullerstörningar under sömnen är de kvardröjande effekterna. Försämrad subjektiv sömnkvalitet uppträder efter sömnstörning nattetid och leder till ökad trötthet under dagen och en lägre sinnesstämning. Prestationsförmågan i form av reaktionsförmåga och uppmärksamhet på olika typer av tester försämras också efter nätter med bullerstörd sömn.

Beträffande de nivåer där effekter på sömnen uppträder finns omfattande erfarenheter från såväl laboratorie- som fältförsök. En förlängning av insomningstiden med 7 – 15 minuter hos unga, friska personer har konstaterats vid enstaka bullerhändelser med maximala ljudnivåer på 45 dB(A). En försämrad sömnkvalitet har påvisats vid enstaka bullerhändelser från vägtrafik med maximala ljudnivåer på 45 dB(A) nattetid. Vid ekvivalenta ljudnivåer på ca 30 dB(A) kan sömnstadiet fördelning och subjektiv sömnkvalitet påverkas. Beträffande riskgrupper som äldre eller sjuka personer finns endast mycket begränsad information. Det är troligt att sömnstörningar hos dessa individer uppträder vid lägre nivåer än de ovan givna.

1.4.4 Psykosociala och medicinska effekter

Buller kan ensamt, eller i samverkan med andra belastningsfaktorer, ge upphov till olika slag av psykosociala effekter och symtom. I vissa situationer då buller påverkar aktiviteter, särskilt då individen upplever att han/hon inte kan kontrollera eller påverka bullret, kan aggressiva reaktioner utlösas.

Det allmänna psykosociala välbefinnandet påverkas särskilt när buller påverkar sömnen. Flera undersökningar har påvisat sämre sömn och lägre psykosocialt välbefinnande bland människor vars sovrumsfönster vetter mot en större trafikled. Huvudvärk, trötthet, nervösa magbesvär och nedstämdhet har kunnat knytas till exponering för buller från vägtrafik i boendemiljön.

Man har observerat att plötsliga eller starka ljud kan ge upphov till en tillfällig höjning av hjärtfrekvens och blodtrycksnivå. I arbetsmiljöer har det påvisats att människor som utsatts för mycket starkt buller under lång tid kan få bestående blodtryckshöjningar. I boendemiljö har sådana effekter inte kunnat verifieras. Det finns vissa indikationer, bl.a. i studier av mycket starka ljud från lågflygande militärflygplan, att buller skulle kunna orsaka en lätt blodtryckshöjning bland den närboende befolkningen.

1.5 RIKTVÄRDEN OCH REKOMMENDATIONER

Det finns en rad myndigheter som ger ut föreskrifter och råd angående buller. Några av dessa presenteras i Tabell 1 tillsammans med det verksamhetsområde som berörs.

Myndighet	Verksamhetsområde
Arbetsmiljöverket	Buller i arbetsmiljön
Socialstyrelsen	Buller inomhus som sanitär olägenhet
Statens Naturvårdsverk (SNV)	Buller utomhus (trafik- industribuller mm)
Boverket	Buller och ljudisolering i våra bostäder

Tabell 1 Några myndigheters föreskrifter och råd angående buller

1.5.1 Lagstiftning

När det gäller arbetsmiljön ges de yttre ramarna för vad som gäller i Arbetsmiljölagen. Arbetsmiljöverkets uppgift är att genom föreskrifter och råd, beskrivna i en författningssamling, mer i detalj reglera vad som ska gälla. Med föreskrifter menas i dessa sammanhang bindande regler som ska uppfyllas medan råden innehåller rekommendationer om hur en författning bör tillämpas.

De åtgärder som kan krävas för att undanröja buller som sanitär olägenhet i våra bostäder regleras i hälsoskyddslagen. Med sanitär olägenhet menas en störning som kan vara skadlig för människors hälsa och som inte är ringa. Bedömning om åtgärd skall vidtas mot sanitär olägenhet görs i regel av miljö- och hälsoskyddsnämnderna i kommunerna. Föreskrifter och råd när det gäller buller som sanitär olägenhet ges ut av Socialstyrelsen.

Utformningen av nya byggnader regleras ytterst av plan- och bygglagen. Av byggnadsverksförordningen (94:1215) följer att byggnadsverk ska ha en för ändamålet väl avpassad ljuddämpning, såväl för ljud som alstras inom byggnaden som buller från verksamheter i omgivningen eller från trafiken. I Boverkets byggregler, BBR 99, formuleras råd och föreskrifter vad det gäller ljudisolering i våra bostäder.

För att medverka till utvecklingen av tystare maskiner har man inom den Europeiska Unionen beslutat följande. För att kunna sälja maskiner på den europeiska marknaden måste en tillverkare uppfylla maskindirektivet. Beträffande buller och vibrationer innebär detta att han måste lämna information om buller- och vibrationsnivåer samt konstruera och tillverka maskinerna på ett sådant sätt att nivåerna blir så låga som möjligt. En ordentlig teknisk dokumentation över buller- och vibrationsmätningarna måste också finnas.

1.6 EXEMPEL PÅ FÖRESKRIFTER OCH RÅD ANGÅENDE BULLER

I Arbetsmiljöverkets författningssamling om buller på arbetsplatsen⁷ ges följande föreskrift. *Om bullerexponeringen överstiger värdena i Tabell 2 skall åtgärder vidtas för att minska exponeringen. Orsaken till att bullerexponeringen överskrider gränsvärdena ska utredas och ett tidsplanerat åtgärdsprogram utarbetas och genomföras. Målet skall därvid vara att så långt det är praktiskt möjligt nedbringa exponeringen under värdena i Tabell 2. Åtgärdsprogrammet skall dokumenteras. Dokumentationen skall kunna uppvisas för Arbetsmiljöverket.*

Ljudnivåer över de i Tabell 2 innebär risk för hörselskador.

Ekvivalent ljudnivå under en 8-timmars arbetsdag	85 dB(A)
Maximal ljudnivå (med undantag för impuls ljud)	115 dB(A)
Impulstoppvärde ⁸	140 dB(C)*

* C innebär en vägning av ljudet som tar mer hänsyn till lågfrekvent ljud än A-vägningen

Tabell 2 Arbetsmiljöverkets föreskrift om buller på arbetsplatsen

I socialstyrelsens allmänna råd om buller inomhus och höga ljudnivåer ges används riktvärdena i Tabell 3 för bedömning av sanitär olägenhet inomhus.

Ekvivalent A-vägd ljudtrycksnivå	30 dB(A)
Maximal A-vägd ljudtrycksnivå	35-45 dB(A)

Tabell 3 Socialstyrelsens allmänna råd om buller inomhus

Det högre riktvärdet för maximalt buller, 45 dB(A), är avsett som skydd mot insomningssvårigheter, uppvaknande och eftereffekter av störd sömn samt upprepade påverkan av taluppfattbarheten bland särskilt känsliga grupper. För att bedömas som risk för sanitär olägenhet är det tillräckligt om störningen överskrider riktvärdet några få gånger under t.ex. en natt.

Det lägre riktvärdet för maximalt buller, 35 dB(A), används vid bedömningar av om en upplevd, alltså subjektiv, störning i vissa fall kan bedömas som risk för sanitär olägenhet.

Riktvärdet för ekvivalent ljudnivå, 30 dB(A), avser den tidsperiod som den störande aktiviteten pågår för att skydda mot sömnstörningar, talmaskering och upplevd subjektiv störning.

I Boverkets byggregler BBR 99 ges föreskrifter och råd angående den minimistandard som bör gälla för ljudisolering och bullernivåer i våra bostäder. Hur ljudisolering utvärderas och mäts kommer att behandlas i Kap. 4. Vi kan dock konstatera att kraven på ett tyst boende har ökat och många människor värderar en bra ljudisolering högt. Det finns idag en frivillig ljudklassningsstandard där ljudisoleringskraven är indelade i fyra klasser A, B, C och D. Ljudklass C svarar mot minimikraven i BBR medan A och B svarar mot högre ljudisoleringsstandard. Klass D gäller oftast äldre byggnader där minimikraven av olika

⁷ Arbetarskyddsstyrelsens Författningssamling, AFS 1992:10, Buller

⁸ Sätt att mäta kortvariga ljud

anledningar (t.ex. K-märkning) inte kan uppfyllas. Många byggherrar eftersträvar idag ljudklass B i nybyggnadsprojekt.

När det gäller buller från omgivningen utgör biltrafiken den största bullerkällan, följt av buller från järnvägstrafik och flygbuller. Ca två miljoner svenskar störs eller irriteras av trafikbuller. Riktvärden för ljudnivåer inomhus pga. trafikbuller ges i BBR 99. Högsta tillåtna värden inomhus från trafikbuller enligt BBR framgår av Tabell 4.

Utrymme	Typ av krav	Ljudnivå
Bostadsrum	A-vägd ljudtrycksnivå	30 dB(A)
	Maximal A-vägd ljudtrycksnivå	45 dB(A)
Kök	A-vägd ljudtrycksnivå	35 dB(A)

Tabell 4 Högsta tillåtna ljudnivåer inomhus från trafik enligt BBR 99

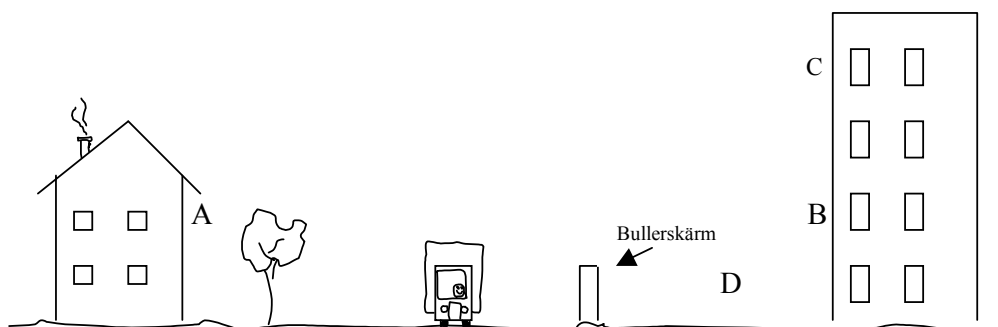
När det gäller buller utomhus från trafik, tåg, industri mm har detta behandlats av Naturvårdsverket (SNV) i ett antal rapporter. Rapporterna omfattar bl.a. beräkningsmodeller för trafik- och tågbuller samt metod för mätning av industribuller. Enligt Naturvårdsverket riktlinjer bör ljudnivån ej överskrida värdena i Tabell 5 vid närmsta bostäder och rekreationsytor i bostäders grannskap. Värdena i Tabell 5 avser nyetablerad verksamhet. Värdena bör dock eftersträvas även för befintlig verksamhet. Naturvårdsverket anger att för befintlig verksamhet kan en höjning med 5 dB(A) godtas, dock ej för momentana ljud nattetid.

Specifikation	Ljudnivå
Dag kl. 07 - 18	50 dB(A)
Kväll kl. 18 – 22 samt söndag och helgdag	45 dB(A)
Natt kl. 22 - 07	40 dB(A)
Om hörbara toner förekommer	Ovanstående ekvivalentnivåer sänkta med 5 dB(A)-enheter
Om ljudet innehåller ofta återkommande impulser såsom vid nitningsarbete, slag i transportörer, lossning av järnskrot etc.	Ovanstående ekvivalentnivåer sänkta med 5 dB(A)-enheter
Momentana ljud natt kl. 22 - 07	55 dB(A)

Tabell 5 Naturvårdsverkets riktlinjer för ljudnivåer utomhus från trafik, tåg, industri mm

1.7 ÖVNINGSUPPGIFTER

1. Hur tror du ljudnivån varierar mellan de olika positionerna A t.o.m. D i figuren? Rangordna A t.o.m. D i ordning högst till lägst ljudnivå. Motivera ordningen.



2. Antag att du står i närheten av en trafikerad väg. Ange ett antal faktorer (minst 7) som påverkar den trafikbullernivå du kommer att utsättas för.
3. Vilket buller i vårt samhälle upplever du själv som mest störande. Ange i rangordning de 3 som du tycker mest störande bullersituationerna. Svara på separat lapp och lämna in lappen för sammanställning.
4. Nämn några myndigheter som utfärdar råd och rekommendationer när det gäller bullerreglering. Ange vad råden och rekommendationerna avser.

2 HUR BESKRIVER VI LJUD?

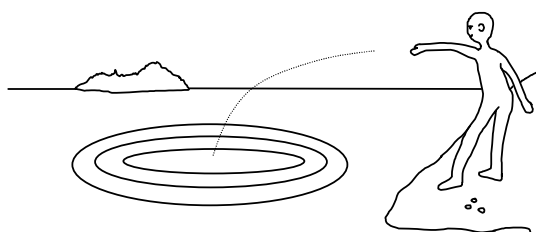
2.1 INLEDNING

Vi utsätts dagligen för en mängd olika sorters ljud. En del är önskade, andra oönskade (buller). I ett hus kan det vara ljud från stereo, installationer såsom fläktar och pumpar, från trafik, grannar etc. När vi ska beskriva och förbättra en ljudmiljö, som till exempel ett klassrum, måste vi ha metoder att objektivt kvantifiera de ljud som finns.

I detta avsnitt kommer vi att gå igenom några verktyg och mått som finns tillhanda. Vi vill ofta veta hur dessa mått förhåller sig till hur ljud uppfattas och därför ingår en kort beskrivning av örats funktion samt hur vi uppfattar ljud. Vi avslutar avsnittet med hur vi på olika detaljnivå kan samla in information om ett ljud. Vi kommer att se att det är viktigt att veta något om ljudets karaktär samt ändamålet för vår beskrivning av ljudet när vi väljer mått.

2.2 VAD ÄR LJUD?

När en sten träffar stillastående vatten ser vi hur cirkulära vågor breder ut sig kring nedslagspunkten. Samtidigt alstras en annan vågrörelse i luften som når våra öron och gör att vi hör vattnet träffas av stenen. Båda dessa vågrörelser liknar varandra då de är svängningsrörelser i ett elastiskt medium och uppstår genom någon slags störning i mediets jämvikt. Vi kan se att vågutbredningen i vattnet består i att vattenytan häver sig och sjunker kring viloläget på de ställen vågen passerar. I luften medför vågen att luftpartiklarna svänger kring sitt jämviktsläge, vilket resulterar i att lufttrycket varierar kring det statiska atmosfärstrycket. För att svängningarna ska finnas måste mediet ha massa och vara elastiskt. De elastiska krafterna försöker återföra partiklarna till ursprungsläget och påverkar samtidigt de omgivande partiklarna så att störningen sprids. Det är följaktligen inte partiklarna som sprider sig från störningsstället till omgivningen utan rörelsen som sprids. När svängningsrörelsen kan uppfattas med hörseln kallas det ljud. Ljud är alltså både det fysikaliska fenomenet svängnings- och vågrörelsen, och den genererade hörförnimmelsen. Vi kommer därför att behandla både det fysikaliska fenomenet och fysiologiska-psykologiska aspekterna. Tyngdpunkten ligger i det förstnämnda men eftersom vårt mesta instrument vid bedömningen av vår ljudmiljö är hörseln, kommer vi att gå igenom något om densamma.

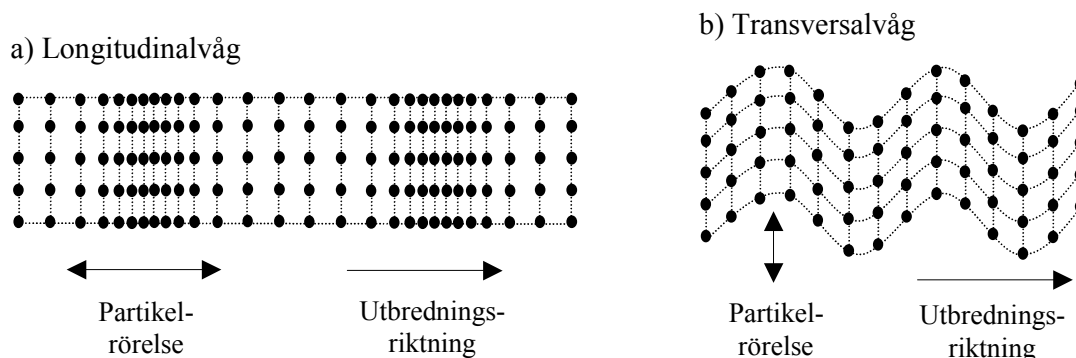


2.3 OBJEKTIVA MÅTT

2.3.1 Ljudets utbredning

Den riktning som störningen sprids vidare till andra partiklar benämns *vågutbredningsriktning*. För vissa vågor, t ex i luft, sker partikelrörelsen i samma riktning som utbredningsriktningen, dessa vågor kallas *longitudinalvågor*, se Figur 2a. För andra vågor sker partikelrörelsen i vinkelrät riktning mot utbredningsriktningen, jämför med vattenvågorna i exemplet ovan. Dessa vågor kallas *transversalvågor*, se Figur 2b. Denna sorts

våg kräver att mediet har en viss skjuvhållfasthet. I luft kan därmed endast longitudinalvågor existera men i fasta kroppar består ljudvågorna ofta av en kombination av longitudinalvågor och transversalvågor.



Figur 2 Partikelrörelse och utbredningsriktning för longitudinalvåg och transversalvåg

Ljudvågorna utbreder sig med en viss *utbredningshastighet* eller *våghastighet*, vilket betyder att det tar en viss tid för ljudet att nå fram till mottagaren. Jämför med åskväder; först ser man blixten, sedan hör man knallen⁹. Om hastigheten hade varit oändligt stor hade ljudet nått mottagaren samtidigt som det skapades i källan, om hastigheten hade varit noll så hade någon ljudutbredning aldrig skett. Hastigheten som ljudet utbreder sig med beror av materialet, och bestäms av mediets styvhetsegenskaper och densitet. Hastigheten är alltså en konstant, vilket innebär att ljudet behåller sin form medan det fortplantar sig, d v s det är samma ljudsignal som når mottagaren som sändes från källan. I Tabell 6 ges ljudets våghastighet för (longitudinell) utbredning i några olika material. Vi betecknar våghastigheten c [m/s].

Material	Ljudhastighet (m/s)
Luft	340
Vatten	1450
Betong	3000
Stål	5100

Tabell 6 Våghastighet

För ideala gaser kan våghastigheten bestämmas som

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}},$$

där P_0 är atmosfärstrycket, $\gamma=1,4$ för tvåatomiga gaser och ρ är densiteten. Densiteten är temperaturberoende, så därför är även våghastigheten temperaturberoende. I de flesta sammanhang kan man bortse från temperaturberoendet, dock inte alltid. För luftens ljudhastighet kan temperaturberoendet beskrivas som

$$c = 331,4\sqrt{1 + \theta/273},$$

där θ är temperaturen i °C.

⁹ Ljuset är också en vågutbredning, men dess utbredningshastighet är mycket snabbare än ljudets.

2.3.2 Ljudets frekvens

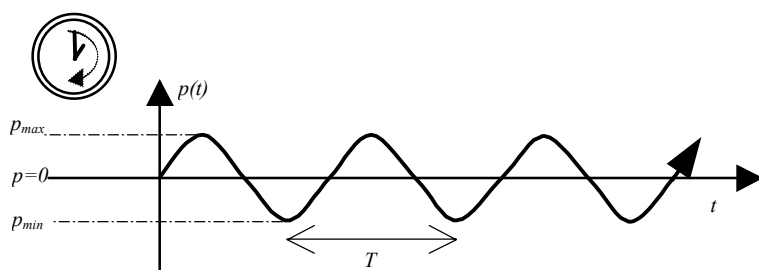
Eftersom vår hörsel är känslig för de tryckvariationer som ljudvågorna orsakar i mediet utgår vi ofta från ljudtrycket när vi ska beskriva ljudvågornas egenskaper. Huruvida en ljudvåg uppfattas som mörk eller ljus är beroende av hur snabbt tryckväxlingarna sker. Tiden för en fullbordad svängning, en period, kallas för *periodtiden*, T , se Figur 3. *Frekvensen*, f , anger antalet perioder per sekund, $f = 1/T$, och har enheten Hertz [$\text{Hz} = 1/\text{s}$]. Ibland används istället *vinkelfrekvensen*, ω , som ges av

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/s]}. \quad (1)$$

Tryckväxlingarna i Figur 3 sker harmoniskt och kan beskrivas med en sinus- eller cosinusfunktion enligt

$$p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \text{ [Pa]} \quad (2)$$

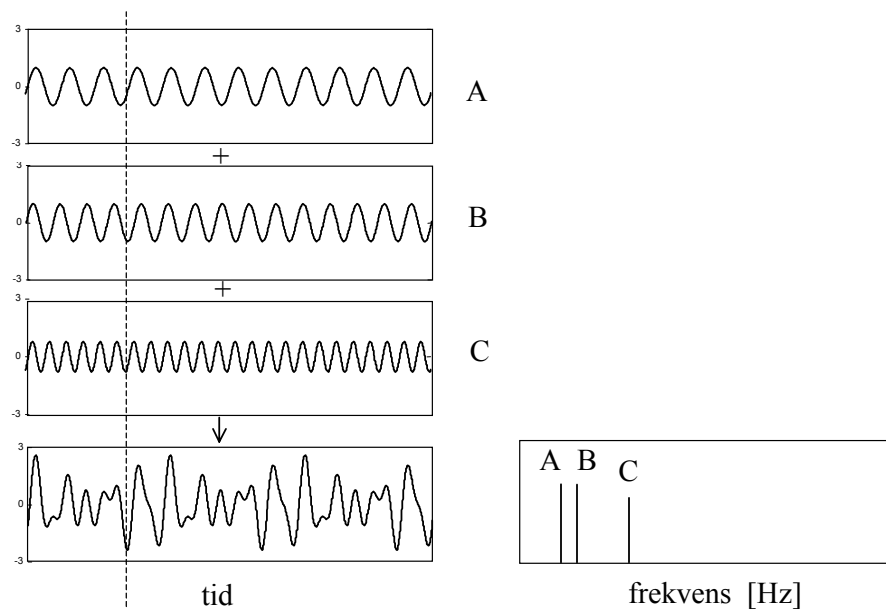
där $p(t)$ är momentanvärdet av trycket [Pa],
 A amplituden [Pa],
 ω vinkelfrekvensen [rad/s],
 t tiden [s] och
 φ anger hur svängningen förhåller sig till tiden noll och kallas svängningens fas.
 (I Figur 3 är fasen noll.)



Figur 3 Tryckväxlingar för en harmonisk signal som funktion av tiden för en longitudinell våg. Periodtiden T svarar mot tiden för en fullständig svängning. (Klockan betonar att tiden går.)

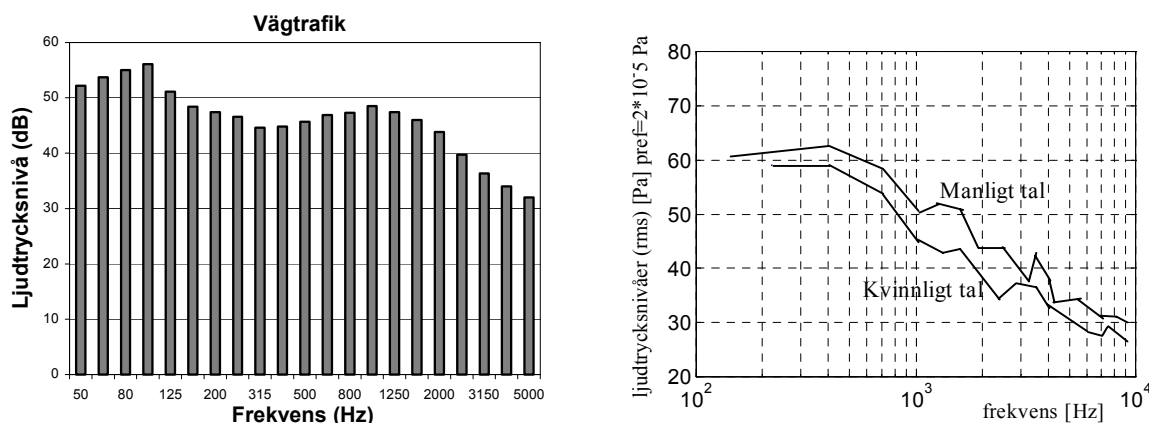
Vid ett ljud med hög frekvens utförs alltså ett större antal ljudväxlingar per sekund jämfört med ett ljud med lägre frekvens. Ett ljud med hög frekvens uppfattas av våra öron som en ljusare ton jämfört med ett ljud med låg frekvens. Vad bör därför hända om ett ljud spelas upp med lägre hastighet än det normala? Jo, svängningarna sker långsammare – med lägre frekvens – och ljudet får en mörkare karaktär.

Med en *ton* avses ett ljud som består av enbart en frekvens. Ett ljud består emellertid sällan av en enskild frekvens, en ton, utan ofta av flera frekvenser. I Figur 4 visas ett exempel på hur ett sammansatt ljud kan beskrivas med hjälp av olika rena toner med varierade frekvenser.



Figur 4 Tre rena toner (frekvenser) adderas och ett sammansatt ljud erhålls. I frekvensled visas de tre tonerna som tre enskilda frekvenskomponenter. På den vertikala axeln visas amplituden av svängningen.

När vi visar vilka frekvenser ett ljud är sammansatt av, görs det i ett *spektrum*, se Figur 5. På den horisontala axeln finns frekvensen och på vertikalaxeln, ljudets amplitud. Ett spektrum ger värdefull information när det gäller att förbättra vår ljudmiljö. Produkter som finns tillhanda för att förbättra ljudmiljön har oftast olika egenskaper vid olika frekvenser och därför är det nödvändigt att veta hur spektrumet ser ut.



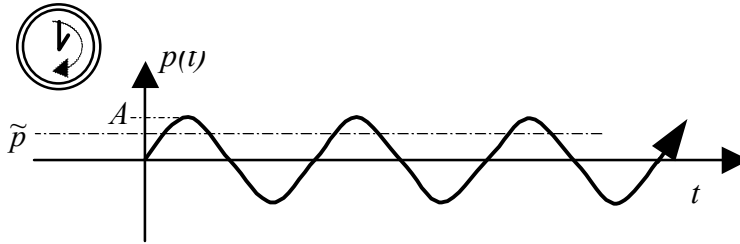
Figur 5 I den vänstra figuren visas ett spektrum över trafikbuller, amplituden är här mätt tersbandsvis (tersband, se avsnitt Oktavband – tersband). I den högra figuren spektrum över manligt och kvinnligt tal vilka redovisas som långtidsmedelvärden mätt tersbandsvis.

2.3.3 Ljudets styrka

I Figur 6 visas återigen trycket som funktion av tiden. Eftersom trycket växlar tecken så att tidsmedelvärdet är noll behövs ett annat mått för att beskriva svängningens styrka. Man har valt att under en viss tid, Δt , bilda variansen hos trycket, vilket svarar mot ett kvadratisk medelvärde. Genom att dra roten ur variansen erhålls standardavvikelsen vilket kallas *effektivvärdet* eller *rms-värdet* (root mean square), $\tilde{p}$, som är ett vanligt mått för att karakterisera ljud.

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} p^2(t) dt} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Rms-värdet blir oberoende av tiden t men istället beroende av t_0 och Δt . Då integrationstiden, Δt , går mot oändligheten går dock rms-värdet mot en konstant, se Figur 6. För en sinussvängning är rms-värdet $\tilde{p} = 1/\sqrt{2} A$.



Figur 6 Ljudtryckets rms-värde, $\tilde{p}$, är konstant d v s oberoende av tiden t .

Spännvidden för de tryckskillnader en människa kan uppfatta är stor, från ca $10 \mu\text{Pa}$ till 60 Pa , vilket innebär att en grafisk presentation av ljudtrycket på en linjär skala är opraktisk. Man införde därför på 1920-talet en mätstorhet som bygger på en logaritmisk skala och ger *ljudtrycksnivån*, L_p , med enheten decibel [dB] definierad enligt följande¹⁰

$$L_p = 10 \log \frac{\tilde{p}^2}{p_{ref}^2} = 20 \log \frac{\tilde{p}}{p_{ref}} \quad [\text{dB}] \quad \Leftrightarrow \quad \tilde{p} = p_{ref} 10^{L_p/20} \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

Med referenstrycket, p_{ref} , blir kvoten sortlös. p_{ref} valdes lika med $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, vilket ungefär motsvarar det lägsta ljudtryck en människa kan uppfatta vid 1000 Hz. Ljudtrycksnivån för de vanligaste ljuden kommer därmed att befinna sig mellan 0 och 120 dB. Mätstorheten dB är emellertid inte alltid så praktisk och har tyvärr lett till många missförstånd, vilket vi kommer att ta upp i avsnittet om subjektiva mått.

Vi ser i ekvation (4) att ljudtrycksnivån beror av ljudtryckets rms-värde. Därmed är ljudtrycksnivån inte ett värde som är direkt kopplat till enbart tiden t . Vi kan dock erhålla ett ljudtryck som varierar med tiden t genom att registrera ljudtrycksnivåerna vid varje tidpunkt t . Vi erhåller då ett glidande medelvärde. Genom att välja integrationstiden, Δt , kortare eller längre kommer ljudtrycksnivån variera snabbare respektive långsammare.

¹⁰ Index p används för att förtydliga att vi avser ljudtrycksnivån, men ofta utesluts p:et.

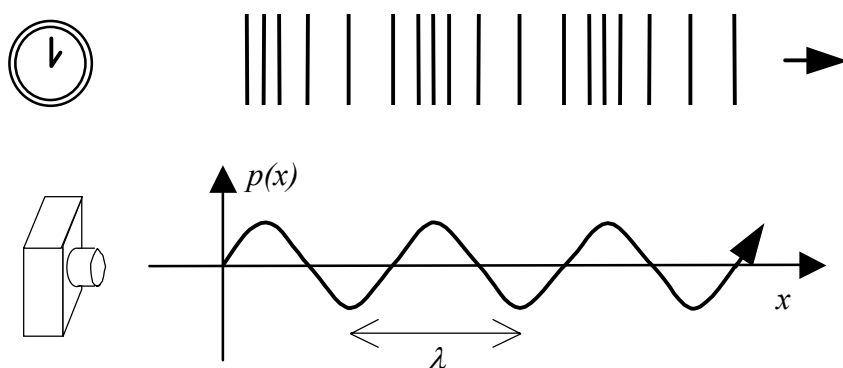
I mätinstrument finns ibland möjligheten att välja hur snabbt mätinstrumentet reagerar för tryckförändringar genom inställningarna ”fast” eller ”slow”. ”Fast” rekommenderas generellt då den inställningen efterliknar örats egenskaper mer än ”slow”. Med inställningen ”slow” kan det ibland vara lättare att avläsa instrumentets värde och används vid mer stationära ljud som till exempel trafikbuller.

2.3.4 Ljudets våglängd

Ljudets *våglängd*, λ , är ett mått på vågornas rumsliga längd och motsvarar periodtiden i tidsled. Våglängden förhåller sig till frekvensen såsom

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

där c är utbredningshastigheten. Vi ser att låga frekvenser har längre våglängd än höga frekvenser. Då utbredningshastigheten i luft är ca 340 m/s, är våglängden för en 10 000 Hz ton 3,4 cm och för en 100 Hz ton 3,4 m. Inom akustiken är det ofta viktigt att jämföra våglängden med storleken på de föremål som finns i det medium som vågorna förs fram i. Ju längre våglängd (lägre frekvens) desto mer måste man ta hänsyn till det som händer vid begränsningsytor. Ofta blir modeller enklare om enbart våglängder som är mycket kortare än mediets dimensioner betraktas, eftersom man då mer korrekt kan bortse från effekter vid begränsningsytor. På samma sätt börjar föremål som är i vägen för ljudvågen att reflektera ljudvågen när λ är i samma storleksordning som föremålet.



Figur 7 Tiden är frusen och vi tänker oss att vi tar en ögonblicksbild. Vågornas utbredning i rummet betraktas. Våglängden för tonen är λ .

Ljudtrycket i rummet kan även beskrivas med sinus eller cosinusfunktioner, jämför ekvation (2).

$$p(x) = A \sin(x 2\pi / \lambda + \varphi) = A \sin(x\omega / c + \varphi) \quad (6)$$

där $p(x)$ är rumsvärdet av trycket tecknas [Pa],
 A amplituden [Pa],
 ω vinkelfrekvensen [rad/s],
 λ våglängden [m],
 c vågutbredningshastigheten och
 φ fasen för ljudvågen.

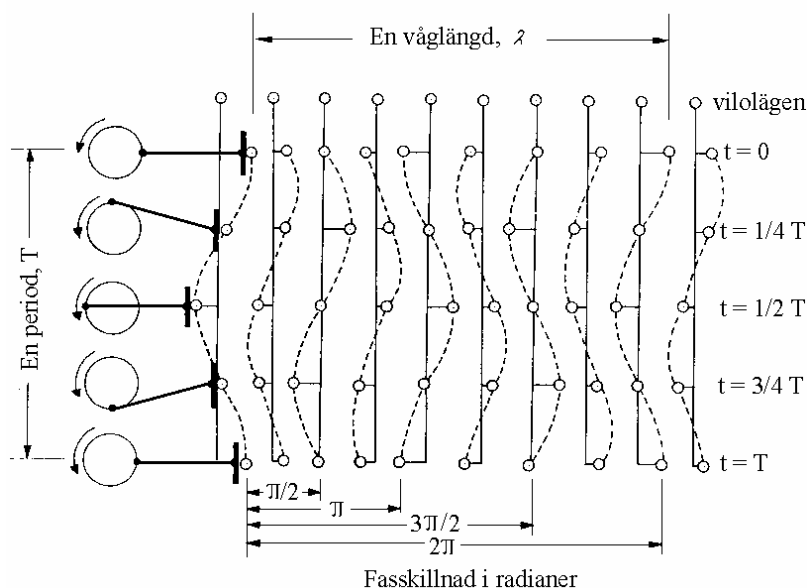
2.3.5 Tid - Rum

Ett ljud kan alltså beskrivas både i tidsled och i rumsled. Vi kan kombinera uttrycken för ljudtrycket som funktion av tiden och rummet, ekvation (2) och (6), och erhåller då

$$p(x,t) = A \sin(\omega t - x\omega/c + \varphi) = A \sin(\omega(t - x/c) + \varphi) \quad (7)$$

vilket är den allmänna lösningen för vågutbredning. Minustecknet framför rumsberoendet krävs för att sinussvängningen skall stämma i rumsled och tidsled (men man kan lika gärna välja tidsberoendet negativt och rumsberoendet positivt).

Figur 8 kan vara ett stöd för att se att en svängning kan beskrivas både som funktion av tiden och av rummet. Där beskrivs luftpartiklars svängningar framför en kolv i horisontell led och dess läge vid olika tidpunkter i vertikal led. Vid längre avstånd från kolven är svängningen tidsförskjuten. Partiklarna befinner sig då inte på samma plats i förhållande till jämviktsläget och/eller har inte samma riktning som partiklarna vid kolven. Denna tidsförskjutning kallas *fasskillnad* och uttrycks i radianer i figuren. På vissa avstånd från kolven svänger partiklarna på samma sätt som vid kolven, de svänger i *fas*. Dessa avstånd utgör våglängden.

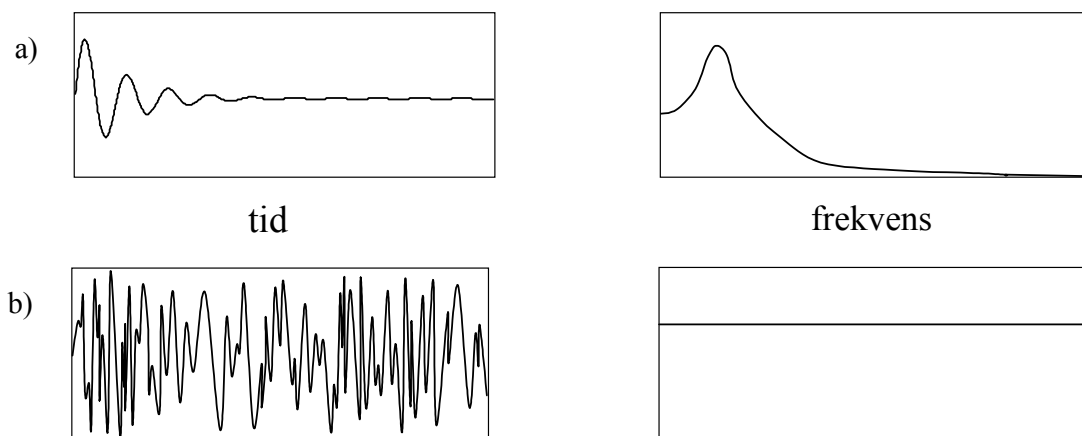


Figur 8 Luftpartiklars svängningar under en period, en våglängd framför en kolv

2.3.6 Tid - Frekvens

Vi har sett att flera frekvenser kan bilda sammansatta ljud, men man kan dessutom visa att alla ljud kan beskrivas med hjälp av frekvensen, dess styrka, samt fasen för varje frekvens. I Figur 4 kan man se att de olika tidssignalerna inte bara har olika frekvens utan de har dessutom olika fas, vid tiden noll har de inte samma position och riktning kring jämviktsläget. Om fasen för en av de rena tonerna ändras kommer en helt annan signal att erhållas, detsamma gäller om styrkan eller frekvensen ändras för en av signalerna. Periodiska signaler kan beskrivas med ett spektrum som består av diskreta frekvenskomponenter, som i Figur 4. Transienta (kortvariga pulser) signaler och stokastiska (slumpmässiga) signaler beskrivs däremot av kontinuerliga spektrum, se Figur 9 a och b.

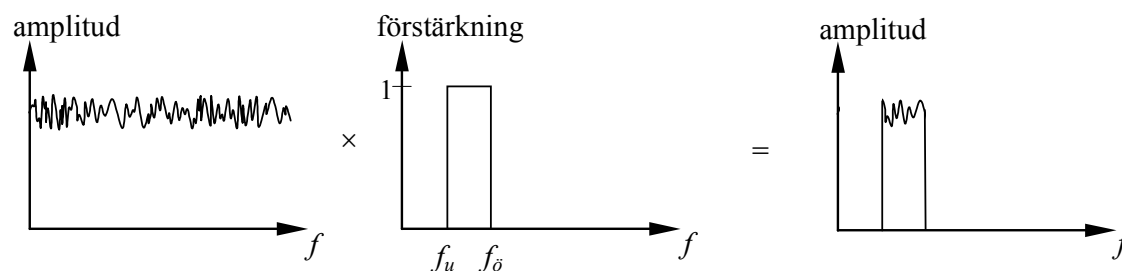
När man vill utföra mätningar i rum eller på konstruktioner med ett statistiskt fördelat ljud så att en bedömning för alla frekvenser kan ske, är *vitt brus* användbart. Vitt brus är ett ljud som är slumpmässigt fördelat över alla frekvenser och vars effektivvärde under mätperioden har samma amplitud vid alla frekvenser, se Figur 9 b. (Momentanvärdet av ljudtrycket är däremot ej konstant.) Om man inte använder en oändligt lång mätperiod blir det inte en exakt rät linje som i Figur 9 b. Det finns metoder att ta hänsyn till detta vilket vi dock inte går in på här.



Figur 9 a) Transient signal b) En rent stokastisk process med oändlig mätperiod ger upphov till ett frekvensspektrum med konstant amplitud, så kallat vitt brus.

2.3.7 Oktavband – Tersband

När vi vill bestämma en viss ljudsignals fördelning över frekvensen sker detta med hjälp av olika *bandfilter*. Dessa filter släpper fram frekvenser mellan en övre och undre gränshfrekvens där förstärkningen är ett eller noll, se Figur 10, och ett värde för området beräknas. Med ett filters *bandbredd*¹¹ avses avståndet mellan den övre och undre gränshfrekvensen. Om man vill ha detaljerade upplysningar om ett spektrum, när man till exempel letar efter rena toner i ljud från en fläkt, används smalbandsfilter. Ofta används konstant bandbredd, t. ex 10 Hz, vid alla frekvenser. I byggnadsakustik används främst *tersbandsfilterna*. För bullermätningar och vid akustikreglering används även de bredare *oktavfilterna*.



Figur 10 En signal filtreras av ett idealt bandpassfilter som släpper fram frekvenser mellan undre gränshfrekvens, f_u , och övre gränshfrekvens f_o , och en signal med bandbredden $= f_o - f_u$ erhålls.

¹¹ I ett brett band får man plats med många frekvenskomponenter, och därmed mycket information – därav termen bredband inom IT.

Begreppet *oktav* förekommer även inom musiken och 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 filternas geometriska mittfrekvens, f_m . Mittfrekvensen används som beteckning för varje filter. Följande gäller för de två typerna av filter:

	Oktavbandsfilter	Tersbandsfilter
Mittfrekvens, f_m	$f_m = \sqrt{f_u f_{\bar{o}}}$	$f_m = \sqrt{f_u f_{\bar{o}}}$
Undre gränshfrekvens, f_u	$f_u = f_m / \sqrt{2}$	$f_u = f_m / \sqrt[6]{2}$
Övre gränshfrekvens, $f_{\bar{o}}$	$f_{\bar{o}} = \sqrt{2} f_m$	$f_{\bar{o}} = \sqrt[6]{2} f_m$
Bandbredd, $B = f_{\bar{o}} - f_u$	$B = (\sqrt{2} - 1/\sqrt{2}) f_m$	$B = (\sqrt[6]{2} - 1/\sqrt[6]{2}) f_m$

Tabell 7 Definition av oktav- och tersbandsfilter.

De olika banden ansluter till varandra så att hela frekvensområdet täcks kontinuerligt. Det lägsta tersbandet som används vid ljudisoleringsmätningar är 50 Hz med bandbredd 11,5 Hz. Det högsta bandet har mittfrekvens 5000 Hz med bandbredd 1150 Hz. Vid bullermätningar i oktavband används vanligen 63 Hz-oktaven och upp till 4000 Hz-oktaven. I tabellen nedan visas delar av de standardiserade mittfrekvenserna samt övre och undre gränshfrekvens för ters- och oktavbandsfilter.

Mittfrekvens f_m (Hz)	Tersfilter $f_u - f_{\bar{o}}$ (Hz)	Oktavfilter $f_u - f_{\bar{o}}$ (Hz)	Mittfrekvens f_m (Hz)	Tersfilter $f_u - f_{\bar{o}}$ (Hz)	Oktavfilter $f_u - f_{\bar{o}}$ (Hz)
50	44,7 – 56,2		800	708 – 891	
63	56,2 – 70,8	44,7 – 89,1	1000	891 – 1120	708 – 1410
80	70,8 – 89,1		1250	1120 – 1410	
100	89,1 – 112		1600	1410 – 1780	
125	112 – 141	89,1 – 178	2000	1780 – 2240	1410 – 2820
160	141 – 178		2500	2240 – 2820	
200	178 – 224		3150	2820 – 3550	
250	224 – 282	178 – 355	4000	3550 – 4470	2820 – 5620
315	282 – 355		5000	4470 – 5620	
400	355 – 447		6300	5620 – 7080	
500	447 – 562	355 – 708	8000	7080 – 8910	5620 – 11200
630	562 – 708		10000	8910 – 11200	

Tabell 8 Standardiserade mittfrekvenser. Fetade mittfrekvenser anger oktavbandens mittfrekvenser.

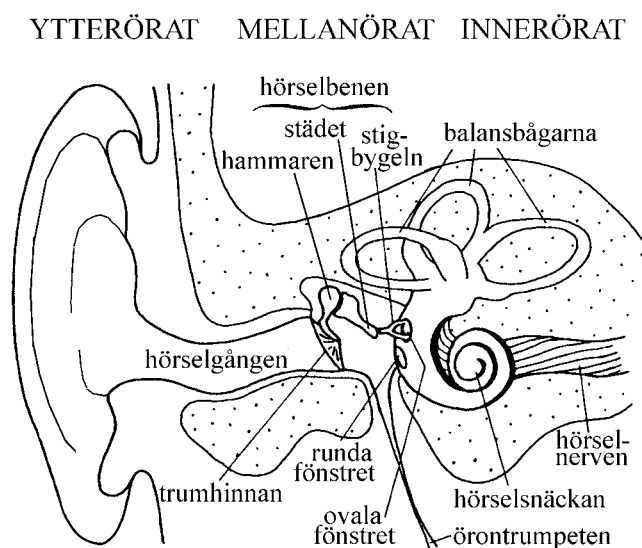
I avsnittet Tid – frekvens talade vi om vitt brus vars effektivvärde under mätperioden har samma amplitud vid alla frekvenser. Vid ters-/oktavbandsmätningar används ibland *rosa brus* vilket istället innehåller samma mängd ljudenergi i alla band.

2.4 ÖRAT OCH HÖRSELN

Vårt hörselorgan är ett känsligt system och forskning pågår för att förstå mekanismerna som styr hur vi uppfattar ljud. Bättre förståelse kring hur ljudet uppfattas kan bland annat leda till bättre hjälpmedel för hörselskadade. Ett alltjämt ökande intresse för dessa mekanismer finns dessutom inom produktindustrin. Det handlar till exempel inom bilindustrin inte bara om att sänka motorns ljudnivå utan även om att det rätta klicket ska uppkomma när dörrar stängs och när knappar vrids. Produktens ljudkvalité har blivit ett konkurrensmedel. Liknande trend kan skönjas inom byggindustrin, exempelvis inom golvindustrin.

2.4.1 Örat

Figur 11 visar en skiss på örats uppbyggnad. En indelning brukar ske i yttöra, mellanöra och inneröra.



Figur 11 Örats uppbyggnad

Ytterörat innefattar öronmusslan, hörselgången och trumhinnan. Öronmusslan är viktig för vår förmåga att uppfatta varifrån ett ljud kommer. Hörselgångens längd på ca 25 mm och form medför att vi är extra känsliga för ljud med frekvenser kring 3-4 kHz då ett resonansfenomen uppstår. Trumhinnan är mycket känslig och sätts i svängning av ljud. Den minsta svängningen av trumhinnan som vi uppfattar är ca 10^{-11} m vid 3-4 kHz, vilket är något mindre än en vätemolekyls diameter!

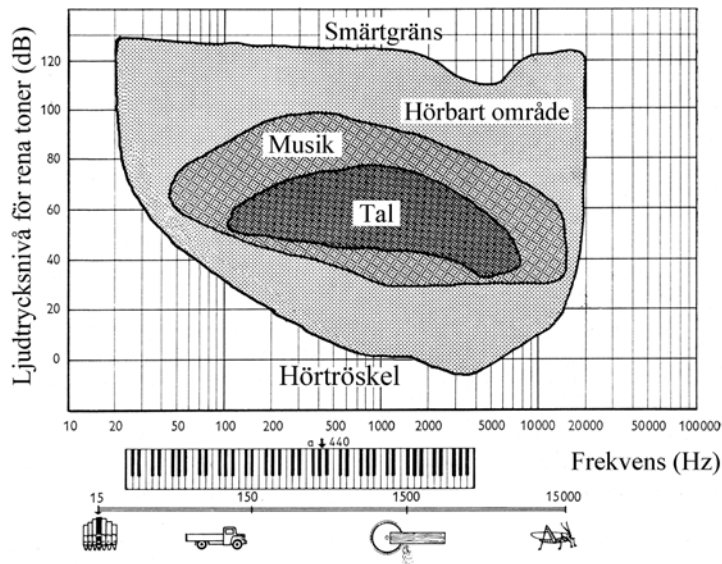
I mellanörat finns de tre hörselbenen; hammaren, städet och stigbygeln, som för vidare trumhinnans svängningar till det ovala fönstret. Genom hävstångsteknik och att arean för det ovala fönstret är mindre än trumhinnans area förstärks signalen. Man läser ibland att hörselbenen kan ha en hörselskyddande effekt då deras rörelseegenskaper ändras så att förstärkningen minskas. Detta gäller dock enbart för stationära ljud över ca 70 dB. Effekten är mycket liten och erhålls inte vid impulsljud då hörselbenens förändring i rörelseegenskaper sker långsamt. Hörselskydd kan alltså inte ersättas av denna effekt.

I innerörat omvandlas de mekaniska svängningarna till nervimpulser. Omvandlingen äger rum i hörselsnäckan. Hörselsnäckans spiral har en total längd av ca 32 mm. Den innehåller två vätskefyllda kanaler. I skiljeväggen mellan dessa kanaler finns det s.k. basilarmembranet. När örat exciteras med ljud inom det hörbara frekvensområdet sker en deformation av basilarmembranet vilket stimulerar de närliggande hårcellerna som sänder signalen vidare till hjärnan via hörselnerven. Basilarmembranet har varierande tjocklek och bredd och beroende på det inkommande ljudets frekvens deformeras därmed olika delar av basilarmembranet så att en frekvensurskiljning sker.

Ljud behöver dock inte komma via hörselgången för att en ljudförnimmelse ska uppstå. Även när skallbenet vibrerar deformeras basilarmembranet och en hörselförnimmelse uppstår. Fenomenet kallas benledning och används ibland för att hjälpa hörselskadade att höra.

2.4.2 Hörseln

Den lägsta frekvensen ett friskt öra kan uppfatta ligger vid ca 20 Hz, och uppåt är gränsen ca 20 000 Hz. Ljudtrycket hos en nått och jämnt hörbar sinuston vid en given frekvens kallas *hörtröskeln*. Vid mycket höga ljudtrycksnivåer över ca 120 dB framkallar ljudet smärta och vi har nått *smärtröskeln*. Den lägsta ljudstyrka vi kan uppfatta vid 1000 Hz motsvarar ett ljudtryck på ca $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Smärtgränsen för samma frekvens motsvarar ett ljudtryck på ca 30 Pa. I Figur 12 visas örats omfång i frekvens och ljudtrycksnivå samt ungefärliga områden för tal och musik. De individuella skillnaderna för örats omfång är stora. Med åldern försämras hörseln, främst de högre frekvenserna drabbas av hörselnedsättningar.

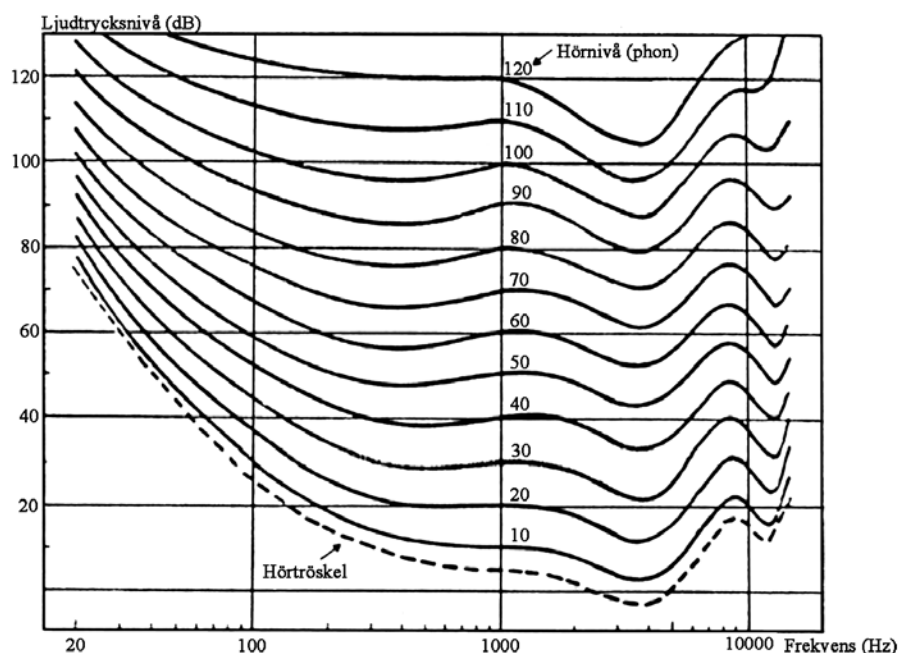


Figur 12 Örats omfång

Örats känslighet varierar med frekvensen. En 100 Hz ton på 50 dB uppfattas subjektivt inte lika stark som en 1000 Hz ton på 50 dB. Man har framtagit *lika-hörnivåkurvor* eller *phonkurvor* som visar hur den subjektiva upplevelsen av ljudtrycksnivån varierar med frekvensen genom att låta försökspersoner lyssna på exempelvis en 1000 Hz ton vid 20 dB och därefter ställa in den ljudnivå som krävs för de övriga frekvenserna för att de ska uppfattas lika starka som 1000 Hz tonen, se Figur 13. Kurvorna ger en generell bild av hur vi

uppfattar ljud som blir användbara då vi lite senare ska diskutera vilka mått som kan vara användbara för utvärdering av olika sorters ljud.

Som framgår av figuren är örats frekvensberoende mer markant vid låga ljudnivåer än vid höga. Detta fenomen kan påvisas med hjälp av en stereo. Om man långsamt sänker volymen på en stereo märker man att basen så småningom försvinner. Detta undviks antingen genom att då manuellt förstärka basen eller genom att använda en funktion som ofta finns på stereoapparater och kallas för "loudnessknappen". Med den aktiv förstärks basen så att en bättre ljudbild erhålls. Om samma inställningar används även vid höga ljudnivåer kommer däremot basen att dominera alltför mycket så att ljudet inte längre låter rätt. En annan konsekvens av phonkurvornas utseende är att det för låga frekvenser krävs mindre ljudnivåökning från det att man uppfattar dem tills de upplevs smärtsamma jämfört med högre frekvenser. Om vi med ett ljud befinner oss strax under hörtröskeln för alla frekvenser och därefter ökar ljudtrycksnivån ytterligare 70 dB för alla frekvenser kommer 1000 Hz delen befinna sig vid ca 70 dB medan 50 Hz delen befinner sig vid smärtröskeln.



Figur 13 Lika-hörnivåkurvor eller phonkurvor

Exempel

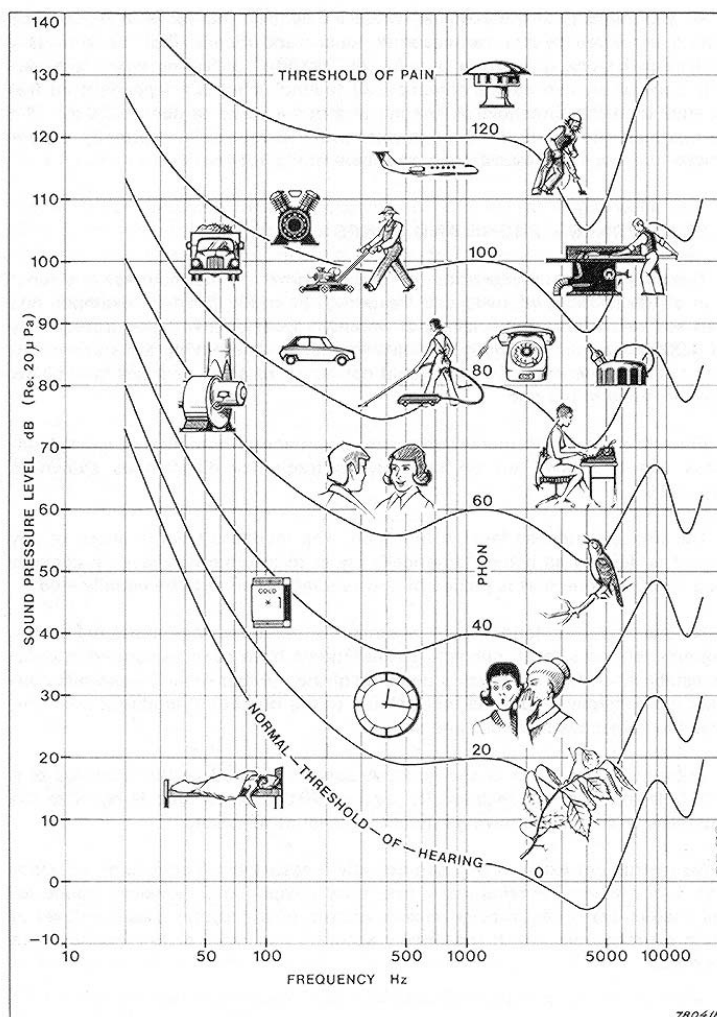
Vilken ljudtrycksnivå krävs för en ton vid 50 Hz för att den ska uppfattas lika stark som en 30 dB ton vid 1000 Hz?

Genom att följa phonkurvan från 30 dB vid 1000 Hz till 50 Hz och sedan läsa av motsvarande ljudtrycksnivå erhålls ca 60 dB.

Två toner vid vardera 200 Hz och 1000 Hz jämförs. Ljudtrycksnivån för båda toner är 60 dB. Vilken ton bör uppfattas starkast (subjektivt)?

Eftersom punkterna befinner sig på samma phonkurva bör de uppfattas lika starka.

I Figur 14 visas några olika ljudkällor och vilka nivåer samt frekvensområde de vanligen befinner sig i.



Figur 14 Några vanliga ljudkällors placering i frekvensled och dess ljudnivå¹²

2.4.3 Tal

En av vår hörsels viktigaste förmåga är att uppfatta tal. Normal röststyrka en meter från en talare i en tyst miljö är ca 60-65 dB(A), vid mycket hög röststyrka ca 85 dB(A). I Figur 5 framgick långtidsmedelvärden för frekvensinnehållet vid manligt respektive kvinnligt tal. Om talljud analyseras kan man se att vokaler finns huvudsakligen mellan 300 – 3000 Hz, tonade konsonanter som n och v mellan 300 – 4000 Hz och tonlösa konsonanter som f och s mellan 2500 – 12 000 Hz. Konsonanterna innehåller den mesta språkliga informationen vilket framgår av nedanstående exempel. En hörselnedsättning i det högre frekvensområdet leder därför till större försämrade taluppfattbarhetsförmåga än en skada i det lägre frekvensområdet.

Exempel

Ch-mp-gn- sk- v-r- k-ll, t-rr -ch gr-t-s

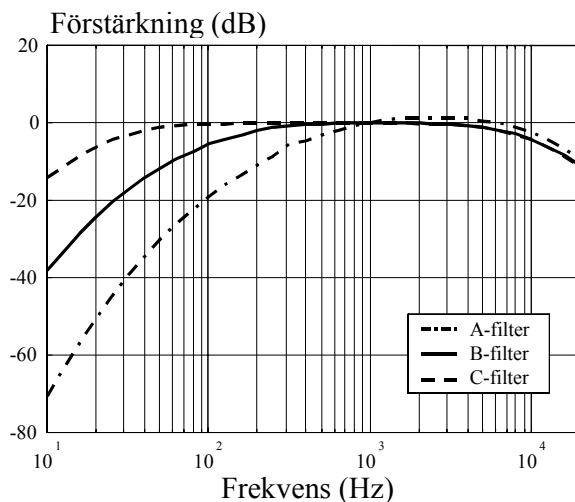
--a--a--e --a --a-a --a--, -o--o-- --a-i-
(Winston Churchill)

¹²Ginn K.B., Architectural Acoustics, Brüel & Kjær, 1978.

2.5 SUBJEKTIVA MÅTT

Vi har sett att hörselns egenskaper varierar med frekvensen, samma dB värden vid olika frekvenser svarar mot skild upplevd hörstyrka. Hur svarar en förändring av antalet decibel mot upplevd förändring av ljudstyrkan? Det påstås ibland att hörseln är logaritmisk men det stämmer inte riktigt. En decibel motsvarar ungefär den minsta skillnad man kan uppfatta i ljudstyrka. Vid låga nivåer, ca 20 dB, ska ljudtrycksnivån ändras 5 dB för att ljudet ska upplevas som dubbelt så starkt/svagt, medan vid nivåer över ca 50 dB krävs det en förändring på ca 10 dB. Det är viktigt att komma ihåg att den upplevda ljudstyrkan inte är proportionell mot decibeltalet. En minskning av ljudet från 100 dB till 90 dB är något helt annat än en minskning med 10 % av upplevd hörstyrka. Detta har ibland varit ett problem i politiska diskussioner om buller.

Hur kan de objektiva måtten omvandlas till hur vi verkligen uppfattar ljudet? Man har valt att införa vägningskurvor som förstärker och försvagar ljudtrycksnivån vid olika frekvenser likt ett filter. A-, B- och C-filter togs fram utgående från inverterade phonkurvor för 40, 60 och 80 phon, jämför Figur 13 och Figur 15. A-filtret är avsett för relativt svaga ljud och väger de olika områdena mer relativt varandra än B- och C-filter. Framförallt minskar A-filtret mycket av basljudet. B-filter bör användas vid medelhöga nivåer och C vid höga nivåer. Vid mätning av buller från flygplan används ibland även ett D-filter som tar hänsyn till effekten av ökad störning pga det högfrekventa vinande ljudet ett flygplan åstadkommer.



Figur 15 A, B och C filtrens utseende

Frekvens [Hz]	A-filter [dB]	B-filter [dB]	C-filter [dB]
10	-70.4	-38.2	-14.3
12.5	-63.4	-33.2	-11.2
16	-56.7	-28.5	-8.5
20	-50.5	-24.2	-6.2
25	-44.7	-20.4	-4.4
31.5	-39.4	-17.1	-3.0
40	-34.6	-14.2	-2.0
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3.0	-0.1
200	-10.9	-2.0	0
250	-8.6	-1.3	0
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	0.6	0	0
1600	1.0	0	-0.1
2000	1.2	-0.1	-0.2
2500	1.3	-0.2	-0.3
3150	1.2	-0.4	-0.5
4000	1.0	-0.7	-0.8
5000	0.5	-1.2	-1.3
6300	-0.1	-1.9	-2.0
8000	-1.1	-2.9	-3.0
10000	-2.5	-4.3	-4.4
12500	-4.3	-6.1	-6.2
16000	-6.6	-8.4	-8.5
20000	-9.3	-11.1	-11.2

Tabell 9 Vägningskurvorna i tabellform vid tersbandens mittfrekvenser för A-, B- och C-vägning

När man förfogar över mätta eller beräknade bandnivåer i dB och vill beräkna det vägda värdet kan följande ekvation användas¹³

$$L_{\text{vägt}} = 10 \log \left(\sum 10^{(L_n + \text{vägning})/10} \right) \quad (8)$$

där L_n är ters- eller oktavnivå i band n . Vägningen innebär att man gör om ett spektrum till ett ensiffervärde. Vägningens värdena erhålls ur standardiserade tabeller, se Tabell 9. Det vägda värdet anges i dB(A), dB(B) eller dB(C).

Exempel

Beräkna den A-vägda ljudtrycksnivån, L_A , ur givna oktavbandsnivåer.

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
L_n [dB]	85	87	92	85	77	70	65

Lösning: A-vägningen ges ur Tabell 9.

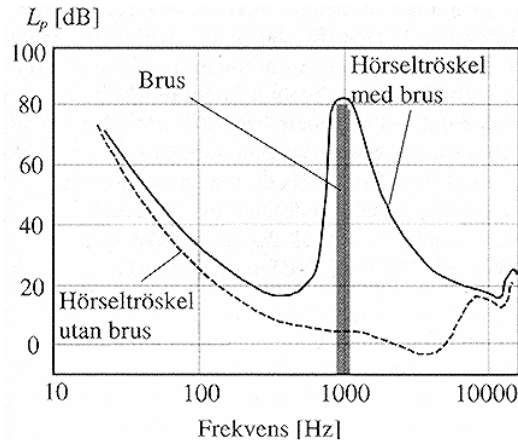
ΔA_n [dB]	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	+1.2	+1.0
$L_n + \Delta A_n$ [dB]	58.8	70.9	83.4	81.8	77	71.2	66

$$L_A = 10 \log(10^{5.88} + 10^{7.09} + 10^{8.34} + 10^{8.18} + 10^{7.7} + 10^{7.12} + 10^{6.6}) \approx 87 \text{ dB(A)}$$

A-filtret har tyvärr fått en sådan genomslagskraft att många felaktigt använder det vid alla tillfällen och tror att de därmed har anpassat de mätta ljudet till hur det mänskliga örat upplever ljudet. A-filtret är endast applicerbart vid två tillfällen; vid låga ljudnivåer runt 30-40 dB samt vid höga ljudnivåer då skadeinverkan på hörselorganen är intressanta. När det gäller hörselskador anses det nämligen att ljusa toner (höga frekvenser) är farligare än bastoner (låga frekvenser) vid samma fysiska styrka. När nivåerna för det ljud man vill analysera inte stämmer överens med varken A-, B- eller C-filtret är det bäst att redovisa ovägdade värden. Ett annat tillvägagångssätt kan vara att använda *psykoakustiska* mått. Inom psykoakustiken studerar man effekten av ljud på hörsystemet, d v s hur man subjektivt uppfattar ljud.

Ett av de vanligare måtten som framtagits är *loudness* [sone], som beskriver upplevd ljudstyrka. I loudnessmättet ingår förutom phonkurvornas beteende vid alla ljudnivåer och frekvenser ytterligare två egenskaper hos hörseln; *maskering* av ljud och örats *kritiska bandbredd*. Maskering innebär att ett ljud döljs av ett annat ljud, se Figur 16. Hörseln samlar in information med hjälp av en mängd filter med viss bandbredd vars storlek varierar med frekvensen. Denna bandbredd benämns kritisk bandbredd. Flera olika metoder för att bestämma hörselns kritiska bandbredd finns vilka ger samma resultat. En metod går ut på att utgående från ett smalbandigt brus öka dess bredd samtidigt som man håller den sammanlagda ljudtrycksnivån konstant. När bandbredden är mindre än den kritiska bandbredden är upplevelsen av ljudstyrkan konstant men när bandbredden överstiger den kritiska börjar ljudet upplevas allt ljudstarkare. Även om loudness har funnits länge och i många fall visat sig bäst kunna beskriva upplevd ljudstyrka används det inte så mycket på grund av det förr var svårt att utföra beräkningarna. Dagens datorer har underlättat beräkningarna och måttet används alltmer vid exempelvis produktutveckling av bilar och telefoner som en hjälp att ta fram rätt ljud.

¹³ Ekvation (8) summerar ljudtryckens effektivvärden omvandlat till ljudtrycksnivåer.



Figur 16 Påverkan av hörseltröskeln för sinustoner av ett smalbandigt brus vid 1000 Hz. I figuren framgår att maskeringseffekten är större för frekvenser högre än brusets mittfrekvens än för lägre frekvenser. Ett lågfrekvent ljud maskerar alltså en större del av vårt hörområde än ett högfrekvent brus och är därför generellt mer störande för exempelvis taluppfattbarheten.

När ett ljud ska bedömas subjektivt är det dock sällan man bara är intresserad av ljudnivån utan andra faktorer spelar in, vilket nämdes i samband med örat och hörseln. En droppande vattenkran kan vara mer irriterande än trafikbuller trots att det rör sig om lägre ljudnivåer, för i det fallet kan störningen bero på att ljudsignalen informerar om att tätningen behöver lagas vilket man kanske inte orkar fixa. Ljudet från naglar som dras över svarta tavlan kan en del reagera starkt på även om det inte är speciellt hög ljudnivå. Ljudkvalité är alltså inte samma sak som ljudnivå. Flera olika mått finns framtagna som tillsammans kan hjälpa en utvecklare att ta fram bättre lösningar. Inget generellt mått finns vid bedömningen av vad som är bra ljudkvalité, vilket egentligen är självklart; en rakapparat ska till exempel inte låta som en kaffebryggare. De individuella skillnaderna kan dessutom vara stora. När det gäller motorljud föredrar en del ljudet från en Harley Davidson medan andra föredrar ljudet från en Honda V4:a, musik är ett annat exempel där de individuella skillnaderna är stora. För en produktutvecklare gäller det få fram det ljud som förväntas av produktens målgrupp och då är oftast både objektiva och subjektiva mätningar nödvändiga för att säkra en god ljudkvalité.

När ett ljuds ljudtrycksnivå varierar med tiden och man vill ha ett mått på ljudets skadliga inverkan används ibland *ekvivalent ljudtrycksnivå*. Den ekvivalenta ljudtrycksnivån $L_{eq,T}$, definieras som den konstanta ljudtrycksnivå som har samma totala ljudenergi som ett ljud med tidsvarierande ljudtrycksnivå under en viss tidsperiod T (jfr ljudtryckets rms-värde).

$$L_{eq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_{ref}^2} dt \right) = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right) \quad (9)$$

där $p(t)$ är ljudtryckets momentanvärde,
 $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$,
 T mätperiodens längd och
 $L_p(t)$ är ljudtrycksnivån som funktion av tiden.

Den ekvivalenta ljudtrycksnivån används till exempel i direktiv kring ljudnivåer på arbetsplatser, i bostäder och från trafik. Vägda värden för ekvivalentnivån förekommer ofta i standarder. Dessa betecknas vanligen $L_{A,eq,8}$ och i samband med det anges vägningen inte i

enheten utan man skriver enbart $L_{A,eq,8} = 45\text{dB}$, men beteckningen $L_{eq,8} = 45\text{dB(A)}$ förekommer också liksom andra kombinationer.

Exempel

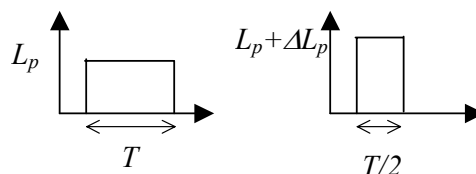
Ett kortvarigt starkt ljud bidrar kraftigt till den ekvivalenta ljudnivån. Vad motsvarar en konstant ljudnivå på 100 dB(A) i 15 min i ekvivalent ljudnivå under 8 timmar?

$$\text{Lösning: } L_{eq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right) = 10 \log \left(\frac{1}{8} \int_0^{1/4} 10^{100/10} dh \right) = 85 \text{ dB(A)}$$

Kommentar: 100 dB(A) är en vanlig ljudnivå på diskotek, ofta är nivån ännu högre. För att inte överstiga Arbetsmiljöverkets regler för risk för hörselskada bör man alltså inte tillbringa mer än en kvart i denna miljö.

Hur mycket kan ljudnivån ökas om exponeringstiden halveras utan att ekvivalentnivån förändras?

Lösning: Antag att den ursprungliga exponeringstiden är T och att ljudnivån då är L_p . Ökningen i ljudnivån betecknas ΔL_p . Samma ekvivalentnivå (totalt) ger



$$10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p/10} dt \right) = 10 \log \left(\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} 10^{L_p + \Delta L_p/10} dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right) \right) \Leftrightarrow$$

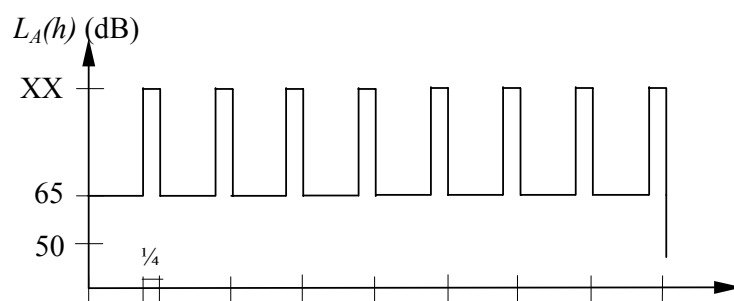
$$\int_0^T 10^{L_p/10} dt = \int_0^{T/2} 10^{L_p/10} \times 10^{\Delta L_p/10} dt \Leftrightarrow$$

$$2 = 10^{\Delta L_p/10} \Leftrightarrow \Delta L_p = 3 \text{ dB}$$

2.6 ÖVNINGSUPPGIFTER

- Vi jämför två rena toner, A och B, där A har frekvensen 150 Hz och ljudtryckets rms-värde är 1 Pa och B har frekvensen 1000 Hz och ljudtryckets rms-värde är 0,5 Pa.
 - Vilken av dem har längst våglängd?
 - Hur många decibel skiljer de två tonerna?
 - Om ljudtrycksnivån för både A och B är 30 dB, vilken av dem uppfattas ljudstarkast?
 - Om ljudtrycksnivån för både A och B är 80 dB, vilken av dem uppfattas ljudstarkast?
- Du ska köpa en ny dammsugare och är på jakt efter en dammsugare vars ljud inte stör dig så mycket. Försäljaren visar dig två stycken vars produktblad anger att den uppmätta ljudtrycksnivån är 78 dBA respektive 74 dBA och hävdar då att (den betydligt dyrare) dammsugaren med det lägre dBA värdet nog är vad du söker efter. Men när ni sätter på dammsugarna upptäcker ni att dammsugaren med det högre dBA-värdet faktiskt låter mer behagligt än den andra. Hur kommer detta sig?
- Enligt Arbetarsmiljöverkets kungörelse AFS 1992:10 Buller finns det krav på maximalt tillåtna bullernivåer under en typisk arbetsdag. En av dessa krav är att ekvivalent A-vägd ljudnivå ej får överstiga 85 dBA.

En arbetare på en viss industri exponeras för nedanstående ljudtrycksnivåer under sin arbetsdag enligt en utförd mätning.



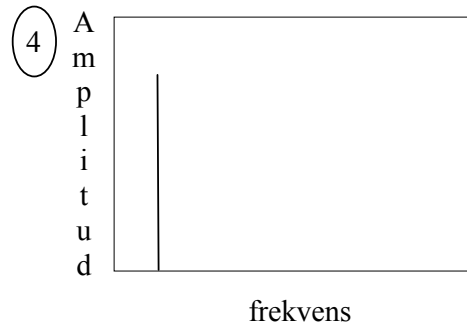
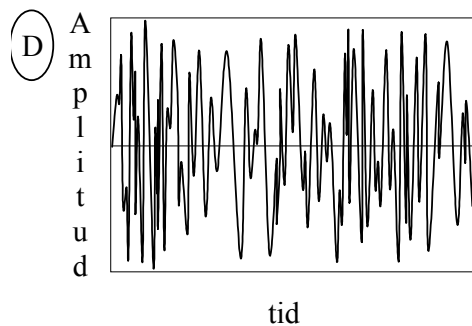
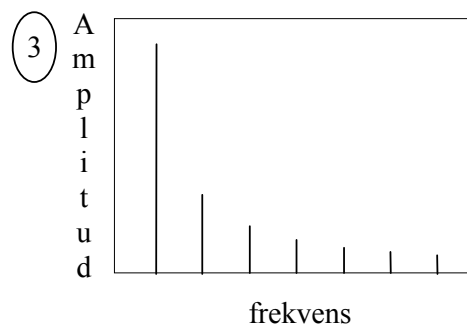
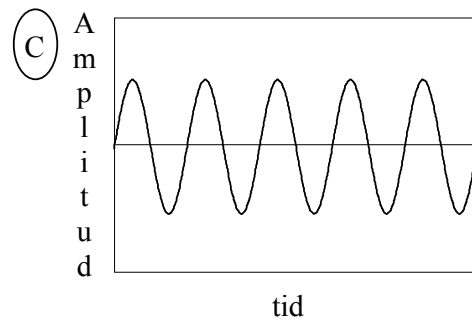
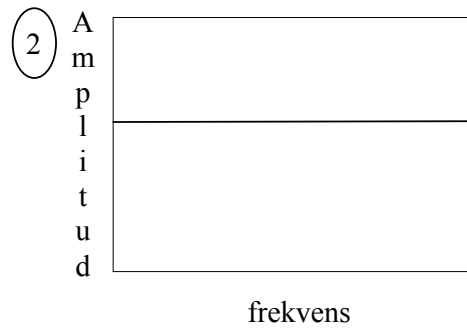
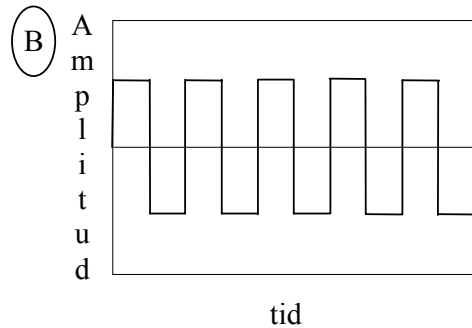
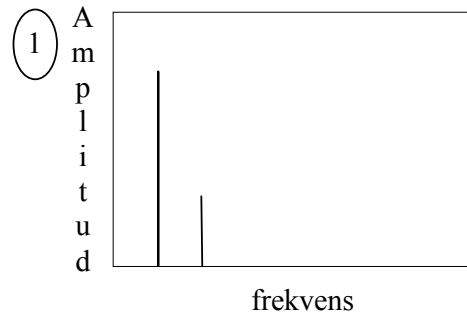
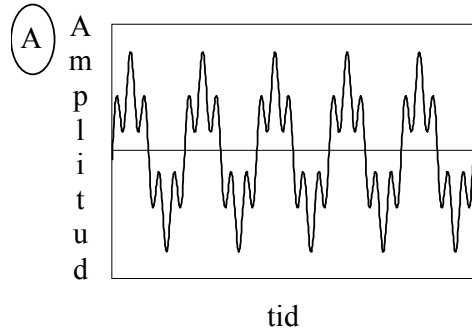
- Beräkna de A-vägdade värdena för topparna, XX, med hjälp av uppmätta oktavvärden i tabellen nedan. A-vägningsvärden erhålls ur Tabell 9.

$f(\text{Hz})$	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k
$L_n(\text{dB})$	92	98	95	91	86	83	80

- Beräkna ekvivalent A-vägd ljudnivå, $L_{Aeq,8}$. Är arbetsmiljön ok enligt Arbetarskydds-styrelsens kungörelse?

c) Under den tid då arbetaren exponeras för toppvärdena används hörselskydd som medför att dBA-värdena sjunker med 30 dBA (under övrig tid används ej hörselskydd). Ekvivalent A-vägd ljudnivå, $L_{Aeq,8}$, sjunker då till 65 dBA. Vid ett av tillfällena glömmer arbetaren att ta på sig hörselskydden, vad blir det A-väga ekvivalentvärdet då?

4. Nedan visas tidssignaler och spektrum för fyra olika signaler. Signalerna kan antas pågå oändligt länge. Koppla samman de tidssignaler och spektrum som hör ihop.

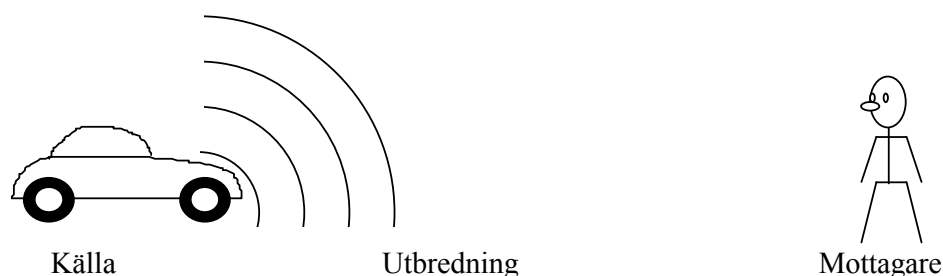


3 GEOMETRISK AVSTÅNDSBEROENDE – HUR SPRIDER SIG LJUD?

3.1 INLEDNING

När väl ett ljud har uppstått någonstans (i det vi kallar en källa), så kommer det att sprida sig till omgivningen. Ljudet utbreder eller fortplantar sig. Men hur går detta till?

Låt oss tänka oss ett exempel som vi tidigare har diskuterat; vi har en trafikerad väg och ett bostadshus och där emellan en trädgård eller gräsmatta, se Figur 17. Vår erfarenhet säger oss att då vi befinner oss nära vägen så störs vi mer av bullret än då vi befinner oss en bit bort. Alltså, ljudet låter starkare då vi är nära en ljudkälla än då vi är en bit bort från den. Men hur stort är detta avståndsberoende och vad kommer det sig av?



Figur 17 Exempel på ljuds utbredning från källa till mottagare.

Andra fenomen har också betydelse för hur ljudet sprider sig. Väder och vind inverkar på ljudutbredningen utomhus, och kommer därför att diskuteras. När den fortskridande ljudvågen stöter på marken eller föremål så kommer detta att påverka utbredningen. Här behöver vi undersöka hur addition av olika ljud kan ske, liksom hur ljud böjer runt föremål - diffraktion.

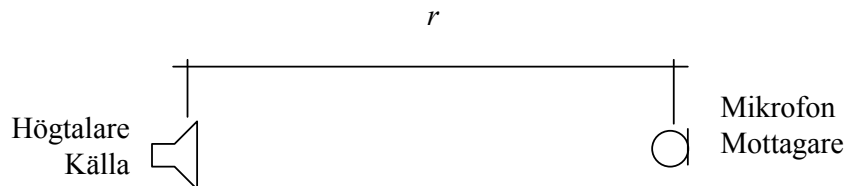
Även i rum har avståndet till källan ofta betydelse. Ett exempel är i en föreläsningssal. De studenter som sitter närmast föreläsaren hör bättre vad som säjs än de som sitter långt bak. Hur skiljer sig detta avståndsberoende från det som vi beskrev först, där ljudutbredningen sker utomhus?

3.2 LJUDUTBREDNING I FRIFÄLT

3.2.1 Beskrivning av ett experiment, frifält¹⁴

För att undersöka hur ljudnivån beror av avståndet utför vi ett experiment. Experimentet kan utföras i föreläsningssalen. Vi behöver en ljudkälla, vilken kan vara en talare, ett musikinstrument eller en högtalare. Sedan lyssnar och mäter vi ljudet vid olika positioner i förhållande till ljudkällan.

¹⁴ Med frifält menas ett ljudfält som inte är påverkat av föremål och begränsningsytor.



Figur 18 Experiment

Vi utför experimentet genom att spela upp brus (skapad i en dator) till en högtalare. Högtalaren står placerad nere vid föreläsaren. Sedan mäter vi upp ljudnivån med en ljudnivåmätare (vilken kan vara kopplad till datorn) för olika avstånd från högtalaren och skriver upp resultatet i en tabell. Resultatet kan se ut som i Tabell 10.¹⁵

r [m]	0.14	0.195	0.26	0.285	0.32	0.39	0.445	0.545	0.715	0.945	1.3	1.785	2.0
L [dB]	73.9	71.2	68.7	67.9	67	65.2	63.9	62.8	60.7	59.0	56.4	54.7	54.1

Tabell 10 Experiment

Vi ska nu försöka dra slutsatser och hitta experimentella samband från detta experiment genom att grafiskt studera resultatet. Om man är ute efter ljudnivåminskningen för ökande avstånd, så kan man relatera allt till den ljudnivån som ligger närmast källan av de ljudnivåer som mäts upp. I det aktuella fallet får vi då

$$\Delta L = L - L_1 = L - 73.9 \text{ dB}.$$

Denna storhet plottas som funktion av avståndet, i logaritmisk skala (ljudnivåskalan är redan logaritmisk - dB). I Figur 19 är mätvärdena markerade med plus (+).

För att hitta ett uttryck för ΔL utför vi en regression med hjälp av minsta kvadrat metoden, och testar följande modell

$$\Delta L = c_1 + c_2 \log r.$$

Om man endast använder de sju första punkterna för det aktuella experimentet (mer om detta senare) blir konstanterna bestämda till $c_1 = -16.8$ och $c_2 = -19.8$. Regressionen syns som den streckade linjen i Figur 19, vilken stämmer väl överens med mätresultatet för de punkter som vi har valt att ta med. För att komma vidare får vi nu vara lite innovativa. ΔL är skillnaden mellan ljudnivån i den första positionen och de övriga, så det första avståndet r_1 ($r_1 = 0.14$ m i det aktuella fallet) borde komma med i uttrycket för ΔL . Och eftersom r är logaritmerad i uttrycket, så då borde även r_1 komma med som en logaritm. Vi provar därför att få in den i konstanten c_1 genom att dividera med $\log(r_1)$.

$$\frac{c_1}{\log 0.14} = 19.7.$$

¹⁵ Bruset kan vara ett bredbandigt vitt eller rosa brus. Vi mäter sedan ljudnivån för en ters relativt högt upp i frekvens. I exemplet används 2000 Hz som mitterfrekvens för tersbandet. Används en ren ton får man problem med interferensfenomen orsakade av väggarna och golvet. Med interferens avses hur vågor som möter varandra samverkar och motverkar varandra. Interferensfenomenet kommer att diskuteras mer längre fram. Används en för låg mitterfrekvens för tersbandet fås problem med högtalarens närfält (kommer inte att diskuteras i denna kurs).

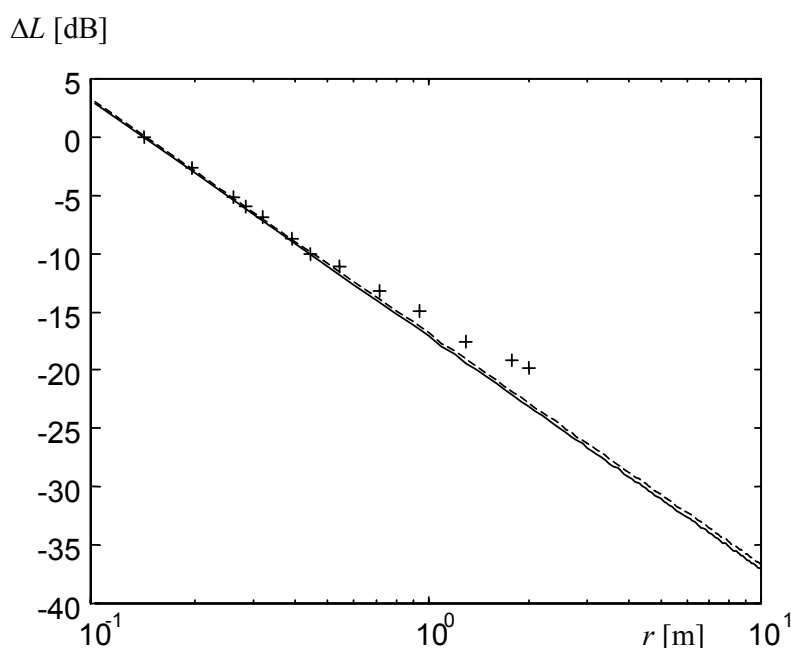
Den nya konstanten 19.7 är ungefär samma som $c_2 = -19.8$ (förutom tecknet). Vi gör därför förenklingen att anta att de är lika och att de är lika med 20!

$$\Delta L = 19.7 \cdot \log 0.14 - 19.8 \cdot \log r \approx 20 \cdot (\log 0.14 - \log r) = 20 \cdot \log \frac{0.14}{r}$$

Detta uttryck syns som den heldragna linjen i Figur 19. Allmänt kan vi skriva

$$\Delta L = 20 \cdot \log \frac{r_1}{r} = -20 \cdot \log \frac{r}{r_1} = -10 \cdot \log \frac{r^2}{r_1^2} \quad (1)$$

där r_1 är positionen närmast källan och r är en position längre bort, och vi har experimentellt tagit fram ett uttryck för avståndsberoendet.



Figur 19 Mätresultat, streckad linje (---) regression, heldragen linje (—) ekvation (1)

Vi har nu experimentellt sett hur ljud sprider sig från en källa (i frifält). Men hur kan man förklara detta? För att kunna göra det behöver vi lära oss lite mer om ljud.

3.2.2 Effekt och intensitet

En högtalare som anslutits till exempelvis en radio förbrukar elektrisk effekt på samma sätt som en glödlampa ansluten till ledningsnätet. I båda fallen anger man förbrukningseffekten i watt (W). Högtalaren omvandlar den elektriska effekten till *akustisk effekt*, som alltså även den anges i enheten watt. Endast en liten del av den till högtalaren lämnade effekten omvandlas dock till ljud, oftast endast 2-3%. En person som talar alstrar högst $25\text{-}50 \cdot 10^{-6}$ W medan en hel symfoniorkester alstrar högst 10-20 W. För normala ljud i byggnader rör det sig

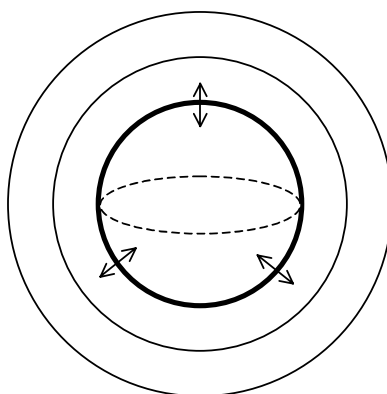
alltså om synnerligen små effektmängder, och den från källan utgående ljudvågen ger också upphov till förvånansvärt små rörelser av fortplantningsmediet (från 10^{-11} m till några få mm).

Den effekt som ljudkällan ger ifrån sig bevaras i den fortskridande ljudvågen och förmedlas till omgivningen genom vågrörelsen – energins bevarande.

Om man lägger en fiktiv ytenhet vinkelrätt mot vågens fortplantningsriktning, blir den effektmängd som passerar ytan en storhet för ljudets styrka på det valda stället. Denna storhet kallar man *intensitet* I , och mäts i W/m^2 . I en fri fortskridande ljudvåg av sfärisk eller plan form gäller följande samband mellan intensitet I och ljudtryckets rms-värde $\tilde{p}$,

$$I = \frac{\tilde{p}^2}{\rho c} \quad (2)$$

där c är ljudhastigheten och ρ är luftens densitet (täthet).



Figur 20 En sfärisk källa som skapar en sfärisk våg

3.2.3 Sfärisk källa

Många källor kan anses vara små i förhållande till våglängden eller till avståndet till mottagaren. Om man antar att det förhåller sig så, kan man approximera källan (högtalaren) med en pulserande sfär, se Figur 20. Då källsfären pulserar uppstår en störning i den omgivande luften. Denna störning kommer att utbreda sig med en given hastighet – ljudets våghastighet. Men den energi som överfördes från källsfären till luften kommer att förbli konstant medan ljudvågen fortplantar sig, ty energibalans råder. Från en sfär som pulserar sprider sig ljudet lika bra i alla riktningar. Detta innebär att ljudvågen kommer att fortplanta sig med sfäriska vågor, det vill säga vågfronten kommer även den att vara formad som en sfär. Om man tänker sig att källsfären pulserar kontinuerligt över tiden, kanske med en viss frekvens, så är det bättre att tala om energi per tidsenhet, det vill säga effekt. Energibalansen ger då att totala effekten för en vågfront vid två olika positioner (r_1 och r_2) måste vara densamma,

$$\Pi(r_2) = \Pi(r_1) = \text{konst.}$$

Eftersom den yttre sfären är större än den inre måste effekten per ytenhet, intensiteten I , vara mindre för den stora sfären jämfört med den lilla. Ytan av en sfär är $4\pi r^2$. Alltså, om vi

skriver effekthalansen med hjälp av intensiteten och flyttar om så får vi ett uttryck för hur mycket intensiteten minskar mellan två positioner,

$$\frac{I(r_2)}{4\pi r_2^2} = \frac{I(r_1)}{4\pi r_1^2} = konst \Leftrightarrow I(r_2) = I(r_1) \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (3)$$

Här är Π effekten (W) och I intensiteten (W/m²). För punktformiga ljudkällor gäller alltså att ljudintensiteten minskar när avståndet ökar, eller annorlunda uttryckt; intensiteten tunnas ut. Uttrycket kan också skrivas

$$I(r) = \frac{\Pi}{4\pi r^2} \quad (4)$$

Man ser av detta att intensiteten är omvänt proportionell mot kvadraten av avståndet till källan, och detta samband kallas *avståndslagen* för en sfärisk källa. Intensiteten är en storhet som beskriver hur ljudets (energi-) styrka beror av positionen. Det är därför inte förvånande att den är relaterad till ljudtryckets rms-värde och till ljudtrycksnivån i en given punkt. Sambandet mellan rms-värde och intensitet för en fortskridande våg finns i ekvation (2), som tillsammans med ekvation (4) ger ett uttryck för ljudtryckets rms-värde i en sfärisk våg,

$$\tilde{p}^2(r) = \frac{\Pi \rho c}{4\pi r^2}$$

Ljudtrycksnivån i två positioner r_1 och r_2 blir då

$$L(r_i) = 10 \log \frac{\Pi \rho c}{p_{ref}^2 4\pi r_i^2}, \quad i = 1, 2$$

Så därför, när avståndet ökar från r_1 till r_2 , kan man skriva nivåminskningen som (testa själva!)

$$\Delta L = L(r_2) - L(r_1) = -20 \log(r_2/r_1) \quad (5)$$

Detta resultat stämmer med det resultat vi tog fram experimentellt, ekvation (1). Ett fördubblat avstånd, $r_2 = 2 \cdot r_1$, medför då att ljudtrycksnivån minskar med $20 \log 2 \approx 6$ dB. Även detta samband går under benämningen *avståndslagen*.

Exempel

Man har mätt upp ett ljudtryck på $L(r_1) = 60.0$ dB 1 m från en liten punktkälla. Om vi kan anta sfärisk utbredning, hur högt ljudtryck har vi 2.5 m från källan?

Vi börjar med att beräkna nivåminskningen, ekvation (5)

$$\Delta L = -20 \log(2.5/1) = -8.0 \text{ dB}$$

$$\text{Alltså är } L(r_2) = 60.0 - 8.0 \text{ dB} = 52.0 \text{ dB}$$

Om man spelar upp en ton i den sfäriska källan, så kommer det momentana ljudtrycket på ett avstånd r från källan att vara en sinus med en amplitud som minskar med avståndet till källan,

$$p(t, r) = \frac{A \sin(\omega t - \omega r/c)}{r} \quad (6)$$

det t är tiden, ω är vinkelfrekvensen, c är våghastigheten och A är en konstant som beskriver styrkan i signalen. Även här kan man se avståndslagen då ljudtrycket är omvänt proportionellt mot avståndet och därmed $p^2 \propto 1/r^2$. Vidare, rms-värdet av ljudtrycket i ekvation (6) blir

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{2} \frac{A^2}{r^2}$$

3.2.4 Andra källor

Vågutbredningen från en källa kommer generellt sett inte alltid vara sfärisk, det är ett förenklat specialfall. Andra förenklade specialfall som approximativt kan finnas i vissa situationer är plan vågutbredning och cylindrisk vågutbredning.

Om man befinner sig nära en plan yta som strålar ut ljud, fortplantar sig ofta vågen med plana vågor, det vill säga vågfronterna byggs upp av plana ytor. Ett annat fall där plana vågor uppkommer är i rör (ventilationsrör, rörapparat). Energins bevarande medför här att vågfronten har samma intensitet vid två olika positioner i utbredningsriktningen, och inget avståndsberoende uppstår för detta fall. Om man spelar upp en ton i den plana källan, så kommer det momentana ljudtrycket på ett avstånd r från källan att vara

$$p(t, r) = A \sin(\omega t - \omega r/c), \quad (7)$$

det vill säga en sinusterm och en konstant amplitud som bara beror av källan. Vidare är ljudtryckets rms-värde konstant i en plan våg (om medelvärdesbildningen sker under lång tid, se diskussionen i kapitel 2),

$$\tilde{p} = \text{konst}.$$

I stora rum med lågt till tak, exempelvis kontorslandskap, kan ljudutbredningen ofta beskrivas som cylindrisk, det vill säga vågfronterna byggs upp av cylindrar. Ett annat exempel där cylindrisk vågutbredning sker är vid avlånga källor, linjekällor. Exempel på linjekällor kan vara trafikbuller från en väg eller vid avlånga springor i väggar. Ytan av en cylinder är $2\pi rh$, där h är höjden av cylindern och r är avståndet till källan. Energins bevarande i vågfronten ger i detta fall att

$$\frac{I(r_2)}{2\pi h r_2} = \frac{I(r_1)}{2\pi h r_1} = \text{konst} \Leftrightarrow I(r_2) = I(r_1) \frac{r_2}{r_1}$$

Man kommer alltså få ett avståndsberoende även i detta fall, som säger att ljudtryckets rms-värde är omvänt proportionellt mot roten ur avståndet, eller

$$\begin{aligned}\tilde{p}^2 &\propto 1/r, \\ \Delta L &= -10 \log r_2/r_1\end{aligned}\tag{8}$$

vilket innebär att en avståndsfördubbling ger en sänkning med $10 \log 2 \approx 3$ dB. Om man spelar upp en ton i den cylindriska källan, så kommer det momentana ljudtrycket på ett avstånd r från källan att vara mer komplicerat än i de två föregående fallen, man kan faktiskt inte använda vanliga funktioner för att beskriva denna ljudutbredning¹⁶.

Exempel

Man har än en gång mätt upp ett ljudtryck på $L(r_1)=60.0$ dB 1 m från en liten linjekälla. Om vi kan anta cylindrisk utbredning, hur högt ljudtryck har vi 2.5 m från källan?

Vi börjar med att beräkna nivåminskningen:

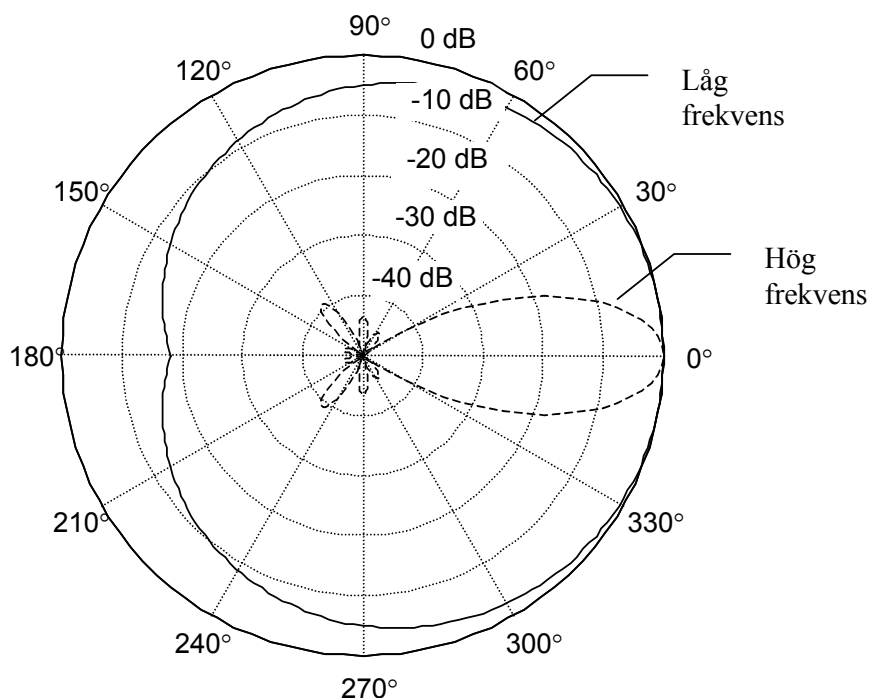
$$\Delta L = -10 \log(2.5/1) = -4.0 \text{ dB}$$

$$\text{Alltså är } L(r_2) = 60.0 - 4.0 \text{ dB} = 56.0 \text{ dB}$$

Från de tre specialfallen sfärisk, cylindrisk och plan vågutbredning kan vi sluta oss till att ljudet minskar med avståndet till källan som 0-6 dB per avståndsfördubbling. I experimentet som presenterades tidigare, se Figur 19, var avståndsberoendet först 6 dB per avståndsfördubbling. För större avstånd från källan minskade sedan avståndsberoendet.

För en verklig källa kommer ljudet att sprida sig olika mycket i olika riktningar (även om den är liten eller punktformig). Vanliga högtalare låter mer rakt framifrån än åt sidorna. Man brukar beskriva hur en ljudkälla sprider ljudet i olika riktningar i ett *strålningsdiagram*, eller *riktningskaraktistik*. I Figur 21 visas ett exempel på ett strålningsdiagram. När man sedan känner hur ljudkällans ljudnivå är fördelad, kan man beräkna trycknivån på olika avstånd och i olika riktningar genom att anta att i varje riktning sker utbredningen sfäriskt. Riktningsskarakteristiken kommer vara frekvensberoende, olika för varje källa. För de högre frekvenserna är våglängden liten och framförallt liten i förhållande till högtalaren. Ljudvågen uppfattar det som om källan var en kolv i en stor vägg, och ljudet kommer att vara riktat rakt fram. För låga frekvenser kommer våglängden att vara stor, och framförallt stor i förhållande till högtalaren. Vågen kommer inte att uppfatta högtalaren alls, och ljudet sprider sig lika mycket i alla riktningar. Ett annat exempel där riktningsskarakteristiken är viktig är vid tal; ljud med mycket lågfrekvent innehåll (exempelvis bokstäverna o, u och å) sprids åt alla håll, medan ljud med mycket högfrekvent innehåll (speciellt bokstaven s) är riktat rakt fram. Testa på varandra.

¹⁶ Man använder så kallade Bessel-funktioner.

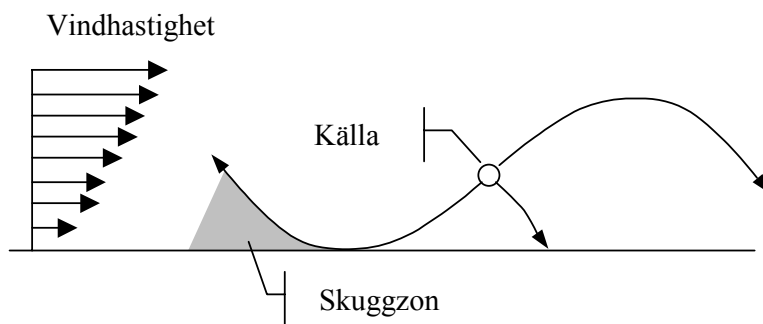


Figur 21 Exempel på strålningsdiagram, för höga respektive låga frekvenser.

3.3 LJUDUTBREDNING UTOMHUS

3.3.1 Vind

När man är utomhus inverkar vinden på olika sätt på ljudets utbredning. De flesta av oss har nog märkt att ljud uppfattas bättre med vinden än mot vinden. Detta kan förklaras på följande sätt. Ett ljud fortplantas i en luftström med en hastighet som är vektorsumman av vindhastigheten v och ljudhastigheten c . I vindriktningen blir fortplantningshastigheten alltså $c + v$ medan mot vinden blir det $c - v$. Vindhastigheten v varierar emellertid med höjden över marken. Längst ned hindras rörelsen av föremål och markfriktion, och den ökar sedan på ett oregelbundet sätt med ökande höjd. Som en följd av denna höjdvariation svängs en vågfront i vindriktningen nedåt mot marken. I den motsatta riktningen böjs den uppåt, och det uppstår på så sätt en skuggzon i riktning mot marken, se Figur 22.

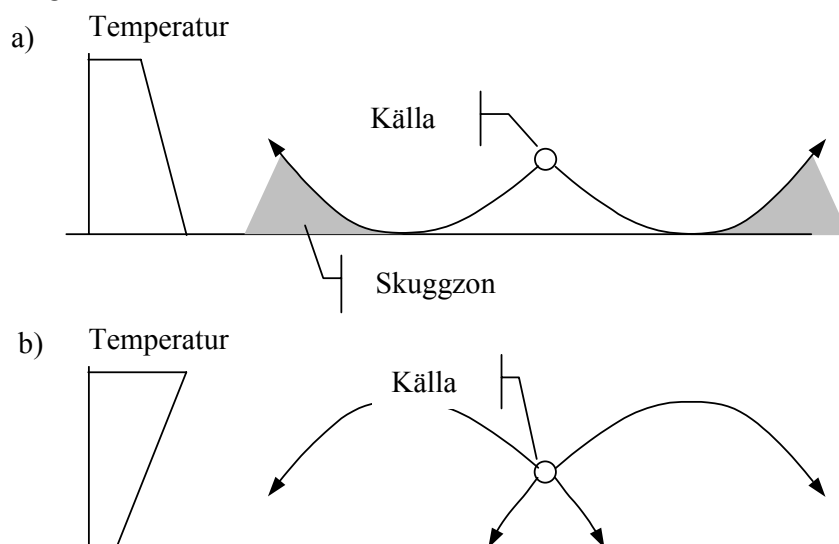


Figur 22 Vindriktningens inflytande på ljudets spridning.

Vinden har även en annan inverkan. Vinden är inte en stationär strömning med konstant hastighet, utan den innehåller stora och små virvlar, så kallad turbulens. Turbulensens inverkan på ljudet är att den sprider ljudet i olika riktningar, och därför utbreder sig inte lika mycket ljud rakt fram i utbredningsriktningen. Ljudnivåminskningen på grund av turbulens är 4-6 dB/100 m, och är oberoende av vindriktningen men blir desto påtagligare ju större vindhastigheten är.

3.3.2 Temperatur

Även temperaturen spelar in på ljudutbredningen utomhus. Ljudhastigheten ökar med lufttemperaturen. Detta innebär att när luften är varmare vid marken än högre upp böjer en vågfronten uppåt, varvid en skuggeffekt uppkommer. Omvänt uppkommer gynnsamma utbredningsförhållanden då luften är kallare vid markytan än högre upp, på grund av att ljudfronten böjer av nedåt, se Figur 23. En kall vinternatt hörs ljudet långt i motsats till en varm sommardag.



Figur 23 Temperaturfördelningens inverkan på ljudets spridning. a) minskande temperatur med höjden, b) ökande temperatur med höjden

I verkligheten inverkar både vind- och temperaturgradienter på ljudets utbredning, men vindberoendet dominerar över temperaturberoendet.

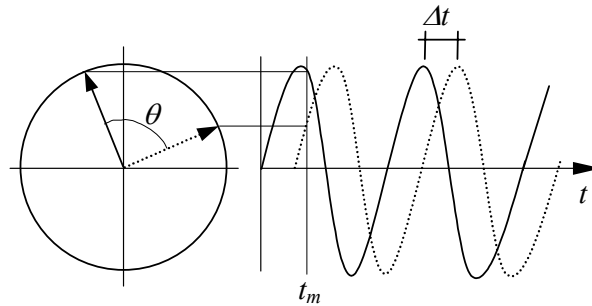
3.4 FLER ÄN EN KÄLLA

I många situationer räcker det inte att betrakta en källa, utan man måste lägga ihop flera källors signaler. Förutom de uppenbara fallen med flera faktiska källor, gäller detta även när man betraktar vad som händer när ljudutbredningen kommer i kontakt med begränsningsytor.

Då ljudtrycksnivån är en logaritmisk storhet kan man inte direkt addera två källors ljudnivåer. Om vi tar två källor som var och anger en ljudtrycksnivå på 60 dB på en meters avstånd så blir inte deras sammanlagda ljudtrycksnivå 120 dB, utan som vi ska se något helt annat.

3.4.1 Fas

När två ljudsignaler befinner sig i samma position och därför ska läggas ihop, blir det viktigt att veta vad begreppet *fas* står för. I Figur 24 visas en tidsfördröjning mellan två sinussignaler med samma frekvens (rena toner). Tidsfördröjning kan beskrivas med att sinussignalerna passerar nollan vid olika tidpunkter. I Figur 24 finns även en enhetscirkel med två visare. De båda sinussignalerna kan här beskrivas som respektive visarens höjd på y-skalan (projektion). Tidsfördröjningen kan då beskrivas med vinkeln mellan visarna, och denna vinkel benämns *fasvinkel*. Om fasvinkeln är π rad så betyder det att de båda signalerna har olika tecken men är i övrigt lika stora. Om fasvinkeln är $\pi/2$ rad så betyder det att den ena signalen är en sinus medan den andra en cosinus.



Figur 24 Två sinustoner fasförskjutna tiden Δt , vilket i ett visardiagram motsvarar vinkeln θ . Med fasskillnad menar vi vinkeln θ .

Ett exempel på en fasskillnad (eller tidsfördröjning) i de fall som vi nu studerar är då en plan våg (för en ton) utbreder sig. Enligt ekvation (7) kan man beskriva denna våg som en sinusfunktion,

$$p(t, r) = A \sin(\omega t - \omega x/c)$$

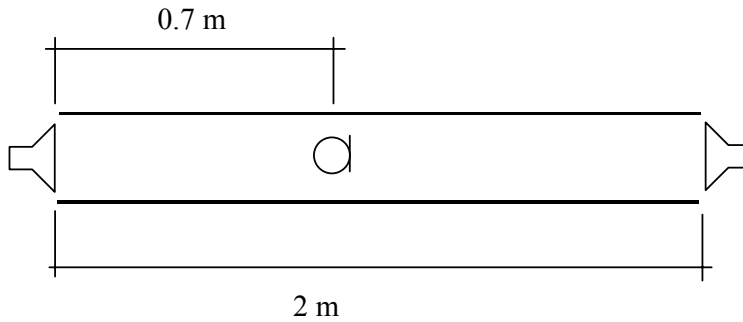
Om vi håller tiden stilla och betraktar två positioner i samma våg (exempelvis $x=0$ och $x=r_1$), så ser man att dessa båda positioner är fasförskjutna till varandra med vinkeln $\theta = -\omega r_1/c$ (enheten är radianer). På samma sätt är det om man har två källor (i detta fall plana) vars ljudtryck i en punkt ska läggas ihop; man måste beakta fasskillnaden på grund av de olika avstånden till respektive källa, och fasskillnaden blir

$$\theta = \frac{\omega \Delta r}{c} \quad (9)$$

Ökande avståndsskillnad ger ökande fasvinkel, och motsvarande gäller också för frekvensen – ökande frekvens ger ökande fasvinkel.

Exempel

I rör har man plan vågutbredning. Vi har ett rör med två högtalare enligt figuren. Högtalarna spelar upp en ton med frekvensen 100 Hz. Hur stor är fasskillnaden i mikrofonpositionen?



Vi antar att luftens våghastighet är 340 m/s. Avståndsskillnaden är $\Delta r = (2 - 0.7) - 0.7 = 0.6 \text{ m}$

Fasvinkeln blir då

$$\theta = \frac{\omega \Delta r}{c} = \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 0.6}{340} = 1.11 \text{ rad}$$

Utgående från 100 Hz, hur mycket ska vi höja frekvensen för att få $\theta = \pi$? Detta är intressant eftersom de båda signalerna då är i motfas – de är lika stora men har olika tecken (och utsläckning sker i punkten).

Vi flyttar runt lite i ekvation (9) och får

$$f = \frac{\theta c}{2\pi \Delta r} = \frac{\pi \cdot 340}{2\pi \cdot 0.6} = 283.3 \text{ Hz}$$

3.4.2 Addition av ljudtryck

Vi sa inledningsvis att det inte är helt lätt att addera ljudtrycksnivåer, men man kan alltid addera ljudtrycken $p(t)$. Vi tänker oss två källor som var och en ger upphov till ljudtryck $p_1(t)$ och $p_2(t)$ i en viss mottagarposition. Om båda källorna är påslagna samtidigt så kommer man att få ett ljudtryck $p_{tot}(t)$ som är summan av de båda ljudtrycken,

$$p_{tot}(t) = p_1(t) + p_2(t).$$

För att kunna bestämma ljudtrycksnivån måste vi först utgå från ljudtryckens rms-värde, ekvation (3 i kap. 2). Att verkligen räkna ut rms-värdet kan vara komplicerat då de båda ljudtrycken $p_1(t)$ och $p_2(t)$ kan vara komplicerade funktioner av tiden, som ska integreras för att få rms-värdet (dock inget problem i en dator). Vi kan dock utföra integrationen formellt och studera resultatet. Gör vi det får vi

$$\tilde{p}_{tot}^2 = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} [p_1(t) + p_2(t)]^2 dt = \tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2 + \frac{2}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} p_1(t)p_2(t) dt \quad (10)$$

Den tredje termen är ett mått på hur lika de båda signalerna är varandra, vilket inom statistiken kallas *korrelation*. Utgående från denna tredje term kan vi identifiera tre extremfall: okorrelerade källor, identiska källor och identiska men fasvända källor (det vill säga med negativt tecken).

I de flesta sammanhang då buller orsakas av mer än en källa, exempelvis buller från maskiner i en verkstad, kan källorna antas vara statistiskt *okorrelerade* (de har inte med varandra att göra), varför den tredje termen i (10) blir noll. Vi finner då att rms-värdet blir

$$\tilde{p}_{tot}^2 = \tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2, \quad (11)$$

och ljudtrycksnivån för den sammanlagda signalen blir

$$L_{p,tot} = 10 \log \left(\frac{\tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2}{p_{ref}^2} \right) \text{ dB}.$$

Om de båda källorna är lika starka blir ökningen $10 \log 2 \approx 3$ dB. Från ekvation (11) och ekvation (4 i kap. 2) kan man härleda följande additionsregel för nivåer av okorrelerade källor

$$L_{p,tot} = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{L_{p,n}/10} \text{ dB} \quad (12)$$

Additionsregeln kan illustreras med följande exempel.

Exempel

Till ett kontor ska man köpa in två kontorsmaskiner. På ett visst avstånd från maskinerna ger respektive maskin 45 dB och 47 dB. Man vill veta hur hög ljudnivån är om båda maskinerna är påslagna samtidigt.

Vi antar att bullerkällorna kan adderas okorrelerat. Vi 'antilogaritmerar' först, $10^{45/10} \approx 31600$ och $10^{47/10} \approx 50100$, och räknar sedan ut den sammanlagda nivån,

$$L_{p,tot} = 10 \log(10^{45/10} + 10^{47/10}) \approx 10 \log(81700) = 49.1 \text{ dB}$$

Addition av okorrelerade källor är det samma som om man adderar ljudets energistorheter som intensitet eller effekt. Denna typ av addition kallas därför också för *effektaddition*.

Om vi antar att de båda källorna ger upphov till identiska ljudtryck så får vi en helt annan situation. Detta fall är givetvis inte vanligt i bullersammanhang, men kan åstadkommas med två högtalare som drivs av samma signal, eller vid reflexion i en hård yta. I detta fall är rms-värdet

$$\tilde{p}_{tot}^2 = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} [2p_1(t)]^2 dt = 4\tilde{p}_1^2 \quad (13)$$

och ljudnivån blir för detta fall därför

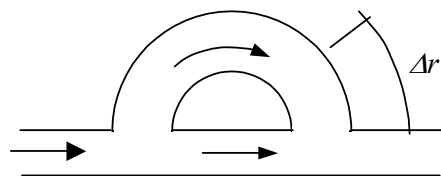
$$L_{p,tot} = L_{p,1} + 10 \log 4 \approx L_{p,1} + 6 \text{ dB} \quad (14)$$

Ljudnivån ökar således 6 dB. Detta fall kallas också *konstruktiv interferens*, de båda signalerna samverkar maximalt.

Om vi antar att de båda källorna ger upphov till identiska ljudtryck men med olika tecken, det vill säga att ljudtrycken är fasvända i förhållande till varandra, så får vi *destruktiv interferens*, total utsläckning. Destruktiv interferens utnyttjas ibland vid så kallad aktiv bullerbekämpning, där man sänder ut "motljud" för att släcka ut en bullerkälla.

Exempel

I ett ventilationssystem som du ska konstruera finns en ton som ska släckas ut med motljud. Tonen ligger vid frekvensen 500 Hz, hur mycket längre ska en omväg Δr vara för att man ska få destruktiv interferens?



För destruktiv interferens ska fasvinklen vara $\theta = \pi$. Det ger

$$\Delta r = \frac{\theta c}{\omega} = \frac{\pi \cdot 340}{2\pi \cdot 500} = 0.34 \text{ m}$$

Detta är ett exempel på passivt motljud. Ibland använder man också aktivt motljud; man sänder ut motljud från en högtalare.

3.4.3 Ton eller brus?

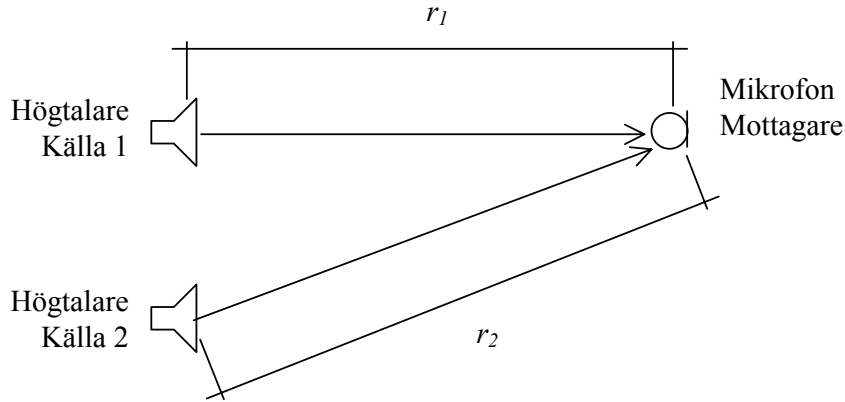
Vi har sett att om ljudtrycket från flera olika källor adderas så behöver man veta fasläget för de olika komponenterna, och dessa medför att ljudtrycken kan förstärka varandra eller motverka varandra. I allmänhet kan man använda beräkningarna för ren ton endast i mycket enkla fall – faslägena och amplituderna måste vara kända med större noggrannhet ju mera dessa komponenter motverkar varandra, annars tar beräkningsfelen överhand. Man kan säga att interferensen förvillar situationen. Man brukar därför mäta och studera brus, det vill säga många frekvenskomponenter samtidigt. Som tidigare nämnts så studerar man brus med hjälp av filter i frekvensband, svarande mot ett medelvärde av olika frekvenser då man använder rms-värden. Alltså, istället för tidsmedelvärde får man ett frekvensmedelvärde,

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_u}^{f_o} |p|^2 df. \quad (15)$$

Anledningen till att mätningarna blir bättre med brus är att brus innehåller flera frekvenser samtidigt. Varje enskild frekvens ger upphov till sitt interferensmönster, men när alla frekvenser läggs ihop tar dessa i medeltal ut varandra. Desto bredare frekvensband (Δf) bruset innehåller, desto mindre märks interferensen. Man kan också jämföra med korrelerad och okorrelerad addition - brus leder till okorrelerade addition medan ton leder till korrelerad addition och därmed interferens.

3.4.4 Två sfäriska källor

Det är nu dags att försöka lägga ihop ljudet från två sfäriska källor, se Figur 25. Vi kan till en början tänka oss att de två sfäriska källorna spelar upp samma signal. Färförhållandet för olika positioner kommer då att ge upphov till fält med omväxlande utsläckning och förstärkning av ljudnivån, ett interferensmönster, ett fenomen typiskt för all vågutbredning.



Figur 25 Två sfäriska källor

Vi börjar med att se vad som händer då källorna spelar upp en ton. Bidragen från de båda källorna läggs ihop i varje punkt,

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = A \frac{\sin(\omega t - \omega r_1/c)}{r_1} + B \frac{\sin(\omega t - \omega r_2/c)}{r_2} \quad (16)$$

På grund av fasskillnaden mellan signalerna och därmed interferensen kommer ljudets amplitud att variera beroende på vilken position och frekvens som vi har valt. Ett exempel på detta får man om man spelar upp en relativt hög ton i ett rum. Genom att bara flytta huvudet lite hör man tydligt skillnaden i ljudets styrka. Om man i en sådan situation försöker mäta upp något mer övergripande fenomen (exempelvis avståndsberoendet som vi fann i vårt experiment), kommer detta att druckna i interferensmönstret.

Kommer dessa problem att minska när man bestämmer ljudtryckets rms-värde? Som tidigare har sagts (se kapitel 2), rms-värdet fås genom att först kvadrera, sedan ta medelvärde över tiden, samt sist ta roten ur. Utför man kvadreringen och medelvärdesbildningen för det aktuella fallet, får man

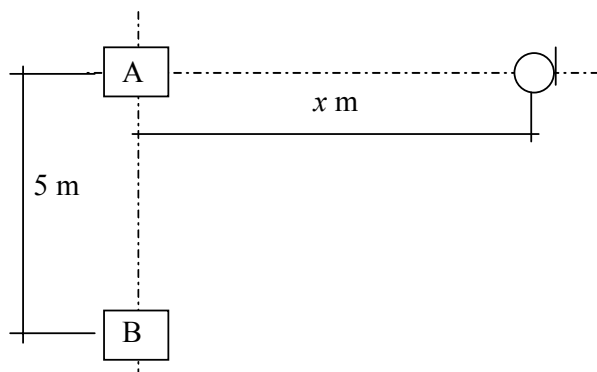
$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{2} \frac{A^2}{r_1^2} + \frac{1}{2} \frac{B^2}{r_2^2} + \frac{AB}{r_1 r_2} \cdot \cos(\theta) \quad (17)$$

där $\theta = \Delta r \omega / c$ liksom tidigare är fasvinkeln på grund av olika gångväg. De två första termerna är respektive källas rms-värde. Den tredje och sista termen motsvarar korrelationstermen i ekvation (10). Beroende på fasvinkeln kan cosinustermen anta både positiva och negativa värden, och de negativa värdena kan ta ut de båda andra termerna. Alltså kvarstår hela problematiken.

För att minska inverkan av interferensen använder man sig istället av bredbandigt brus. Dessutom är många källor bredbandiga av sig själva, exempelvis trafikbuller. Om de båda källorna spelar upp olika brussignaler kan vi direkt använda oss av formlerna för okorrelerade källor, ekvation (12). I vissa fall är detta dock inte fallet, exempelvis när man har en reflektion i en hård yta, vilket kommer att diskuteras i nästa avsnitt.

Exempel

Till en maskinhall ska man köpa in två maskiner. Enligt specifikation från tillverkaren ger maskin A ifrån sig 100 dB(A) 1 m från maskinen, medan maskin B ger ifrån sig 105 dB(A) mätt på avståndet 1 m. Bullret är bredbandigt och utan toner. Maskinhallen är hög och dämpad, så vi kan anta sfärisk utbredning. På vilket avstånd, x i figuren, kan vi förvänta oss 85 dB(A), och därmed klara Arbetsmiljöverkets rekommendation?



Vi kan anta okorrelerad addition. Vi vet att

$$L_A = 100 - 20 \log(x/1),$$

$$L_B = 105 - 20 \log(\sqrt{x^2 + 5^2}/1)$$

Alltså, om vi använder additionsregeln för okorrelerade källor, erhålls följande ekvation,

$$10 \log \left(10^{10 - 2 \log(x)} + 10^{10.5 - 2 \log(\sqrt{x^2 + 5^2})} \right) = 85 \text{ dB}$$

Med hjälp av passräkning visar det sig att avståndet är $x = 10.7 \text{ m}$.

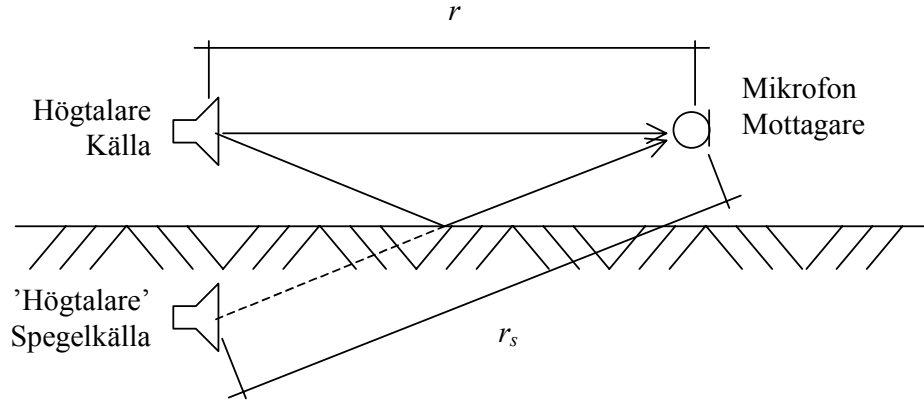
3.5 VAD HÄNDER OM MAN FÖR IN BEGRÄNSNINGSYTOR?

Det är nu dags att fråga sig vad som händer med ljudutbredningen när den möter olika begränsningsytor. Två fenomen är här tydliga; förhållandet mellan geometrins mått och våglängden λ är nästan alltid viktigt, och interferensfenomen är viktiga.

3.5.1 Interferens i markplanet och andra plana ytor

Om man placerar en högtalare och en mikrofon ovanför en reflekterande plan yta i närheten av källan, se Figur 26, uppstår en reflektion vid planet. Man kan ta bort planet om man

ersätter reflexen med en precis likadan källa i spegelpunkten. Ljudet i mottagarpunkten blir således sammansatt av ljudet från två sfäriska punktkällor.



Figur 26 Ljudreflex i hård mark

Man ser att signalen från spegelkällan kommer att färdas en längre sträcka än signalen från ursprungskällan för att nå mottagaren, $r < r_s$, och därmed kommer enligt tidigare resonemang de båda signalerna att interferera med varandra på grund av fasskillnaden orsakad av gångvägen. Adderas ljudtrycken för två sfäriska källor med ren ton, och källstyrkorna är lika, så får man

$$p(t, r) = A \left(\frac{\sin(\omega t - \omega r/c)}{r} + \frac{\sin(\omega t - \omega r_s/c)}{r_s} \right),$$

jämför med ekvation (16), och rms-värdet blir följaktligen,

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{2} A^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_s^2} \right) + \frac{A^2}{r \cdot r_s} \cdot \cos(\theta), \quad (18)$$

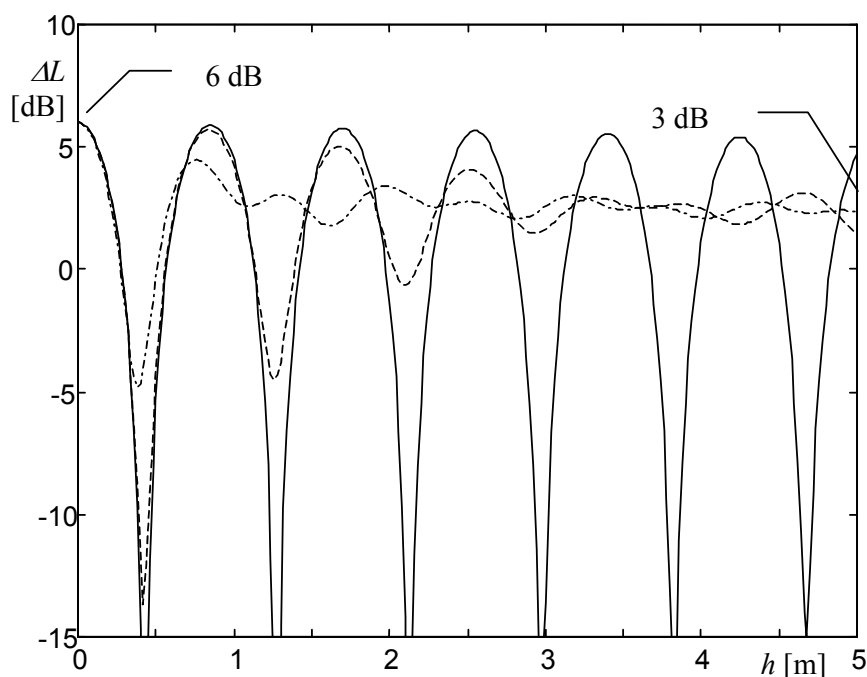
där $\theta = \Delta r \omega / c$ liksom tidigare är fasvinkeln på grund av olika gångväg. Även i detta fall har man interferens. Men om man istället använder sig av brus – och därmed frekvensmedelvärde enligt ekvation (15) – så kan man få inverkan av interferens att minska. Frekvensen finns bara i fasvinkeln θ , och därmed verkar frekvensmedelvärde bara på denna term,

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{2} A^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r_s^2} \right) + \frac{A^2}{r \cdot r_s} \cdot \frac{1}{\Delta f} \int_{f_u}^{f_o} \cos(\theta) df. \quad (19)$$

Resultatet av integralen är lätt att räkna ut, men det fyller inget syfte att skriva ut den här. Vad man kan konstatera är dock att man får en funktion som har värdet ett för små Δr , och som sedan sjunker mot noll när Δr blir stor. Hur snabbt funktionen sjunker mot noll beror på hur stort frekvensband bruset innehåller – för smala band sjunker den mycket långsamt medan för breda band sjunker den snabbt. Vi illustrerar istället fenomenet med en bild. I Figur 27 visas ljudnivå framför en reflekterande yta för ett specifikt val av data¹⁷. På y-axeln har vi

¹⁷ Mittfrekvensen valdes till 200 Hz, varvid våglängden (för mittfrekvensen) blir 1.7 m. Källan sitter på ett avstånd av 60 m från den reflekterade ytan, och mätpositionen ligger i linjen ortogonalt från ytan till källan.

ljudnivån normerad på det infallande ljudet (så som ljudet skulle ha varit utan reflekterande yta). På x-axeln har vi mottagarens (mikrofonens) avstånd till ytan.



Figur 27 Interferensmönster framför fasad, heldragen (—) smalband, streckad (---) tersband, punkt-streckat (-.-) oktavband.

Vid mätning nära stora ytor, till exempelvis invid en fasad vid trafikbullermätning, bör man mäta alldeles intill ytan så att man vet att resultatet är precis 6 dB över ljudnivån för den infallande vågen. Resultatet blir annars osäkert eftersom man inte vet om man har hamnat i en interferensbuk eller -topp. Ljudnivån för den infallande vågen kallas också *frifältsvärde* eller *nivå i fritt fält*, det är det värde man skulle ha haft i ett fritt fält. Alternativt kan man mäta så långt ut och med så brett frekvensband att man kan vara säker på att interferensen har jämnat ut sig, i Figur 27 cirka 1.5 m för oktavbandet medan 3 m för tersbandet i det aktuella exemplet. Här är resultatet 3 dB över ljudnivån för den infallande vågen. För ren ton eller mycket smalt band minskar interferensen aldrig, vilket kan ses i den heldragna kurvan.

Exempel

Som trafikingenjör ska du mäta trafikbuller i befintlig bebyggelse. Var ska du mäta?

Trafikbullret är bredbandigt. Därför, antingen mäter du med mikrofonen klistrat mot ett fönster och drar bort 6 dB från resultatet, eller så mäter du några meter ifrån väggen och drar bort 3 dB. Det första alternativet är säkrast.

Hittills har vi diskuterat vad som händer när den reflekterande ytan är hård, allt ljud reflekteras. I många fall kommer dock en viss del av ljudet att försvinna vid reflexionen (*absorberas*). Ett exempel på en sådan yta är gräsbevuxen mark. Vid ljudutbredning utomhus benämner man detta för *mjuk mark*. Då en ljudvåg reflekteras mot en plan absorberande yta

måste man på något sätt minska spegelkällans effekt, och därmed rms-värde. Vi kallar denna faktor ρ (observera att denna beteckning även används för densitet), definierat som kvoten mellan reflekterad ljudeffekt och infallande ljudeffekt,

$$\rho = \frac{\Pi_{ref}}{\Pi_{in}},$$

där Π_{ref} är reflekterad ljudeffekt,
 Π_{in} är infallande ljudeffekt.

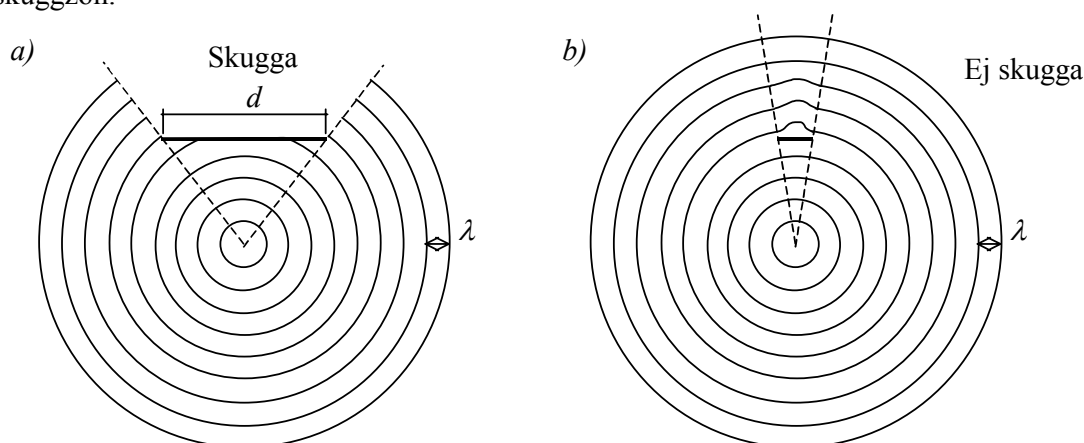
Då man minskar spegelkällans utstrålade effekt med ρ , så får man ett rms-värdet som

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{2} A^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{\rho}{r_s^2} \right) + \frac{\rho A^2}{r \cdot r_s} \cdot \cos(\theta).$$

Om all effekt absorberas i planet, det vill säga $\rho=0$, får man inget bidrag från spegelkällan, medan om ingen effekt absorberas i planet, $\rho=1$, får man tillbaka uttrycket för hård yta, ekvation (18).

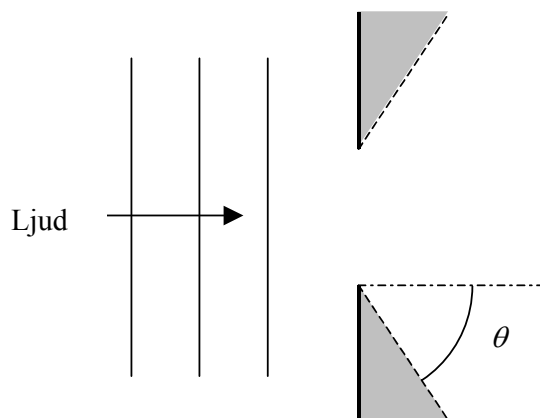
3.5.2 Diffraction

När ett hinder för vågen är stort i förhållande till våglängden, kommer vågen inte att nå alla punkter bakom hindret, som alltså kastar en skugga på samma sätt som en skärm som placeras framför ett ljusflöde. Skuggan blir skarp endast om föremålets dimensioner är mycket stort i förhållande till våglängden. Små föremål kastar däremot praktiskt taget ingen skugga, se Figur 28. Detta beror på den allmänna egenskapen hos vågrörelsen, som betecknas *diffraction* eller böjning; fortplantningsriktningen ändras då en våg träffar ett föremål – den kan alltså gå runt hörn. Diffraction förekommer vid alla typer av vågutbredning, exempelvis vattenvågor. Å ena sidan berörs vattenvågor inte synbart av en tunn förtöjningspåle nedslagen i vattnet, utan vågen fortskrider som om pålen inte existerade. Å andra sidan vet vi att bakom en vågbrytare i en hamnbassäng eller en utstickande landtunga bildas en zon utan vågor, en skuggzon.



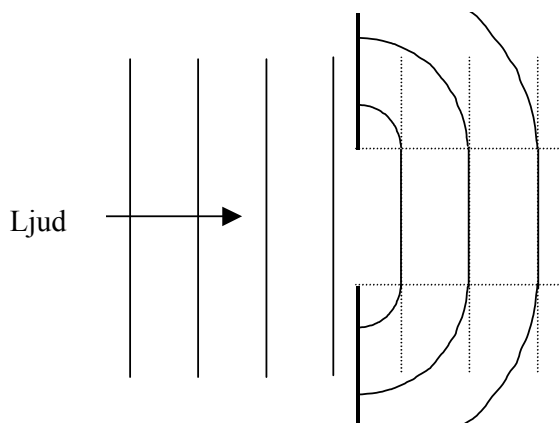
Figur 28 Skuggbildning, i a) är $d > \lambda$ medan i b) är $d < \lambda$

Om en plan ljudvåg faller in vinkelrät mot en stor skärm (med hög ljudisolering) som har en öppning i form av en springa eller slits, kan enligt *Huygen's princip*¹⁸ varje punkt i slitsen betraktas som centrum för en sekundär ljudvåg, och dessa punkter kallar vi *sekundärkällor*.



Figur 29 Diffraktion vid en slitsöppning, skuggor

Sekundärkällorna kommer att ömsom samverka med varandra och ömsom motverka varandra, det vill säga de kommer att interferera. Utanför en viss vinkel, θ i Figur 29, kommer sekundärkällorna ofta att motverka varandra och vi får utsläckning, en skugga. Innanför θ kommer sekundärkällorna ofta att samverka med varandra, och här fortsätter vågen att fortplanta sig. Rakt framför slitsöppningen kommer sekundärkällorna att samverka så att vågfronterna även fortsättningsvis är plana, se Figur 30. Om slitsöppningen är liten i förhållande till våglängden så kommer den plana delen att vara mycket liten och till och med försumbar, vågen kommer då att utbreda sig cylindriskt.

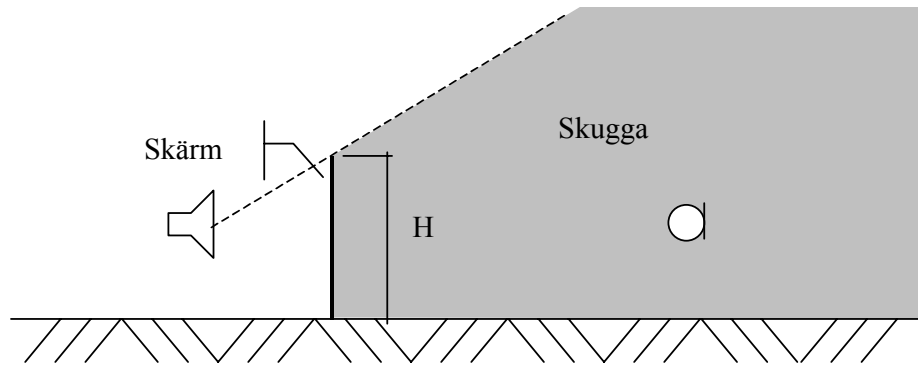


Figur 30 Diffraktion vid en slitsöppning, vågfronter

3.5.3 Bullerskärmar

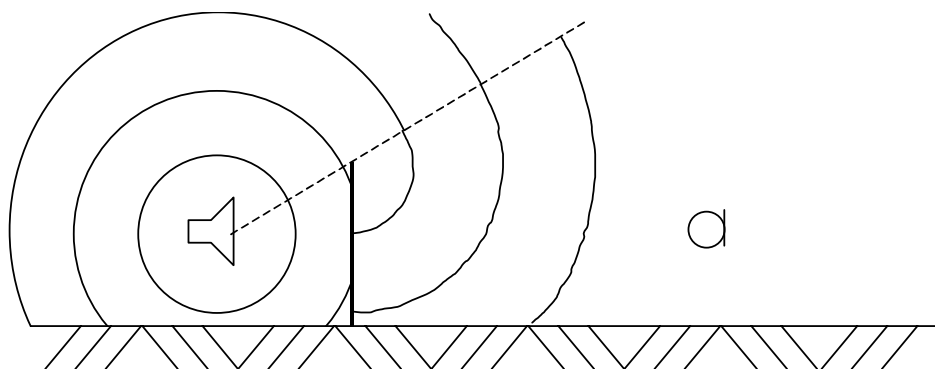
Ofta försöker man minska ljudet från en ljudkälla genom att sätta upp en skärmvägg mellan källan och mottagaren. Men hur fungerar bullerskärmar? För ljud med mindre våglängd än skärmens dimensioner kan skärmens skuggbild ritas geometriskt, se Figur 31.

¹⁸ Huygen's princip säger att 'varje punkt på en vågfront kan beskrivas som centrum för en sekundär våg. Den nya positionen av vågfronten utgörs av tangenten till dessa elementärvågor'.



Figur 31 Skärm och geometrisk skugga

Högre skärm ger mer skugga och bättre skärmning, placeras skärmen nära källan fås mer skugga och bättre skärmning, placeras skärmen nära mottagaren fås också bra skärmning. Att ljud ändå når mottagaren beror på diffraktionen, ljudet kröker runt krönet, se Figur 32. Diffraktionen blir mer dominant för låga frekvenser, då våglängden stämmer överens med skärmens dimensioner. Alltså fungerar bullerskärmar bättre vid höga frekvenser än vid låga.



Figur 32 Diffraktion runt skärm

3.6 LJUDUTBREDNING I RUM

3.6.1 Beskrivning av experiment, i rum

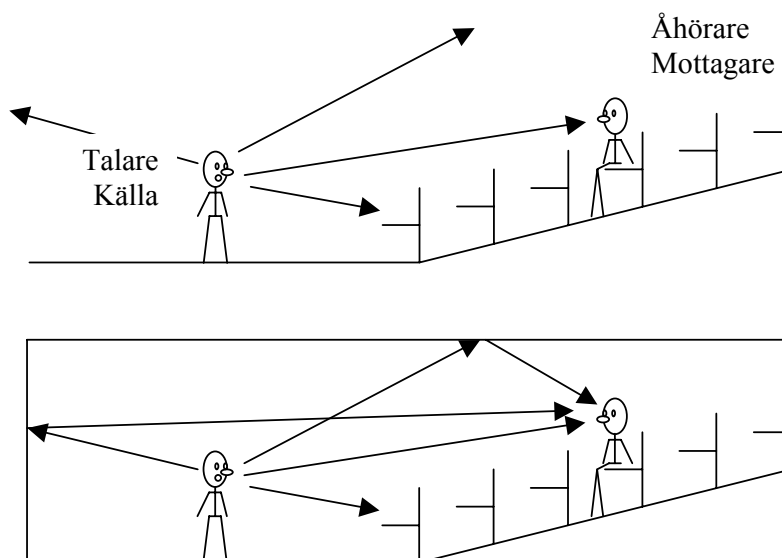
Experiment som beskrevs tidigare utfördes inte i ett fritt fält, utan i ett rum. Om man ser lite mer noggrant på mätresultaten, Figur 19, ser man att endast de första mätpunkterna (närmast källan) stämmer med avståndslagen för sfärisk utbredning. I regressionen som gjordes användes därför endast dessa punkter. De mätpunkter som ligger lite längre ifrån källan har inte lika brant lutning som de första. Kurvan börjar plana ut.

Slutsatsen man kan dra av denna del av experimentet är att i ett rum gäller avståndslagen nära källan, ekvationerna (1) och (5), men att rummets begränsningsytor och störande föremål därefter börjar spela in.

3.6.2 Hur sprider sig ljud - i rum?

För att närma oss de fenomen som uppstår då ljudutbredningen sker i ett slutet rum istället för i ett fritt fält eller utomhus med få begränsningsytor, ska vi diskutera skillnaderna och likheterna mellan en teater inomhus och utomhus. Hur ljud sprider sig i rum – *rumsakustik* – kommer att behandlas vidare i kapitel 5.

Då man är utomhus, exempelvis i en friluftsteater utan skärmanordningar, fortplantar sig ljudet till åhöraren direkt genom luften, *direktljud*. Här gäller som vi har sett avståndslagen, att trycknivån faller med 6 dB vid avståndsfördubbling. De akustiska förhållandena i en friluftsteater är relativt okomplicerade – allt hänger på avståndet mellan talare och lyssnare och på yttre störningar. När man i en inomhusteater lyssnar på ett skådespel, eller i en föreläsningssal lyssnar till en föreläsare, får man kanske intrycket av att allt ljudet kommer som direktljud liksom i friluftsteatern – i själva verket tar ljudet i mycket hög grad omvägen över reflekterande rumsytor innan det når fram till åhörarplatsen, se Figur 33.



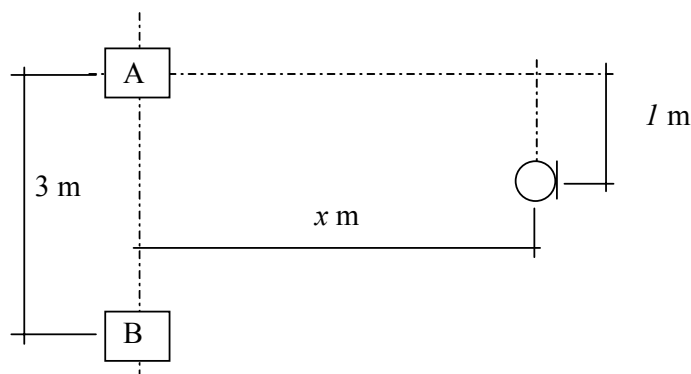
Figur 33 Ljudets spridning från en talare utomhus och inomhus

På platserna längst bak i en stor sal är det i princip bara reflekterat ljud som avlyssnas. Sådant ljud kallas *reflexljud* eller *efterklangsljud*. Tack vare reflexljudet kan man i ett slutet rum nå en acceptabel uppfattbarhet för omkring 1500 personer utan förstärkningsanläggningar. I närheten av källan kommer dock direktljudet att dominera över efterklangsljudet. Detta betyder att vid ett visst avstånd från källan så kommer direktljudet och efterklangsljudet att vara lika stora. Detta avstånd från källan kallas direktfältsradie, och den bestäms av rummets volym och dess dämpning.

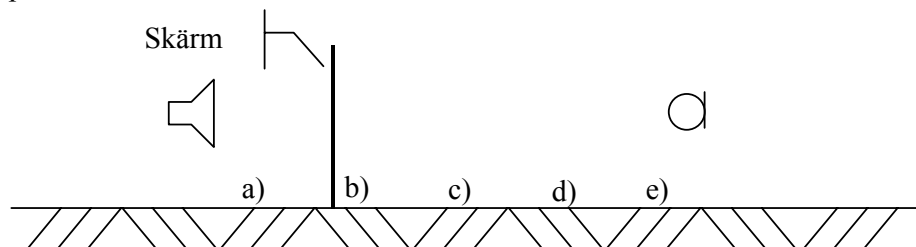
De antika friluftsteatrarna anses allmänt ha en god akustik. Detta beror på en kombination av olika orsaker, exempelvis att de ofta ligger i tysta omgivningar och att lutningen på slutningen är så brant att man upplever att man är längre bort än var man i verkligheten är.

3.7 ÖVNINGSUPPGIFTER

1. Ljud utbreder sig sfäriskt från en källa. Hur förändrar sig ljudtrycksnivån när avståndet till källan fördubblas? Vad hade hänt om ljudet spridit sig som en plan våg?
2. En ljudkälla ger ifrån sig 0.1 W ljudeffekt i 500 Hz tersbandet. Hur stor är ljudtrycksnivån 2 m från källan om vi antar sfärisk utbredning? Luftens densitet är 1.2 kg/m^3 .
3. I ett kontor har man två kontorsmaskiner. På ett visst avstånd från maskinerna ger respektive maskin 30 dB och 31 dB. Man ska köpa en maskin till och placera på samma plats som de två övriga. Hur hög är ljudnivån får den nya maskinen ha vid samma plats om den totala ljudnivån inte får överstiga 35 dB då alla maskinerna är påslagna samtidigt?
4. När man mäter ljudisolering har man ibland problem med att bakgrunds-nivån (från olika bullerkällor) riskerar att påverka mätresultatet. Hur mycket lägre än signalnivå måste bakgrunds-nivån vara för att inte påverka resultatet? Ett fel på 0.1 dB är ok.
5. Till en maskinhall ska man köpa in två maskiner. Enligt specifikation från tillverkaren ger maskin A ifrån sig 97 dB(A) 1 m från maskinen, medan maskin B ger ifrån sig 102 dB(A) mätt på avståndet 1 m. Bullret är bredbandigt och utan toner. Maskinhallen är hög och dämpad, varför vi kan anta sfärisk utbredning. På vilket avstånd, x i figuren, kan vi förvänta oss 85 dB(A), och därmed klara Arbetsmiljöverkets rekommendation?



6. Ljud utbreder sig sfäriskt från en källa, men källan befinner sig ovanför en hård yta (kanske asfalt). Hur skiljer sig resultatet i detta fall mot fallet i den första frågan?
7. Av positionerna a) till e) i figuren, var är det effektivast att placera en skärm? Vilken position är näst bäst? Motivera varför.



4 LJUDISOLERING

4.1 LJUDISOLERING - INTRODUKTION

Ljudisolering mellan lägenheter har under snart 50 år intresserat forskare i världen. Gray et al.¹⁹ gjorde under 50-talet en undersökning av trivseln i lägenheter med olika ljudisoleringsnivåer. Många var de som klagade på störande grannar i de sämst isolerade lägenheterna. I slutet av 50-talet gjorde också Eijk²⁰ en uppmärksammat artikel med rubriken ”My Neighbour’s Radio”. Där beskriver Eijk dels hur man ska kunna mäta varierande ljudnivåer men också om det faktum att en radio som står på hela dagarna kommer att störa grannarna om ljudisoleringen är otillräcklig.

Med tanke på utvecklingen från 50-talets radioapparater till dagens stereoapparater är det inte konstigt att intresset för ljudisolering fortfarande är stort, inte bara för forskare utan även för samhället i stort. I dag ställs krav på hur mycket ljud som får höras mellan lägenheter. Det finns också möjligheter att klassificera ett hyreshus i olika ljudklasser för att marknaden själv ska kunna styra byggandet mot lägenheter med bättre ljudisolering för dem som så önskar. Ljudisolering kan numera vara ett konkurrensmedel för fastighetsägare.

Nu kommer som bekant inte allt ljud från grannens stereo. Förutom alla ljud som en granne kan uppbunga kommer mycket ljud från andra källor. Bullernivån i en modern stad är ganska hög beroende på framför allt fordonstrafiken men även industrier, nattklubbar och dylikt genererar oönskat ljud. Ljudisolering genom fasaden i fastigheten kommer vi att tala om sist i detta kapitel.

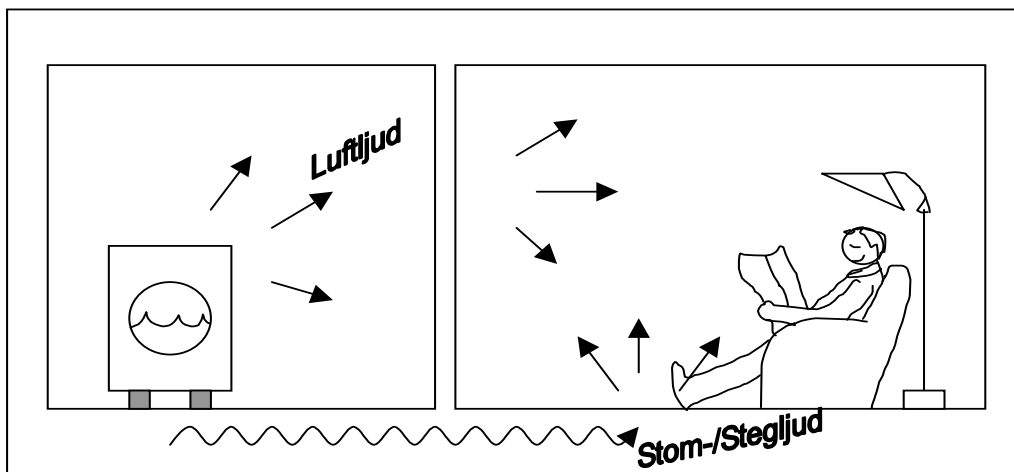
All ljudisolering är inte heller till för att man ska slippa att bli störd. Det finns också många situationer som kräver att man inte blir hörd. Ta t.ex. när du pratar med din läkare, då vore tystnadsplikten inte så mycket värd om alla patienter i närheten kunde höra vad ni säger. I kontorsbyggnader ställs ofta krav på att tal inte ska kunna avlyssnas genom väggarna. Det ljud man i dessa fall vill isolera bort är de informationsbärande frekvenserna, se tidigare avsnitt om tal.

Ljud inuti en byggnad delas upp i några olika kategorier. Indelningen mellan stomljud (exempelvis stegljud) och luftljud är mycket vanlig. Med stomljud menas ljud som alstrats direkt mot stommen genom t.ex. hammarslag eller gående människor. Luftljud är i stället ljud som alstras ut i luften från tal, musik, högtalarljud etc. En annan vanlig grupp är trumljud. Trumljud är det ljud som uppstår i samma rum som man befinner sig och alstras på samma sätt som stomljud, d.v.s. genom exempelvis slag, tappade nycklar eller gång.

Grunderna för att förstå hur ljud går igenom en vägg eller ett golv kommer att behandlas i detta avsnitt. Vi börjar med en formulering om skillnad i ljudenergi på varsin sida en platta, går vidare med mätmetoder och svensk standard för ljudisolering mellan rum och avslutar kapitlet med några praktiska situationer som är vanliga i byggbranschen.

¹⁹ P.G. Gray, A.Cartwright and P.H. Hopkins, Noise in three groups of flats with different floor insulations, 1958

²⁰ J. van der Eijk, My Neighbour’s Radio, 1959



Figur 34 Olika sorters ljud som alstras i en byggnad.

4.2 LJUDISOLERINGSKLASSER

I svensk standard definieras fyra olika ljudklasser. Nedan följer ett utdrag för att ge en uppfattning om vad dessa olika klasser innebär. I bilaga 1 redovisas vilka nivåer på luft- och stegljudsisoleringen som ska uppfyllas för de olika klasserna.

Följande ljudklasser används:

Ljudklass A: Ljudklassen motsvarar mycket goda ljudförhållanden.

Ljudklass B: Ljudklassen motsvarar tydligt bättre ljudförhållanden än ljudklass C. Berörda personer kan ändå i vissa fall vara störda. Denna ljudklass är minimikrav om god boendemiljö efterfrågas.

Ljudklass C: Ljudklassen motsvarar ljudförhållanden som tillämpas som minimikrav i svenska byggnader.

Ljudklass D: Ljudklassen motsvarar ljudförhållanden som är avsedda att tillämpas när ljudklass C inte kan uppnås, t. ex. i samband med ombyggnad. Ljudklassen motsvarar ljudförhållanden som kan förekomma i stenhus från sekelskiftet.

En ljudklassning kan variera i tiden, t. ex. om trafiksituationen runt fastigheten förändras eller om åldrande eller slitage förändrar ingående material och konstruktioner. En ljudklassning skall därför åtföljas av datumangivelse. Ljudklasser bör redovisas enligt något av de alternativ som ges i bilaga 1.

4.3 INLEDANDE DEMONSTRATION

Under föreläsningen visas ett experiment där man får uppleva olika sorters ljudisolering. I Figur 35 kan hela uppställningen ses. Uppställningen består av en maskin, en kåpa av mineralull och en kåpa av metall. Metallkåpan har en springa som innan experimentet börjar är täckt med tejp.

Experimentet börjar med att föreläsaren introducerar hur maskinen låter utan isolering. Efter det sätts mineralullskåpan på och alla kan höra hur mycket det dämpar. När mineralullskåpan byts mot stålkåpan upplever de flesta skillnaden mellan att isolera och absorbera bort ljudeffekten.

Anledningen till att stålkåpan ger bättre ljudisolering är att en mycket större del av ljudeffekten reflekteras tillbaka in i kåpan. Mineralullen däremot reflekterar nästan ingen ljudeffekt. Mineralullen absorberar desto mer av den effekt som passerar igenom, detta är dock inte tillräckligt för så tunna skivor som normalt används inom byggnadsindustrin.

Det är däremot en ypperlig idé att kombinera dessa två material, vilket också demonstreras under samma föreläsning. Om mineralullen placeras på insidan av stålkåpan minskar ljudeffekten inuti kåpan mycket mer. Nu utnyttjas nämligen mineralullens absorberande förmåga effektivare. Ljudeffekten kommer nämligen upprepade gånger att passera mineralullsskivan innan den dör ut eller passerar igenom stålkåpan. Mer om absorption kommer i nästa kapitel.

En sista demonstration är nu kvar. Vi har sett skillnaden mellan en absorbents egenskaper och ett isolerande materials egenskaper. Kvar att visa är springläckage. Föreläsaren drar nu bort tejpens på stålkåpan. Den ökning av ljudeffekten som kan höras beror av den lilla springa som inte längre alls isolerar från ljudkällan. I avsnitt "Springläckage" visas ett teoretiskt exempel på små springors förstörande av ljudisolering mellan rum.



Figur 35 Utrustning för experiment i ljudisolering. Kåporna syns underifrån och maskinen står framför stålkåpan med kugghjul och vipplatta som ljudgenererare.

4.4 LUFTLJUDSISOLERING

4.4.1 Transmission och reflektion

När en ljudvåg träffar ett nytt medium störs vågutbredningen av att elasticiteten, densiteten och massan inte är samma i det nya mediet. En del av vågen kommer att reflekteras tillbaka och resterande del kommer att fortsätta in i det nya mediet. Därvid fås två nya vågutbredelser, den reflekterade och den transmitterade. Dessa är relaterade till varandra så att:

$$\Pi_i = \Pi_r + \Pi_t \quad (1)$$

där Π_i är den infallande vågens effekt
 Π_r är den reflekterade vågens effekt
 Π_t är den transmitterade vågens effekt

Detta är bara sant i ideala fall. Normalt sker också effektförluster så att viss del av rörelseeffekten övergår i värme. Sambandet ovan blir då att

$$\Pi_i = \Pi_r + \Pi_t + \Pi_a \quad (2)$$

där Π_a är den effektminskning som sker pga av energiförluster (friktionsvärme etc.).

Den transmitterade effektens andel av den infallande effekten kallas *transmissionskoefficient* och kan skrivas

$$\tau = \frac{\Pi_t}{\Pi_i} \quad (3)$$

4.4.2 Reduktionstal

Det vanligaste begreppet i samband med ljudisolering i byggnader torde vara reduktionstalet. Reduktionstalet definieras som en relation mellan infallande ljudeffekt på ena sidan en vägg och transmitterad ljudeffekt till andra sidan samma vägg. Reduktionstalet anges i decibel [dB]. Reduktionstalet kan följaktligen skrivas:

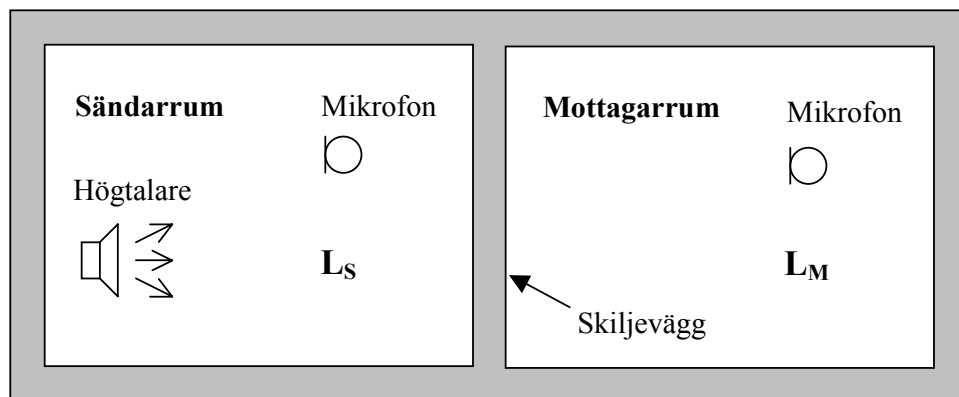
$$R \equiv 10 \cdot \log \left(\frac{\Pi_i}{\Pi_t} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (4)$$

där Π_i och Π_t är väggens infallande respektive transmitterade effekt.

4.4.3 Mätning av luftljudsisolering

I svenska bostäder krävs att man kan upprätthålla en viss ljudisolering från t.ex. grannar och trafikbuller. Som ett led i att kunna kontrollera hur bra ljudisolering som erhållits i en byggnad finns mätmetoder beskrivna i svenska standardverk. I byggreglerna regleras sedan vilken nivå som ska erhållas vid nybyggnation och större renoveringar. Den första viktiga standarden är SS-ISO 140 som beskriver hur en ljudmätning ska utföras.

I korta drag fungerar en ljudmätning så att man placerar en högtalare som sänder ut vitt eller rosa brus i ett rum. Därefter mäter man ljudtrycksnivån i båda rummen. Mätresultaten anges som ett medeltal för ljudtrycksnivån i varje 1/3-dels oktav mellan 50 och 5000 Hz. Reduktionstalet räknas sedan ut med hjälp av ekvation (5) nedan.



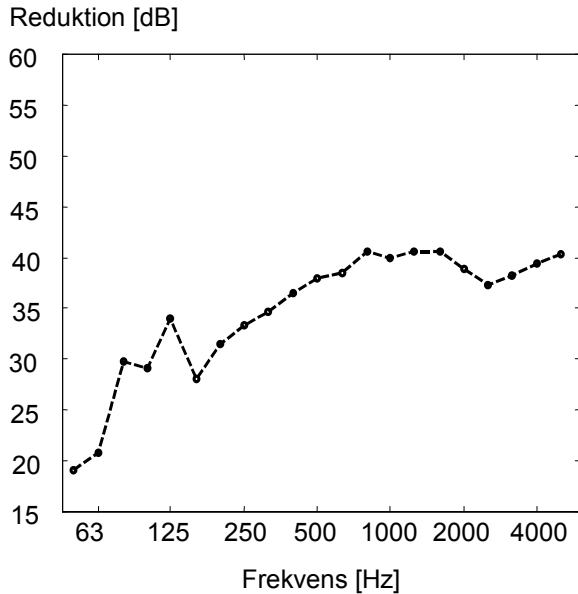
Figur 36 Ljudmätning av skiljevägg. L_s och L_m representerar ljudnivån i sändarrum och mottagarrum.

Förutom transmission direkt genom en vägg kan man tänka sig att ljudeffekten kan ta sig fram andra vägar mellan två rum. Detta kallas *flanktransmission* och kommer att gås igenom mer utförligt i slutet av detta kapitel. I vårt fall mäter vi en vägg och förutsätter att det inte finns någon flanktransmission. Effektkvoten genom väggen kan då beskrivas som ett reduktionstal

$$R = L_s - L_m + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (5)$$

- där
- L är ljudtrycksnivån i sändarrummet [dB] (där vi skapar ljudet)
 - L_m är ljudtrycksnivån i mottagarrummet [dB]
 - S Skiljeväggens area
 - A Absorptionsarea i mottagarrummet (se nästa kapitel om absorption)

Reduktionstalet ska endast försöka beskriva väggens egenskaper, inte rummen, därför har den sista termen i ekvation (5) introducerats. Den sista termen i ekvation (5) anger vilken effekt som absorberas eller försvinner ut från mottagarrummet.



Figur 37. Exempel på resultat från en ljudisoleringsmätning. En rak linje är dragen mellan varje 1/3 oktavs ljudnivå.

4.4.4 Beräkning av ensiffervärden

När mätningen är klar har man fått ett resultat, se exempel i Figur 37. Det är svårt att konstruera ett regelverk utifrån dessa ljudreduktionskurvor och därför har en standard för framtagande av ett fåtal ensiffervärden tagits fram. Dessa används sedan i Byggregler, Arbetsmiljöverkets skrifter etc. när de sätter sina kravnivåer. Det vanligaste värdet kallas *vägt reduktionstal* R_w . Olika anpassningstermer kan också räknas ut för att mer rättvist beskriva den upplevda ljudisoleringen. Anpassningstermerna, C-korrekationer (se bilaga 1), har införts för att ta hänsyn till olika spektra såsom väg- och tågbullerspektra.

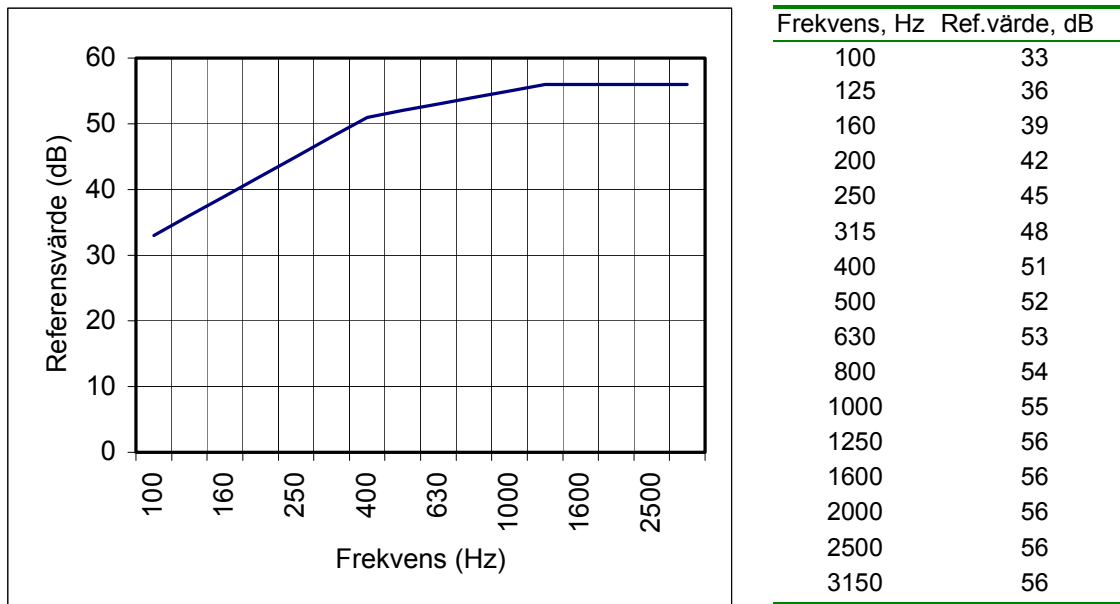
Vid mätning av ljudisolering i vanliga hus kan man inte vara helt säker på att allt ljud transmitterats via skiljeväggen. Sådana mätningar kallas därför fältmätningar och det vägda reduktionstalet betecknas R'_w . Reduktionstal utförda i ljudlaboratorium betecknas R_w .

4.4.5 Bestämning av luftljudsisolering enligt norm

Det vägda reduktionstalet R'_w beräknas enligt den internationella standarden SS-ISO 717/1; R'_w innebär att man jämför erhållen reduktionstalskurva med en referenskurva. Kraven på ljudisolering bestäms som minimivärden på R'_w . *Observera att ett högt värde på R'_w betyder bra luftljudsisolering.*

Beräkning av R'_w

R' mäts i byggnad i 1/3-oktavband inom området 100 – 3150 Hz. För varje frekvens jämförs de uppmätta värdena med referenskurvan enligt figuren nedan.



Figur 38 Referenskurva för luftljudsisolering

För att beräkna resultatet ska referenskurvan flyttas i steg om 1 dB mot den uppmätta kurvan tills den ogynnsamma avvikelsen är så stor som möjligt, men inte större än 32 dB. En ogynnsam avvikelse vid en speciell frekvens inträffar när resultatet av mätningarna är *mindre* än referensvärdet. Endast ogynnsamma avvikelser beaktas.

Det värde i dB som referenskurvan har vid 500 Hz, efter att ha flyttats enligt detta tillvägagångssätt, är R'_w .

Förfarandet framgår av följande exempel:

Exempel

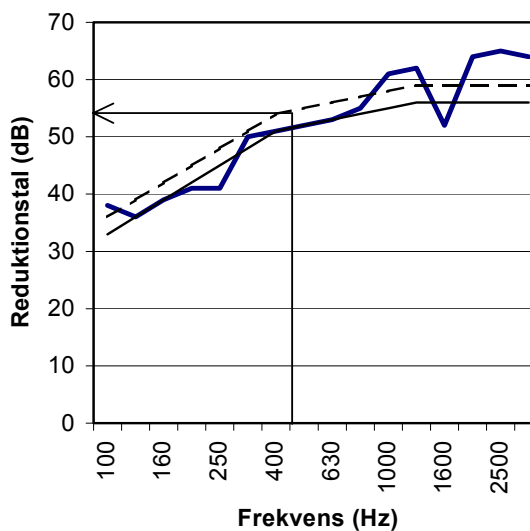
Vid en luftljudsisoleringsmätning av en vägg i fält erhöles följande reduktionstal (R').
Beräkna vägt reduktionstal R'_w .

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
Σ ogynnsam avvikelse			9	17	26	36

Lösning

1. Jämför uppmätt kurva (R') med referenskurvan varvid framgår att Σ ogynnsam avvikelse på undersidan är 9 dB. (Fetade värden indikerar ogynnsam avvikelse.)
2. Då referenskurvan förskjuts 2 dB över sitt utgångsläge, blir differensen 26 dB. Avvikelse < 32 dB.
3. Om referenskurvan förskjuts 3 dB blir Motsvarande summa 36 dB. Avvikelse > 32 dB.
4. 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



4.5 STEGLJUDSISOLERING

Ett annat sätt att störa sina grannar – än med luftljud – är att gå eller slå på någon av rummets ytor (väggar, golv eller tak). När en vägg utsätts för slag uppstår också en vågrörelse i väggen. Ljudvågor från hammarslag etc. kan bli mycket starka och kan därmed transportera ljudeffekt långt bort från det stället där väggen exciterades. En av de vanligaste formerna av slag direkt på husets ytor är att man går över ett golv eller i en trappa. Uppmätning av slag mot ytor har därför kommit att koncentreras mot golvytor och namnet stegljud har blivit allmänt vedertaget.

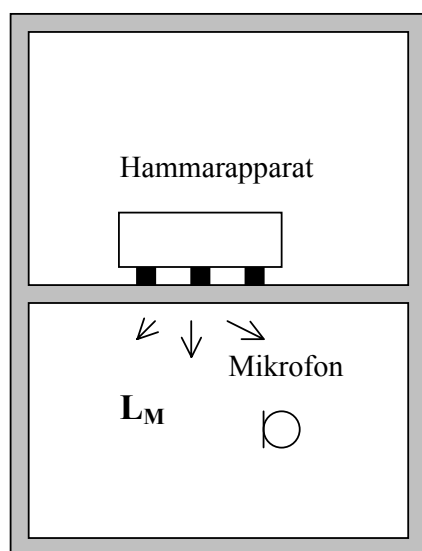
4.5.1 Mätning av stegljudsisolering

För att mäta stegljudsisolering används en standardiserad tappmaskin, hammarapparaten. Hammarapparaten släpper 5 hammarhuvuden med 0.1s mellanrum. Man får då väl definierade slag på golvytan. I angränsande rum mäter man ljudtrycksnivån på samma sätt som vid luftljudsmätningar. Man mäter ljudtrycket som ett medelvärde vid varje 1/3-oktav. Efter korrigering av mottagarummets absorptionsarea fås den standardiserade stegljudsnivån som

$$L_n = L_m + 10 \log \left(\frac{A}{10} \right) \quad (6)$$

där L_m Mottagarummets ljudtrycksnivå
 A Mottagarummets absorptionsarea (se kapitel om absorption)

Precis som vid luftljudsmätningar är vi här intresserade av golvets egenskaper. L_n justeras därför för mottagarummets förluster i den sista termen i ekvation (7). Lägg också märke till att L_n , till skillnad från R_w , ger högre värde ju sämre ljudisolering som föreligger.

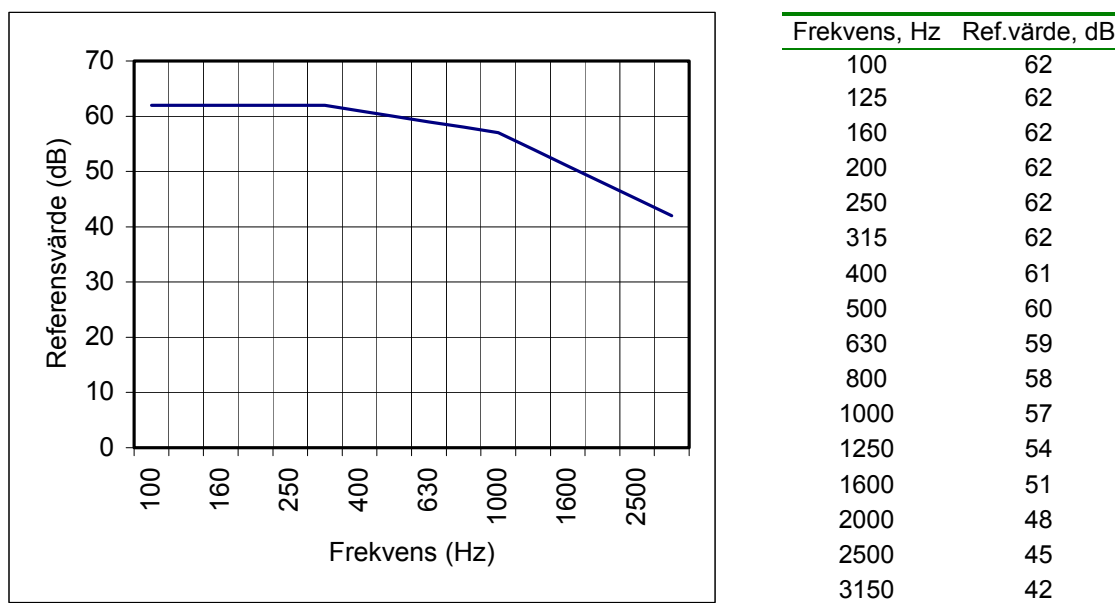


Figur 39 Stegljudsmätning mellan två lägenheter

4.5.2 Bestämning av stegljudsisolering enligt norm

Stegljudsnivån L'_n bestäms också vid 16 tersband enligt ovan. $L'_{n,w}$ för stegljudsnivå utgör ett mått på den ljudnivå som uppstår i ett rum (mottagarrummet), då bjälklaget i ett närliggande rum utsätts för slag från hammarapparaten. Liksom vid luftljudsisolering jämför man erhållen ljudnivåkurva med en referenskurva. *Observera att ett lågt $L'_{n,w}$ betyder god stegljudsisolering.*

Den vägda stegljudsnivån $L'_{n,w}$ beräknas enligt den internationella standarden SS-ISO 717/2. Beräkningen av stegljudsnivå $L'_{n,w}$ utförs analogt med beräkning av R'_w för luftljudsisolering. För varje frekvens av uppmätta värden på stegljudsnivå, L'_n jämförs de med referensvärden enligt figur.



Figur 40 Referenskurva för stegljudsnivå

För att beräkna resultatet ska referenskurvan flyttas i steg om 1 dB mot den uppmätta kurvan tills den ogynnsamma avvikelsen är så stor som möjligt, men inte större än 32 dB. En ogynnsam avvikelse vid en speciell frekvens inträffar när resultatet *överskrider* referensvärdet. Endast ogynnsamma avvikelser beaktas.

Det värde i dB som referenskurvan har vid 500 Hz, efter att ha flyttats enligt detta förfaringssätt, är $L'_{n,w}$.

Exempel

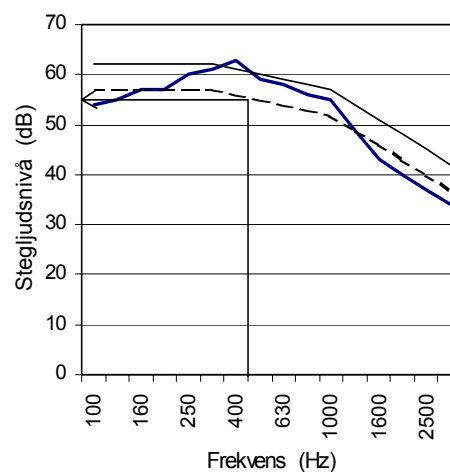
Vid mätning av stegljudsnivån i fält erhöles följande nivåer (L'_n).

Beräkna vägd stegljudsnivå $L'_{n,w}$

Frekvens [Hz]	L'_n [dB]	Ref. kurva [dB]	$L'_n - \text{Ref}$	$L'_n - (\text{Ref}-4)$	$L'_n - (\text{Ref}-5)$	$L'_n - (\text{Ref}-6)$
100	54	62	-8	-4	-3	-2
125	55	62	-7	-3	-2	-1
160	57	62	-5	-1	0	1
200	57	62	-5	-1	0	1
250	60	62	-2	2	3	4
315	61	62	-1	3	4	5
400	63	61	2	6	7	8
500	59	60	-1	3	4	5
630	58	59	-1	3	4	5
800	56	58	-2	2	3	4
1000	55	57	-2	2	3	4
1250	49	54	-5	-1	0	1
1600	43	51	-8	-4	-3	-2
2000	40	48	-8	-4	-3	-2
2500	37	45	-8	-4	-3	-2
3150	34	42	-8	-4	-3	-2
Σ ogynnsam avvikelse			2	21	28	38

Lösning

1. Jämför uppmätt kurva L'_n med referenskurvan
varvid framgår att referenskurvan ligger under uppmätt
kurva vid frekvensen 400 Hz. Σ differens = 2. (Fetade
värden indikerar ogynnsamma avvikelser.)
2. Om referenskurvan förskjuts 5 dB under
sitt utgångsläge blir Σ differens 28 dB.
Avvikelse < 32.
3. Om referenskurvan förskjuts 6 dB blir
motsvarande summa 38 dB.
Avvikelse = > 32 dB.
4. Stegljudsnivån $L'_{n,w}$ blir i detta fall 55 dB,
vilket är den flyttade referenskurvas
värde vid 500 Hz, då villkoren uppfylls.



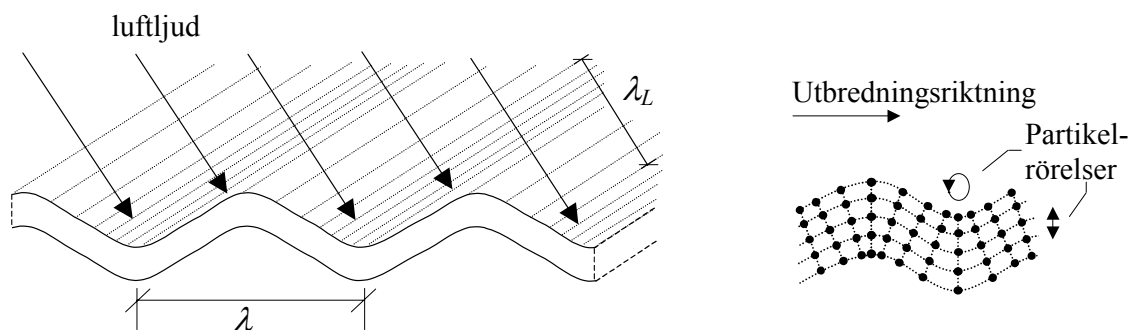
Svar: $L'_{n,w} = 55$ dB

4.6 ENKELVÄGGAR OCH DUBBELVÄGGAR

I de två följande avsnitten kommer de principiella beteendena för enkelväggar och dubbelväggar att diskuteras. Med enkelväggar avses väggar som består av ett skikt utan luftmellanrum, till exempel en tegelvägg eller en betongvägg. En dubbelvägg består av två enkelväggar åtskilda av ett luftmellanrum eller mineralull.

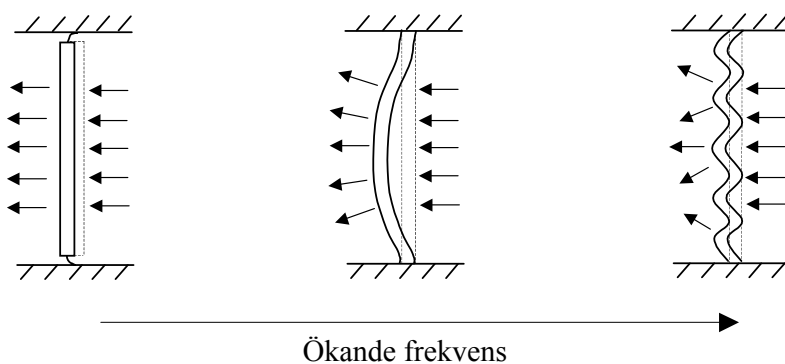
4.6.1 Principiellt beteende för en enkelvägg

Figur 41 visar hur ett luftljud träffar en vägg och tvingar väggen till böjsvängningar. Böjsvängningarna bildar vågor i plattan, varför de kallas för böjvågor. Böjvågen är egentligen en kombination av longitudinalvågen och transversalvågen och rörelsen sker både vinkelrät mot utbredningsriktningen samt i en roterande riktning.



Figur 41 En böjsvängning bildas i väggen då en ljudvåg träffar ytan. Till höger visas böjvågens partikelrörelser.

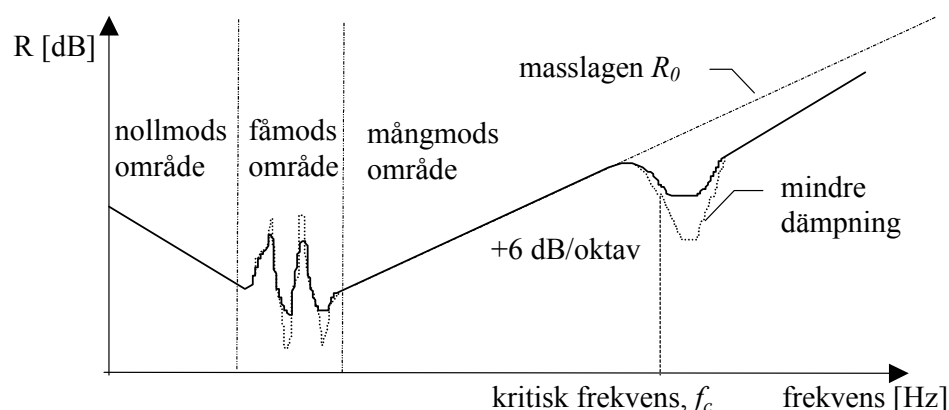
Amplituden på svängningen i väggen är i stort sett samma på båda sidor av väggen och isoleringsegenskaperna hos väggen är beroende av väggens förmåga att motstå böjsvängningarna och hindra dem från att lämna väggen som luftljud. Vid ett givet ljudtryck får man större svängningsamplitud ju lättare väggen är (eftersom ljudtrycket motsvarar kraften per ytenhet). Ljudisoleringen ökar alltså med väggens ytvikt. Ju högre frekvens ljudvågen har desto snabbare sker tryckväxlingarna och desto trögare blir det att röra väggen, vilket medför att ljudisoleringen förbättras med ökad frekvens.



Figur 42 En väggs svängningsmönster varierar med ökad frekvens

Även väggens styvhet kommer att påverka isoleringsförmågan. Vid riktigt låga frekvenser fungerar väggen som en fjäder, se Figur 42 och väggens fjäderstyvhet dominerar isoleringsförmågan. Området kallas nollmodsområdet, se Figur 43.

Vid lite högre frekvenser kommer tröghetskrafterna på grund av väggens massa och väggens fjäderstyvhet att samverka så att resonans uppstår och väggen svänger lättare, vi har nått den första moden. En mod beskriver svängningsrörelsen vid resonans. Om det inte hade funnits några dämpningsmekanismer i väggen som omvandlar svängningsenergin till värme hade här allt ljud gått igenom väggen. Om frekvensen ökas något samverkar massa och fjäderstyvheten inte längre och svängningarna blir trögare tills en ny mod träffas på och det återigen blir lättare för ljudet att tränga igenom. Området där de första resonanserna inträffar kallas fåmodsområdet i Figur 43. Resonanserna kommer allt tätare i frekvensled då frekvensen ökas, men då väggens dämpningsmekanismer blir allt effektivare syns inte resonanserna lika tydligt i kurvan. Vi har kommit in mångmodsområdet, se Figur 43. Här dominerar massan ljudisoleringsegenskaperna och väggens reduktionstal kommer att följa ett samband som benämns *masslagen*²¹.



Figur 43 Principiellt utseende för reduktionstal hos en enkelvägg

Masslagen är given som
$$R_0 = 20 \log \frac{\pi f m''}{2 \rho c} \quad (7)$$

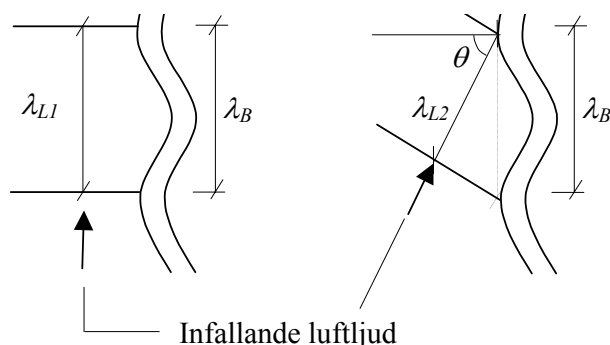
där f är frekvensen [Hz],
 m'' väggens ytvikt [kg/m^2],
 ρ luftens densitet [$\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$] och
 c är ljudets utbredningshastighet i luft.

Genom att fördubbla frekvensen (= en oktav) i ekvation (8) ser vi att reduktionstalet ökar med 6 dB/oktav.

Lite längre upp i frekvens inträffar nästa fenomen som reducerar isoleringsförmågan – *koincidens*. På samma sätt som en platta vid vissa frekvenser kommer lätt i svängning (resonans) så har en vägg mindre motstånd mot att utföra böjsvängningar för en viss våglängd, λ_B . Våglängden bestäms av utbredningshastigheten i väggen som i sin tur beror på väggens böjstyvhet, ytvikt och frekvens. Ljud faller in mot väggen i olika riktningar och sätter väggen i svängning, se Figur 41. Beroende på vilken riktning och frekvens ljudet har erhålls

²¹ Masslagen erhålls genom att enbart beakta massan i väggen och ställa upp en kraftjämvikt, vilket vi dock utesluter här.

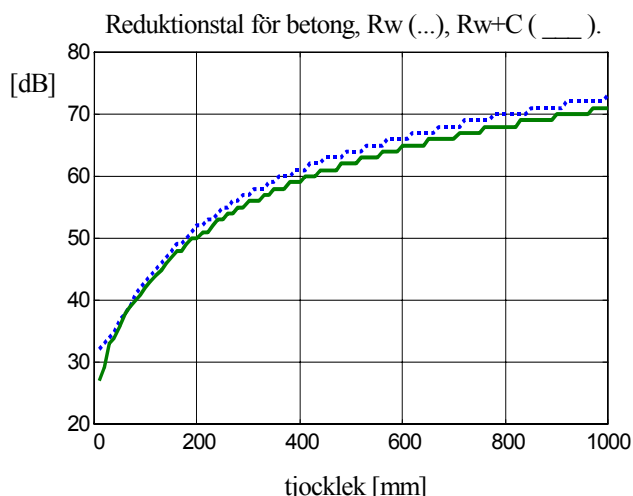
olika svängningsmönster. När dessa överensstämmer med den för väggen karakteristiska böjvåglängden transmitteras ljud lätt vidare till andra sidan av väggen. Det är detta fenomen, när den projicerade luftvåglängden stämmer överens med böjvåglängden för väggen, som kallas för *koincidens*. Det finns en lägsta frekvens för vilket *koincidens* kan inträffa, denna frekvens kallas *kritisk frekvens*. Luftvåglängden är då densamma som den karakteristiska böjvåglängden och luftvågen faller in parallellt med väggen, se Figur 44.



Figur 44 Koincidens inträffar när den projicerade luftljudets våglängd överensstämmer med väggens böjvåglängd. Den vänstra figuren visar tillståndet vid den kritiska frekvensen, den lägsta frekvens då koincidensfenomenet kan inträffa. Luftvågen faller in parallellt med väggen och har samma våglängd som den karakteristiska böjvåglängden för väggen. Den högra bilden visar koincidens vid infallsvinkeln θ , luftens våglängd är då $\lambda_{L2} < \lambda_{L1}$.

För att koincidens ska inträffa för högre frekvenser (kortare våglängd) krävs att det infallande ljudet kommer in snett mot väggen som i den högra figuren i Figur 44. Vid ljudmätningar på väggar kommer ljudet sällan från en bestämd riktning varför koincidensfenomenet syns som en dipp i Figur 43 för flera frekvenser. Med ökad dämpning i väggen minskar dippens storlek.

I Figur 45 framgår resultatet från beräknade reduktionstal, R_w och $R_w + C_{50-3150}$, för en homogen betongvägg som funktion av dess tjocklek. För att klara klass B mellan lägenheter i Svensk standard, SS 02 52 67, vilket motsvarar $R_w + C_{50-3150} > 56$ dB, måste väggen vara 300 mm tjock, vilket motsvarar en ytvikt runt 700 kg/m²!

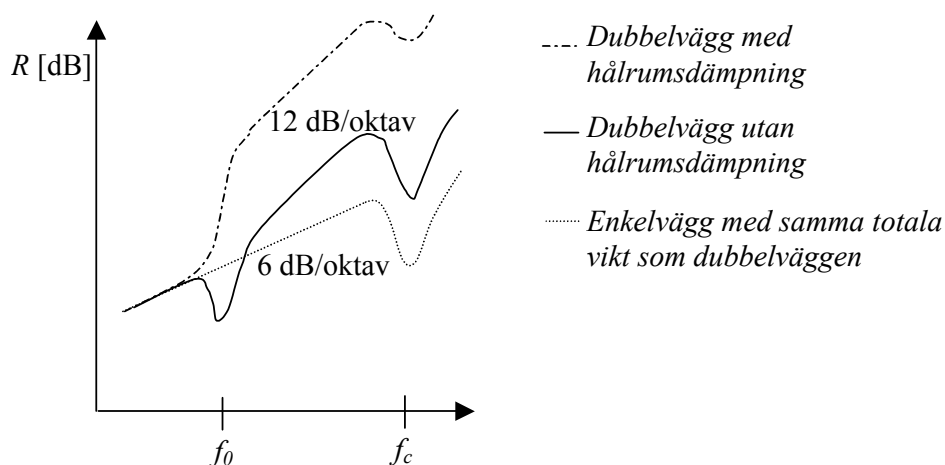


Figur 45 Reduktionstal för en homogen betongvägg

4.6.2 Principiellt beteende för en dubbelvägg

I avsnittet ovan visades att det krävs mycket tunga konstruktioner för att erhålla god ljudisolering. Istället för att bygga tjocka väggar har man valt en annan lösning – dubbelväggen. I exemplet ovan kan samma reduktionstal erhållas för dubbelväggar som väger bara en tiondel så mycket som den tunga betongväggen. När ljudisoleringsförmågan för dubbelväggen ska beräknas för alla frekvenser räcker det dock inte med att addera de enskilda väggarnas reduktionstal utan andra faktorer kommer att inverka av vilka några kommer att behandlas nedan.

Vid låga frekvenser kommer luftvägen att uppfatta väggen som en hel massa och jämförs en dubbelvägg och en enkelvägg med samma totala ytvikt kommer beteendet för dem att vara detsamma, se Figur 46.



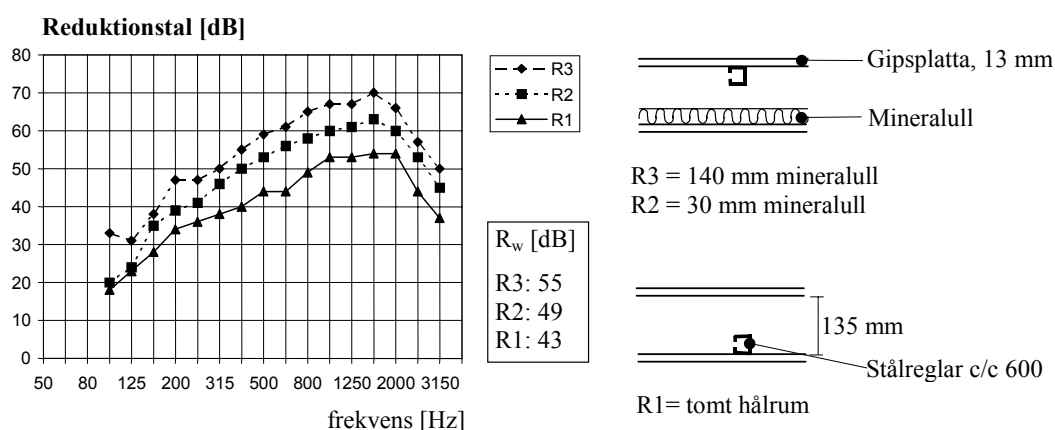
Figur 46 Reduktionstal för symmetrisk dubbelvägg med och utan hålrumsdämpning. Enkelväggen har samma totala vikt som dubbelväggen. f_0 = grundresonansen, f_c = kritisk frekvens.

Lite längre upp i frekvens kommer de båda väggarna att fungera som skilda massor sammanbundna med en fjäder vars styvhet bestäms av luften dem emellan. Även detta system har en resonansfrekvens, *grundresonans*, för vilken det lätt försätts i svängning. Vid grundresonansen transmitteras därför mycket ljud vilket syns som en dipp i Figur 46. Därefter fungerar dubbelväggen som två enskilda väggar och reduktionstalet blir därför summan av de enskilda väggarnas reduktionstal. Därför kommer lutningen på kurvan att bli $6 + 6 = 12$ dB/oktav. För att minska effekten vid grundresonansen och optimera ljudisoleringen ytterligare kan man dämpa luftrummet mellan väggarna med hjälp av stenull, mineralull eller liknande. Dämpmaterialet fungerar inte som isolering i sig utan ändrar hålrummets egenskaper, det gör så att ljudenergin omvandlas till värmeenergi. Materialet behöver inte täcka hela hålrummet för att fungera bra. Effekten från att fylla hålrummet med dämpmaterial syns i Figur 46. Koincidensfenomenet infinner sig även för dubbelväggen, vilket framgår i Figur 46.

Viktigt att minnas vid konstruktionen av dubbelväggar är att man inte vid byggnationen ändrar på kopplingen mellan de båda väggarna. En samling av rör som har kontakt med båda väggarna ändrar systemet och kan medföra att ljudisoleringen kraftigt försämras. Särskilt vid

tunga och styva ytterväggar bör kontaktpunkter mellan väggarna undvikas då transmissionen pga ljudbryggor i sådana fall blir ännu större.

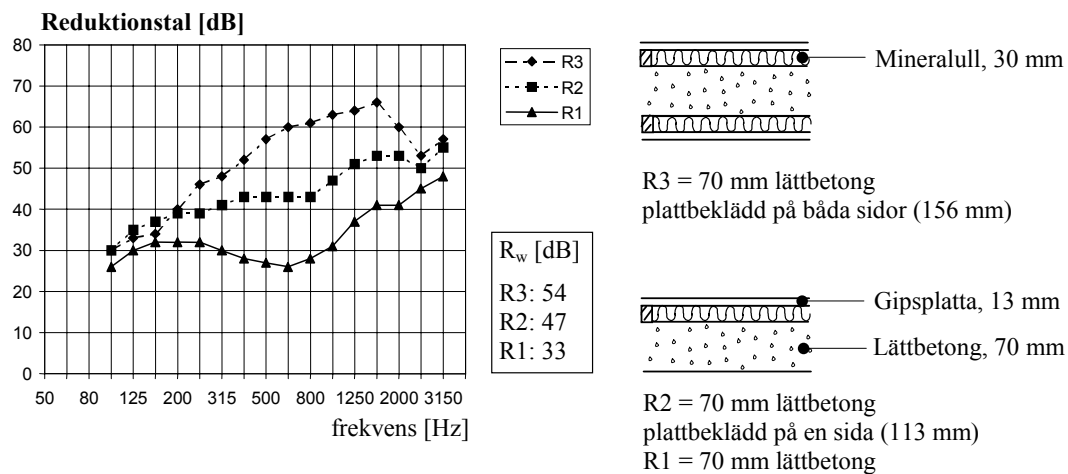
Nedan visas några exempel på enkel- och dubbelväggar och deras uppmätta reduktionstal. I Figur 47 visas att med hjälp av mineralull kan man förbättra reduktionstalet flera decibel. Koincidensfenomenet ligger för väggarna högt upp i frekvens vilket man eftersträvar för lätta väggar, helst ska det hamna ännu högre upp. I Figur 48 ser vi resultat då lättbetong har använts. För denna lättbetongvägg inträffar koincidensfenomenet mitt i mätintervallet vilket leder till dålig ljudisolering vid de frekvenser som är vanliga vid tal.²² Hus som byggdes under 50- och 60-talet bestod ofta av lättbetongväggar vilket ledde till ökad kännedom om grannarna, dock inte alltid till stor belåtenhet. I Figur 49 visas ett exempel på en dubbelvägg med trästomme som klarar klass B i SS 02 52 67.



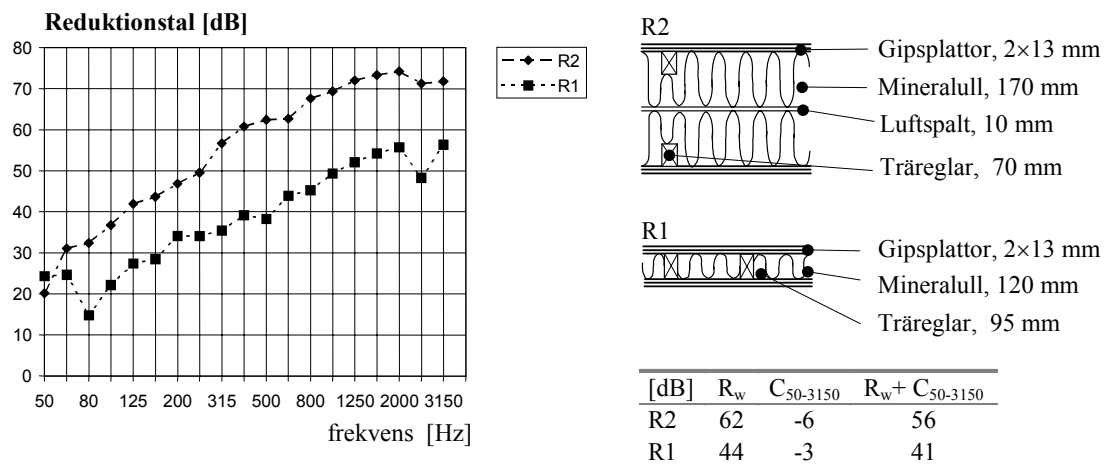
Figur 47 Mätresultat²³ på dubbelvägg av gips med stålstomme och varierande mineralullsinnehåll.

²² Innan man kom på koincidensfenomenet (1942, Cremer) trodde man allt styrdes av massan och man var förvånad över den försämrade ljudisoleringen kring 500 Hz.

²³ Mätningarna utfördes då mätområdet var 100-3150 Hz och ej som idag 50-3150 Hz. Därför är ej $C_{50-3150}$ beräknat (Homb A., Hveem S., Strøm S., Lydisolerande konstruksjoner, 28 Anvisning NBI, 1983)



Figur 48 Vagg av lättbetong med olika ytbeklädnader.²³



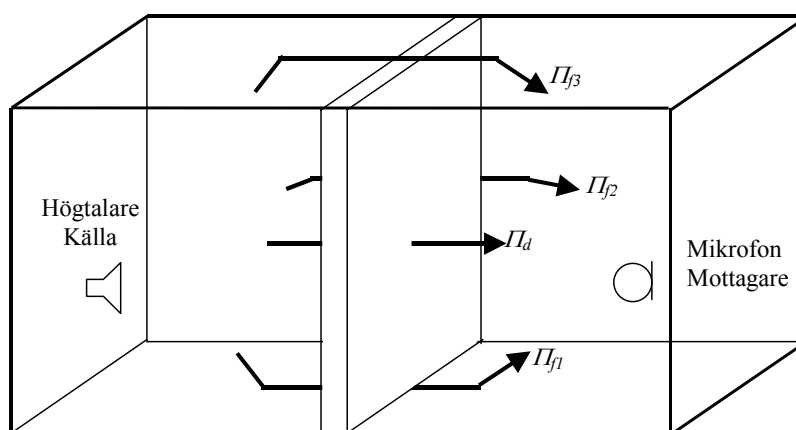
Figur 49 Lättväggar med trästomme.²⁴

²⁴ Hammer P., Nilsson E., *Light weight partition walls and floors – The influence of mineral wool on sound insulation.*, TVBA 3095, Teknisk Akustik, Lund, 1997.

4.7 FLANKTRANSMISSION

När begreppet ljudisolering mellan rum används, är det lätt att man bara tänker på skiljeväggen. Detta är dock inte riktigt; i allmänhet kan man inte bortse från andra ljudöverföringsvägar. En viktig sådan ljudöverföring är den via de flankerande väggarna (väggarna vid sidan av den direkta skiljeväggen). För att minska inverkan av dessa transmissionsvägar måste man välja bra konstruktioner för de flankerande väggarna, liksom att välja bra knutpunkter där väggarna möts.

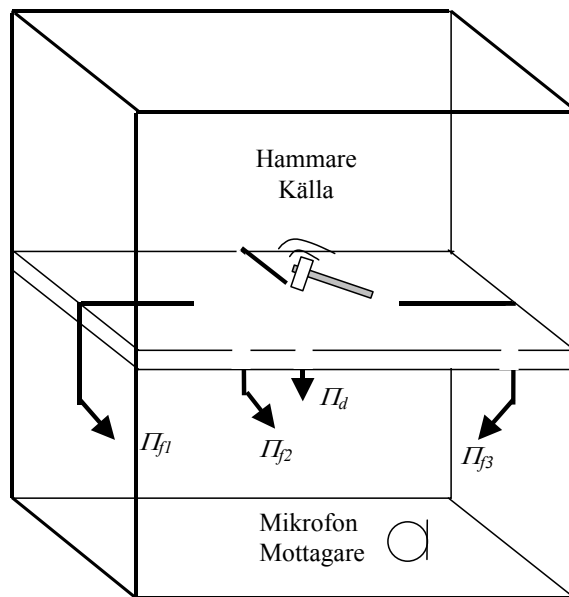
Man kan säga att ljud som inte överförs via skiljekonstruktionen kallas för *flanktransmission*. Desto strängare krav man sätter på en skiljevägg, desto viktigare blir det att reducera flanktransmissionen, så att skiljekonstruktionens egenskaper utnyttjas maximalt.



Figur 50 Flanktransmissionsvägar, luftljud

I Figur 50 ser vi hur ljudet tar sig från sändarrummet (där källan finns) till mottagarrummet (där mikrofonen finns) via ett antal olika vägar. De olika vägarna är beskrivna med pilar och ger olika effektbidrag till den totala effekten in i mottagarrummet. Den direkta vägen via skiljeväggen beskrivs av Π_d , effektbidrag via direkt väg. De flankerande vägarna beskrivs av Π_1 , Π_2 och Π_3 . Dessutom finns en väg Π_4 som inte syns i figuren. Till dessa vägar kan sedan även komma transmission via ventilationssystem och dylikt.

Flanktransmission är även ett problem vid stegljud, vilket framgår av Figur 51.



Figur 51 Flanktransmissionsvägar, stegljud

Historiskt sett började man i Sverige på allvar att intressera sig för flanktransmissionen under 50- och 60-talen. Ett skäl till detta var att man använde mycket lättbetong (gasbetong) vilka i och med sin lätthet har relativt stora vibrationer, samt koincidens i området 500 till 1000 Hz, och därmed stötar ut ljud bra även då det kommer via flankerna. Alltså kan sådana väggar ställa till med problem även då de används som mellanväggar inne i en lägenhet.

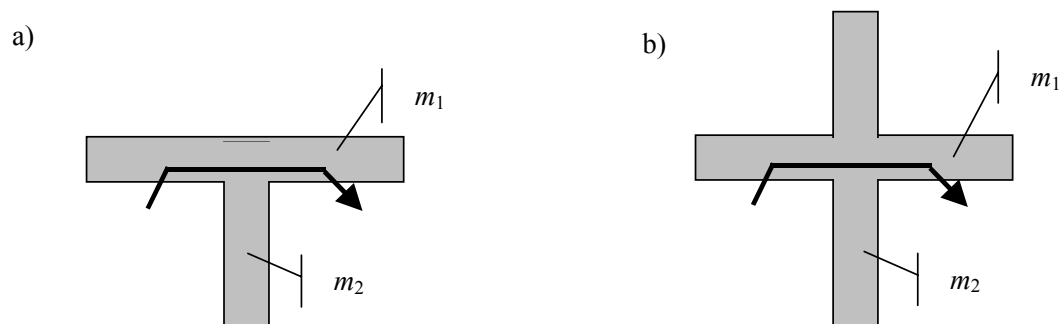
Sammanställningen mellan de olika delarna i en byggnad bör ske så att ljudöverföring via flankerna blir minimal och samtidigt utan springläckage. Alla övergångar mellan flankerande väggar och själva skiljeväggen behöver projekteras med detta i åtanke. Ljudöverföringen via flankerna bör vara väsentligt lägre än via själva skiljekonstruktionen. Bidragen via flankerna kan reduceras genom att

- välja flankerande konstruktioner med bra ljudisolering i sig, det vill säga med högt vägt reduktionstal R_w ,
- välja en knutpunkt med hög knutpunktsisolering (10 dB eller mer).

Vad är då *knutpunktsisolering*? Knutpunktsisolering K [dB] är ett mått på den nivåminskning av svängningarna som sker när dessa passerar en knutpunkt. K kan därför aldrig bli negativ. Ett stort problem med knutpunktsisoleringen K är att den både är svår att bestämma räknemässigt eller att mäta upp för sammansatta konstruktioner; den beror starkt av detaljlösningen i knutpunkten. Så länge överföringen av svängningar kan ske relativt obehindrat kommer knutpunktsisoleringen att vara mellan 0 - 6 dB även för en sammansatt konstruktion. För homogena konstruktioner är dock knutpunktsisoleringen känd. Knutpunktsisoleringen kan ökas väsentligt genom att

- totalt avskilja konstruktioner i knutpunkten (t. ex. öppna fogar vid platta på mark),
- elastiska mellanlägg,
- tilläggsisolering av flankerande konstruktion.

För homogena konstruktioner kan man skatta knutpunktsisoleringen med hjälp av massförhållandet mellan väggarna, se Figur 52 och Tabell 11. Knutpunktsisoleringen uppkommer dels genom att ljudeffekten sprids till olika vägar och dels genom att en del av ljudeffekten reflekteras tillbaka mot ljudkällan.

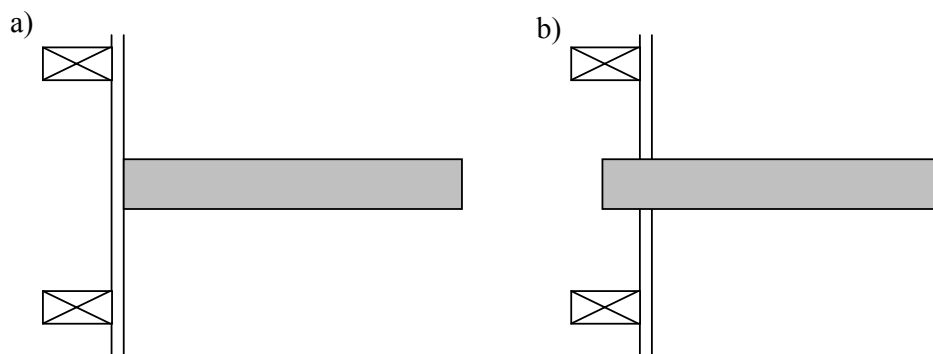


Figur 52 Knutpunkter, a) T-förbindelse och b) X-förbindelse

Tabell 11 Knutpunktsisolering för homogena konstruktioner

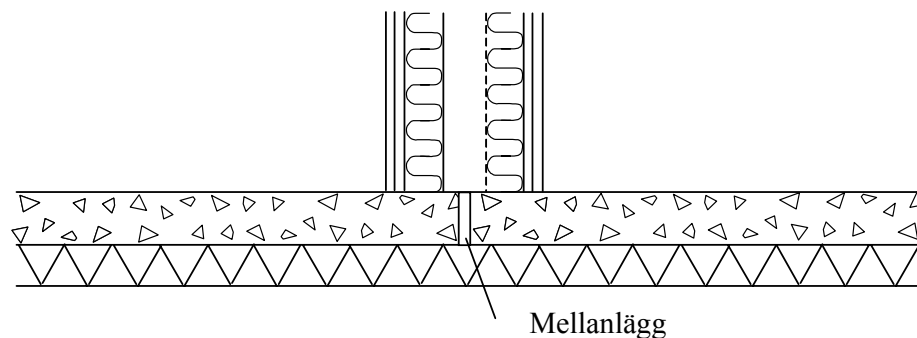
Massförhållande $M=m_2/m_1$	T-förbindelse K dB	X-förbindelse K dB
≤ 0.25	2	2
0.4	3	4
0.6	4	7
0.8	7	10
1.0	9	12
1.4	11	15
2.0	13	18
4.0	19	24
6.0	21	27
8.0	24	30

Man får som sagt inte flanktransmission enbart vid homogena väggar, utan även via delskikt i lätta sammansatta väggar i flera skikt, exempelvis via spån- eller gipsplattor i väggelement som får fortsätta förbi skiljekonstruktionen obrutna. Principerna för att minska flanktransmissionen i mer sammansatta konstruktioner visas i Figur 53, där fall a) är ett dåligt exempel medan fall b) är bra. I fall a) kan nämligen vibrationerna i den tunna plattan forplantas sig förbi knutpunkten – i värsta fall utan någon knutpunktsisolering, medan man i fall b) ha brutit av transmissionsvägen genom att separera plattorna.



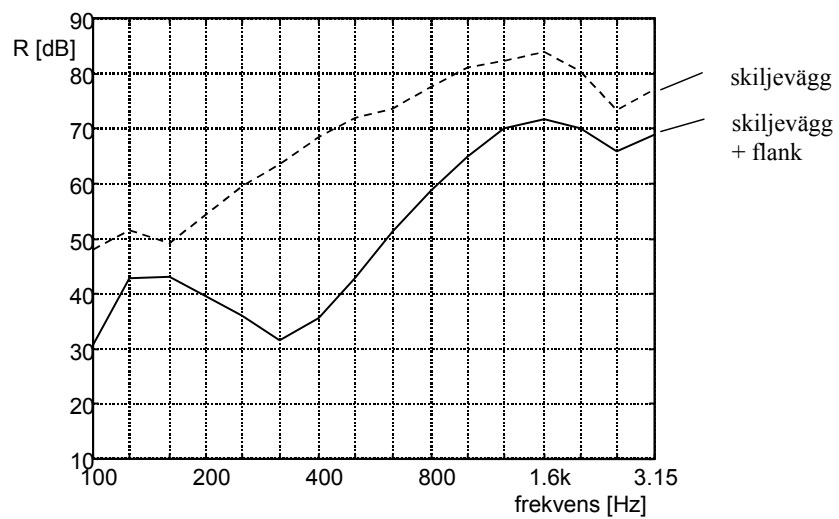
Figur 53 Knutpunkter vid sammansatta konstruktioner, a) är dålig medan b) är bra.

Ett annat farligt fall av flanktransmission är då man grundlägger med bottenplattor av betong vid exempelvis radhus. Plattorna vilar oftast på mineralull eller cellplast. Detta gör att vibrationsenergin i plattorna inte kan försvinna ner i marken, utan stannar kvar i plattan. Detta fall är faktiskt så känsligt att även den minsta mekaniska koppling mellan plattorna kan vara förödande, vilket exemplet nedan visar, se Figur 54. Exemplet är taget från ett faktiskt bygge (dvs i fält).



Figur 54 Exempel på flanktransmission, platta på mark.

I detta fall bestod skiljeväggen av en bra dubbelvägg med två gipsskivor på varje sida och separerade stommar. Mätresultatet för enbart skiljeväggen ges av den övre kurvan i Figur 55, streckad linje. De båda grundplattorna var åtskilda, men de var åtskilda med en porös träfiberskiva, markerat som mellanlägg i Figur 54. Denna skiva upplevs som mjuk när man tar i den, men för böjvibrationerna i grundplattorna upplevs den som stel, och knutpunktsdämpningen blir ungefär noll. Resultatet syns i den undre kurvan i Figur 55, heldragen linje. Den totala konstruktionen är mycket dålig, och som värst ligger den undre kurvan 30 dB under den övre!



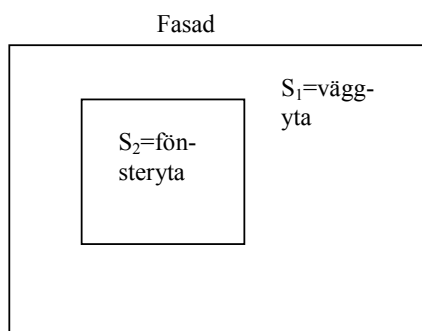
Figur 55 Exempel på flanktransmission, platta på mark. Mätresultat.

4.8 FASADISOLERING, SAMMANSATT REDUKTIONSTAL

När ljudet når fasaden i exempel 1 i första kapitlet träffar ljudvågorna en yta sammansatt av flera komponenter. Förutom av själva fasadväggen har vi fönster och ofta någon typ av friskluftsdon i fasaden. Ljudnivån i rummet från trafikbullret kommer att bestämmas av de olika komponenternas ljudisolering. I detta avsnitt ska visa hur ett totalt reduktionstal för den sammansatta konstruktionen kan beräknas.

4.8.1 Sammansatt reduktionstal

Den totala ljudisoleringen bestäms av den ljudeffekt som transmitteras genom de olika komponenterna i fasaden, se Figur 56.



Figur 56 Olika komponenter i en fasad

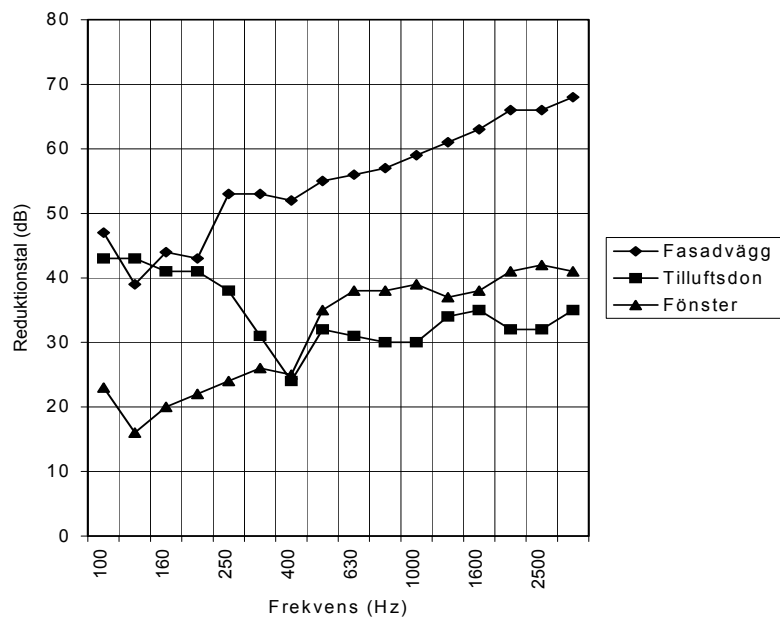
Genom att addera ljudeffekten genom de olika delytorna i fasaden kan vi definiera ett totalt reduktionstal enligt följande

$$R = -10 \log \left(\frac{1}{S} (S_1 10^{-R_1/10} + S_2 10^{-R_2/10} + \dots) \right) \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

där $R_1, R_2, \dots$ är delkomponenternas reduktionstal,
 $S_1, S_2, \dots$ är motsvarande ytor och
 S är den totala skiljeväggsytan dvs. $S=S_1+S_2+\dots$

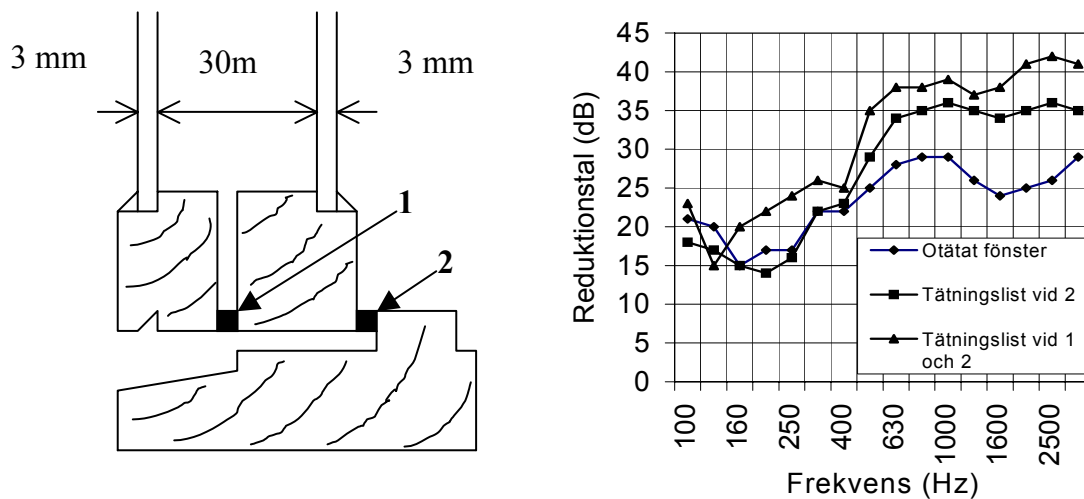
4.8.2 Tätning av fönster

I en fasad är det ofta ljudisoleringen hos fönster och ev. friskluftsintag som kommer att vara kritiska för att kravnivåerna inomhus när det gäller buller från trafik inte ska överskridas. I Figur 57 ser vi exempel på ljudisoleringskurvor för de olika komponenterna i en fasad. Fasadväggen är av 25 cm Lecablock med 15 mm puts på båda sidor, fönstret är av tvåglastyp och friskluftsintaget är ett cirkulärt tilluftsdon med filter.



Figur 57 Exempel på reduktionstalskurvor för fasadvägg, tilluftsdon och fönster.

Som vi tidigare sett i exemplet kan även små hål och springor i en vägg kraftigt försämra ljudisoleringen. Vid montering och konstruktion av fönster är det därför viktigt att tätta ev. läckage. Effekten av tätning i ett tvåglasfönster visas i Figur 58. Vi ser att tätningen innebär en förbättring av reduktionstalen med mer än 10 dB för höga frekvenser jämfört med utan tätning.



Figur 58 Inverkan av tätning i fönster

Exempel

Beräkna det sammansatta reduktionstalet för en fasad som består av Lecaväggen och fönstret med reduktionstal enligt Figur 58. Den totala fasadytan är 10 m^2 varav fönsterytan är 2 m^2 . Utför beräkningen för tersbandet 1000 Hz.

För 1000 Hz gäller: $R_{\text{vägg}}=59 \text{ dB}$ och $R_{\text{Fönster}}=39 \text{ dB}$

Ekvation (11) ger det sammansatta reduktionstalet

$$R = -10 \log\left(\frac{1}{10}(8 \cdot 10^{-59/10} + 2 \cdot 10^{-39/10})\right) = 46 \text{ dB}$$

4.8.3 Ventilationskanaler, dörrar

Andra byggnadskomponenter som ofta har en avgörande betydelse på ljudisoleringen i skiljekonstruktioner är dörrar och ventilationskanaler. Mellan rum med gemensam odämpad ventilationskanal kommer mycket av ljudet att transmittas via kanalen och t.ex tal kommer lätt att uppfattas mellan rummen. För att undvika denna överhörning måste kanalen förses med en ljuddämpare. Dörrar mellan rum eller till trapphus har ofta sämre ljudisolering än skiljekonstruktionen i övrigt varför dörrens ljudisolering ofta blir avgörande för slutresultatet. En dörr måste i regel göras tung för att ge bra ljudisolering. När det gäller dörrar är tätningen med lister längs dörrkarmen viktig. Val av gummilister och precisionen i monteringen är viktig för fullgod funktion. Tätningen får inte vara luftgenomsläpplig och listen måste vara väl komprimerad för att inte ljudisoleringen ska försämrast.

4.9 SPRINGLÄCKAGE

Vad händer om det uppstår en liten springa i en skiljevägg? Springläckage är ett relativt vanligt problem inom byggnadsakustiken och innebär ofta att en väggs eller ett bjälklags ljudisolering kraftigt försämrast.

Man kan anta att reduktionstalet för själva springan är obefintlig. Den transmittade effekten genom en liten springa blir då endast relaterad till springans area S_s i förhållande till hela väggens area S som:

$$\Pi_s = \Pi_i \cdot \frac{S_s}{S} \quad (9)$$

och reduktionstalet för hela väggen blir då

$$R = -10 \cdot \log\left(\frac{\Pi_t + \Pi_s}{\Pi_i}\right) = -10 \cdot \log\left(\frac{\Pi_t}{\Pi_i} + \frac{S_s}{S}\right) = -10 \cdot \log(10^{-R/10} + \frac{S_s}{S}) \quad (10)$$

Exempel

Beräkna hur stor inverkan en 1 mm bred och 1 meter lång springa har på en vägg som är 2.40 meter hög och 4 meter bred. Utan springa har väggen ett reduktionstal på 50 dB.

Lösning:

$$R \text{ ges av ekvation (10). } R = -10 \cdot \log \left(10^{-5} + \frac{0.001 \cdot 1}{2.4 \cdot 4} \right) = 39.4 \text{ dB}$$

Springan försämrar alltså väggens reduktionstal med drygt 10 dB.

4.10 ÖVNINGSUPPGIFTER

1. a) Beräkna reduktionstalen för en vägg med uppmätta värden enligt Tabell 12 nedan.
Väggens yta är 10 m^2 .
- b) Beräkna vägt reduktionstal.

Tabell 12 Uppmätta värden.

Frekvens [Hz]	Ljudtrycksnivå i sändarrum [dB]	Ljudtrycksnivå i mottagarrum [dB]	Absorptionsarea [m^2]
50	68	55	2
63	69	55	2
80	70	52	3
100	70	50	3
125	71	50	3
160	73	52	3
200	72	50	4
250	73	51	4
315	73	48	5
400	74	48	4
500	75	48	5
630	77	50	5
800	76	49	6
1000	78	49	7
1250	78	50	7
1600	80	47	9
2000	81	48	8
2500	80	44	9
3150	79	45	10
4000	82	45	12
5000	80	40	12

- c) Antag att någon gör ett hål i väggen med ytan 1 cm^2 . Hur mycket försämras reduktionstalet för 1000 Hz tersbandet då?
- d) En helt annan vägg har reduktionstalet 60 dB vid 1000 Hz. Hur mycket hade den väggen försämrats av hålet i uppgift c. Alla andra väggparametrar är lika.
- e) Väggmätningen ovan gjordes i ett laboratorium. Du rekommenderar väggen till ett nybyggnadsarbete. När ni gör en mätning mellan två rum där väggen ovan ingår som skiljekonstruktion upptäcker du att det vägda reduktionstalet sjunkit 5 dB. Vad kan det bero på?

2. a) Beräkna stegljudsnivån för ett bjälklag med uppmätta värden enligt Tabell 13 nedan.
- b) Beräkna vägd stegljudsnivå.

Tabell 13 Stegljudsnivå efter mätning med hammarapparat enligt SS 140.

Frekvens [Hz]	Ljudtrycksnivå i mottagarrum [dB]	Absorptionsarea [m^2 Sabine]
50	55	4
63	57	4
80	58	4
100	58	5
125	63	5
160	61	6
200	63	6
250	66	5
315	64	6
400	65	6
500	67	7
630	70	6
800	72	7
1000	71	7
1250	72	8
1600	72	9
2000	71	10
2500	70	12
3150	69	14
4000	69	15
5000	68	13

3. Böjvågshastigheten i en 13 mm tjock gipsskiva är frekvensberoende och följer ekvationen $c_B = 7 \cdot \sqrt{f}$, där f är frekvensen. En dag har du mätt luftljudshastigheten till 340 m/s.
 - a) Vilken är under dessa förhållanden den lägsta koincidensfrekvensen.
 - b) Vid vilken infallsvinkel sker detta.
 - c) Spårvågshastigheten blir teoretiskt oändlig för vissa infallsvinklar. Vilka vinklar? Hur kan det komma sig?
4. En vägg är uppbyggd av tre delar. Du vet att varje del har reduktionstal och area enligt Tabell 3 nedan.
 - a) Räkna ut vilket reduktionstal som hela väggen har vid 1000 Hz.
 - b) Om du fick i uppgift att förbättra ljudisoleringen genom den totala väggen, vad skulle du göra och varför? Försök förbättra konstruktionen med cirka 5 dB.

Tabell 3 Värden för delkomponenter vid 1000 Hz

Delkomponent	Reduktionstal [dB]	Area [m^2]
Fönster	25	2
Dörr	45	2
Väggyta	55	10

5 ABSORPTION OCH AKUSTIKREGLERING

5.1 INLEDNING

I kapitlet om ljudisolering kunde vi konstatera att värmeisolerande porösa material av mineralullstyp fungerar mycket dåligt till ljudisolering. Däremot används de ofta som ljudabsorbenter. Vad är då ljudabsorption - och när behövs ljudabsorbenter?

Låt oss börja med ett vanligt problem i olika rum som skolsalar, dagis och på arbetsplatser. Ofta upplevs lokalen som bullrig och påfrestande och det är svårt att uppfatta vad folk säger. Personalen kan bli ljudtrötta av stemmet och man önskar bättre taltydlighet. Om vi försöker beskriva orsaken till problemet fysikaliskt, så är förklaringen att för mycket ljudenergi reflekteras tillbaka av väggarna. Ljudenergin dröjer därför kvar i rummet. Kan vi minska reflektionen så blir den totala mängden ljudenergi också mindre, och det blir mindre bullrigt och lättare att uppfatta tal. Hur man åstadkommer detta är principen bakom ljudabsorption.

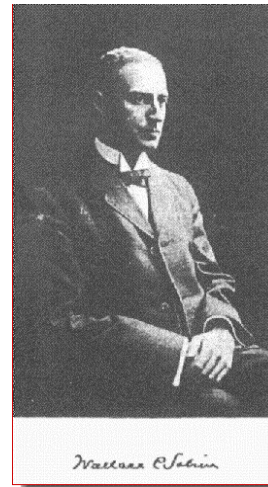
Ett belysande experiment över så kallade stående vågor och porösa absorbenters funktionssätt kommer att demonstreras på föreläsning och är beskrivet under avsnittet ljudabsorbenter.

5.2 ENERGI OCH EFTERKLANGSTID

I slutet av 1800-talet lade Wallace Clement Sabines (1868-1919) iakttagelser grunden för rumsakustiken. Sabine jobbade som fysiklärare på Harvard University när han 1895 fick i uppdrag att förbättra en nybyggd föreläsningssal. Sabine observerade att lång efterklang gjorde det svårt att uppfatta tal. Därför antog han två saker: för det första antog han att den andel infallande ljudeffekt²⁵ mot en vägg som inte reflekterades istället absorberades, vilket vi kan skriva

$$\Pi_i = \Pi_r + \Pi_a \quad (1)$$

där Π_i är inkommande ljudeffekt, Π_r är reflekterad ljudeffekt och Π_a är absorberad ljudeffekt.



Figur 59: Wallace C. Sabine (1868-1919)

Om vi definierar en *absorptionskoefficient*, α , och en *reflektionskoefficient*, ρ , vilka ger hur stor andel effekt som absorberas respektive reflekteras, så kan sambandet (1) skrivas om som

$$\alpha = \frac{\Pi_a}{\Pi_i}, \rho = \frac{\Pi_r}{\Pi_i} \quad \Rightarrow 1 = \rho + \alpha \quad (1.b)$$

²⁵ Vilket här alltså är ljudenergi som träffar ytan per tidsenhet.

För det andra antog han att ju mer ljudenergi som dröjer kvar i rummet, ju längre tid tar det för ett ljud att klinga av. Alltså sökte han ett enkelt samband mellan tiden det tar för ljudet att dö bort, *efterklangstiden*, och absorption. Med ett sådant samband skulle man kunna reglera taluppfattbarheten i en sal med hjälp av ljudabsorption. För att finna sambandet klockade Sabine hur länge han kunde höra en orgelton efter det att den stängts av. Därefter fyllde han golv och väggar med kuddar och mätte hur efterklangstiden minskade. Eftersom tonen låg ca 60 dB över Sabines hörtröskel så blev efterklangstiden T_{60} , definierad som den tid det tar för ljudenergin att minska 60 dB (vilket motsvarar en minskning till en miljontedel av ursprungsnivån). Sambandet kunde han efter sina mätningar skriva som

$$T_{60} = K \cdot \frac{V}{A} \quad (2)$$

där K är en konstant

$$K = 0.16 \text{ s/m},$$

V är rummets volym och A definierar den så kallade *absorptionsytan*. För att förstå begreppet absorptionsyta så tänk dig ett vanligt rum där efterklangstiden mäts, och ett identiskt, men tomt, rum där väggarna reflekterar allt ljud. Om det fanns ljudenergi i det ideala totalreflekterande rummet skulle den studsas omkring mellan väggarna för evigt (om man bortser från den mycket lilla luftljudsabsorptionen). I det ideala rummet sätter vi nu in fler och fler öppna fönster, som ju inte reflekterar något ljud och alltså kan sägas vara totalabsorberande eller ideala absorbenter. Efterhand kommer det ideala rummets efterklangstid successivt att minska. När de båda rummen får samma efterklangstid är de ideala absorbenternas (det vill säga fönsternas) yta lika med absorptionsytan i ekvation (2).

Nu återstår bara att koppla ihop absorptionsytan, A , med absorptionskoefficienten, α . Om vi går tillbaks till ekvation (1.b) och (2) så kan vi utifrån de sambanden definiera ett mått på hur bra ett material är på att absorbera ljud. Är absorptionen total så är följaktligen reflektionskoefficienten $\rho=0$. Alltså får vi då en absorptionskoefficient $\alpha=1$, vilket man alltså kan säga är karakteristiskt för en totalabsorberande yta, som till exempel fönsterna ovan. Absorptionskoefficienten kan alltså också sägas vara en sorts materialegenskap. Från ekvation (2) kan vi nu bestämma absorptionskoefficienter till alla andra material. Om vi mäter efterklangstiden före och efter vi lagt in absorbenter (kuddarna i Sabines fall) i ett rum med mycket reflektion, så kan vi från ekvation (2) beräkna en ökning av den ideala absorptionsytan. Denna extra absorptionsyta delat med absorbentens yta, S , ger absorptionskoefficienten α för materialet.

$$\alpha = \frac{A}{S} \quad (3)$$

Sabines enkla ekvation används fortfarande för att uppskatta absorbenters inverkan på efterklangstiden och när man mäter materials absorptionskoefficienter i speciella *efterklangsrum* (eng: *reverberation chamber*) med extremt lång efterklangstid.

Exempel

Mätning av absorptionskoefficienten α i efterklangsrum.

I ett efterklangsrum med volymen $V=200 \text{ m}^3$ och efterklangstiden $T_{60}=12 \text{ s}$ lägger man in absorbermaterial på en yta av $S=10 \text{ m}^2$ (standardförfarande). Den nya efterklangstiden mäts upp till $T_{60}=8 \text{ s}$ vid frekvensen 100 Hz och $T_{60}=2 \text{ s}$ vid frekvensen 2 kHz . Vi räknar ut absorptionsytan, A , enligt ekvation (2)

$$A = K \cdot \frac{V}{T_{60}}$$

för att skilja på absorptionsytor och efterklangstid för de olika fallen inför vi beteckningarna

$$\begin{cases} \text{Mätning i efterklangsrum : } A' \text{ och } T_{60}' \\ \text{Mätning i efterklangsrum med absorbenter : } A'' \text{ och } T_{60}'' \end{cases}$$

och kan nu räkna ut absorberens absorptionsyta, A som

$$A = A'' - A' = K \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{60}''} - \frac{1}{T_{60}'} \right)$$
$$\begin{cases} f = 100 \text{ Hz} : A = 0.16 \cdot 200 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{12} \right) = 1.3 \text{ m}^2 \\ f = 2 \text{ kHz} : A = 0.16 \cdot 200 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{12} \right) = 13 \text{ m}^2 \end{cases}$$

Vilket ger absorptionskoefficienten α som

$$\alpha(100 \text{ Hz}) = \frac{1.3}{10} = 0.13$$

$$\alpha(2 \text{ kHz}) = \frac{13}{10} = 1.3$$

Lägg märke till två saker: dels ökar absorptionen med frekvens, vilket är typiskt. Förklaringen till detta kommer i avsnittet om porösa absorbenter. Dels så får vi en absorptionskoefficient som är högre än 1 för höga frekvenser. Med tanke på vad vi har sagt tidigare om att en absorptionskoefficient $\alpha=1$ innebär totalabsorption och med tanke på effektbalansen i ekvation (1) så verkar detta som en paradox. Men det beror helt enkelt på mätförfarandet och speglar att mätutvärderingen inte tar någon hänsyn till att det sker en viss interaktion mellan absorber och ljudfält.

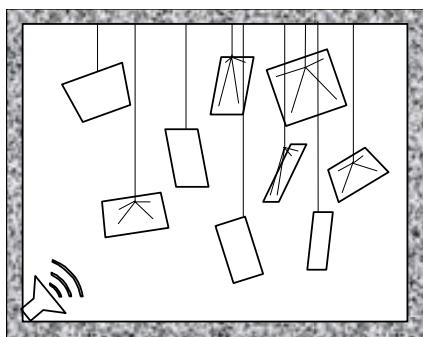
För att Sabines enkla formel (2) ska fungera krävs dock att ljudfältet i rummet uppfyller vissa kriterier. Ljudfältet måste vara hyfsat likt ett *diffust ljudfält*. Ett diffust ljudfält kännetecknas av att fas och riktning för ljudets utbredning är helt slumpvis i alla punkter i rummet. Därför sätter man i efterklangsrum upp så kallade diffusorer, stora skärmar som är uppsatta med slumpvis orientering, som ”stökar till” ljudfältet och sprider ut starka och riktade ljud i rummet. Om ljudfältet är särpräglad, med till exempel starka plana reflexer, är det svårt att karakterisera med energimetoder av Sabines typ. Detta kan till exempel inträffa i kontorslandskap, i korridorer eller i rum med där man koncentrerat placeringen av absorbenter till vissa ytor. Även materials absorptionsegenskaper kan förändras beroende av fältet (jämför

exemplet ovan), varför man inte ska lita för mycket på absorptionskoefficienten som material-egenskap. Speciellt påtagligt är detta när man har små ytor med absorbenter istället för rum helt inklädda med absorbenter. För små ytor får man en överskattning av absorptionen (därav kravet på, minst, 10 m² absorbentmaterial vid standardmätningen i exemplet ovan). Detta brukar man kalla kanteffekt, även om det inte beror på kanten, utan på att absorbentens yta är begränsad.

Man kanske ställer sig frågan vad som hänt om ljudstyrkan varit större eller mindre - hade det förändrat efterklangstiden? Svaret är att ljudet klingar av exponentiellt, det vill säga oberoende av hur starkt ljudet är från början tar det lika lång tid att halvera mängden ljudenergi. Därför tar det också lika lång tid för ljudet att klinga av 60 dB (minska till en miljonedel) oberoende av ljudkällans styrka. Detta kan skrivas

$$E(t) = E_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

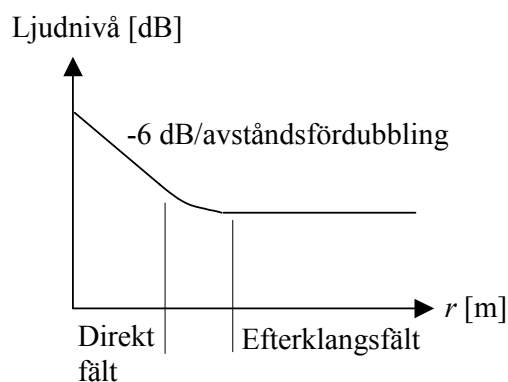
där $E(t)$ är energiavklingningsförloppet²⁶ som funktion av tiden, t , E_0 är energinivån vid utgångstidpunkten, och τ är en tids- eller avklingningskonstant.



Figur 60: I efterklangsrum försöker man åstadkomma ett diffust ljudfält genom att hänga upp hårda reflekterande plattor, så kallade diffusorer, med slumpvis orientering och placering.

Hur ser ljudfältet i ett rum ut om man har en källa i rummet? Vad som kommer att ske i ett rum är att nära källan kommer man att få ett ljudfält som liknar det i fritt tält – *direktfält*; längre från källan får man ett fält som beror på efterklängen i rummet – *efterklangsfält*, se figur Figur 61. I mätresultaten i Figur 19, kapitel 3, avviker mätningarna från frifältsresultaten (att ljudtrycksnivån minskar med 6 dB per fördubblat avstånd): dessa avvikelser beror på efterklangsfältet som man har i rummet.

²⁶ 27 bokstäver.



Figur 61: Direktfält och efterklangsfält som funktion av avstånd från källan, r . Kurvan gäller för stora odämpade rum. För hårt dämpade rum blir lutningen för "efterklangsfältet" istället ca 3 dB/avståndsfördubbling. Jämför med Figur 19.

5.3 AKUSTIKREGLERING

Det Sabine gjorde när han förbättrade akustiken i föreläsningssalen kallar vi idag *akustikreglering* eller *akustikplanering*. Denna term innefattar allt man gör i rum för att förbättra de akustiska förhållandena, till exempel insättning av ljudabsorbenter för att minska efterklangstiden eller uppsättning av skärmar för att minska direktljud.

Om vi börjar med att göra en analys av efterklangstiden så får man först bestämma vad rummet ska användas till, innan man bestämmer hur lång efterklang man vill ha. För att uppfatta tal bra vill man ofta ha kortare efterklang än om man ska framföra musik. Men även elförstärkta konserter brukar kräva en betydligt kortare efterklangstid än t ex vad en kör behöver.

Exempel

Hur beräknar man hur mycket ljudabsorption som krävs i en konsertsal?

För en konsertsal brukar man önska en efterklangstid enligt²⁷

Frekvens Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Efterklangstid, s	2,6	2,0	1,7	1,7	1,7	1,7

Lägg märke till skillnaden i tid för olika frekvenser, man brukar föredra längre efterklangstid för låga frekvenser. Nu behöver vi beräkna rummets volym. Om man har en $23 \times 7.7 \times 46 \approx 8000 \text{ m}^3$ stor sal krävs det enligt ekvation (2)

$$T_{60} = K \cdot \frac{V}{A} \Rightarrow A = K \cdot \frac{V}{T_{60}} \begin{cases} T_{60} = 2,6 \Rightarrow A \approx 500 \text{ m}^2 \\ T_{60} = 2,0 \Rightarrow A \approx 650 \text{ m}^2 \\ T_{60} = 1,7 \Rightarrow A \approx 750 \text{ m}^2 \end{cases}$$

²⁷ Man använder värden som är uppmätta i konsertsalar som anses vara särskilt lyckade. Det gäller dock att tänka på att det är många olika saker som bidrar till att en konsertsal får bra kritik. Både akustiskt sett och i övrigt.

Innan vi börjar beräkna hur mycket absorberande yta som behövs läggas till, så beräknar vi hur mycket som redan finns tillgängligt. En person ger en absorptionsyta på

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A , m^2	0,17	0,36	0,47	0,52	0,50	0,46

En fullsatt sal på 1000 personer ger en absorptionsyta på $170 m^2$ för 125 Hz och så vidare. För att minska effekterna av lite publik på finkulturella arrangemang kan man ha stoppade stolar som ger ungefär samma effekt på ljudabsorptionen vare sig de är upptagna eller inte. Ljudabsorptionen är försumbar utom vid de högsta frekvenserna 2000 och 4000 Hz, vilket ger ett tillskott på 24 respektive $60 m^2$.

Drar vi bort dessa absorptionsytor behöver alltså salens ytor ge en sammanlagd absorptionsyta på

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A , m^2	330	290	280	230	226	230

Det gäller nu att välja väggar och golv så att vi behöver justera så lite som möjligt med tilläggsabsorbenter. För att klara kraven för de låga frekvenserna väljer vi att som golv använda trägolv på regler. Anledningen till de goda lågfrekvenssegenskaperna får sin förklaring senare. Ytan på golvet uppgår till drygt $1050 m^2$.

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionskoefficient α	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Absorptionsyta A , m^2	158	116	105	77	63	70
Återstående absorptionsyta A , m^2	330-158 = 172	290-116 = 174	280-105 = 175	230-77 = 153	226-63 = 163	230-70 = 160

Tack vare den stora golvytan är nu behovet av extra absorption i lågfrekvensen mindre, vilket är bra eftersom det är svårt att öka lågfrekvensabsorptionen i efterhand. Taket väljs med fördel hårt (α litet) för att få ut ljudet i hela lokalen. Då återstår sido- och podieväggarna på ca $900 m^2$. Även här väljer vi material som absorberar bra i lågfrekvensen (8 mm plywood på 50 mm regler), eftersom högfrekvensen som antytts är lättare att klara i efterhand.

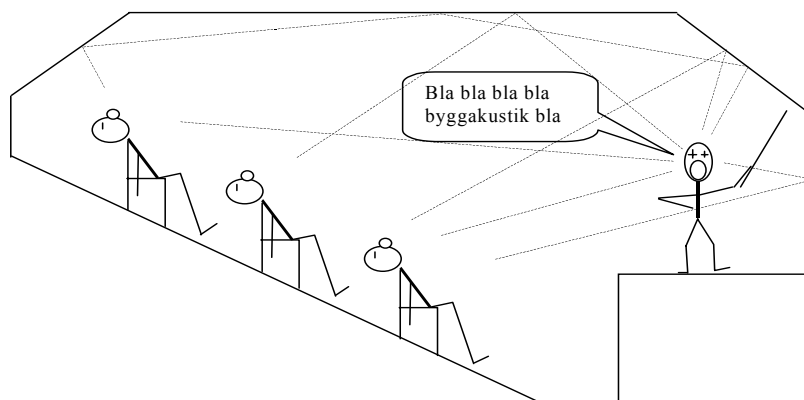
Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptions-koefficient α	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Absorptionsyta A , m^2	250	198	153	81	90	97
Avvikelse från önskad absorptionsyta A , m^2	172-250 = -78	174-198 = -24	175-153 = 22	153-81 = 72	163-90 = 73	160-97 = 63

Som vi kan se, ligger vi nu ganska nära optimal önskad absorptionsyta. För låga frekvenser till och med över, men det är såpass lite att det inte borde innebära några problem. Det är dessutom svårt att prediktera utfallet så noggrant. Vi får för 125 Hz oktaven

$$T_{60} = 0.161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{8000 \left[\frac{m^3}{m^2} \right]}{578 \left[\frac{m^2}{m^2} \right]} = 2.23 s$$

vilket är såpass bra att vi nöjer oss med det. Det kan behövas en del tilläggsabsorption för högre frekvenser, men detta kan i så fall ordnas senare med till exempel porösa absorbenter, se vidare i absorbentavsnittet.

I exemplet ovan diskuterade vi inte alls hur till exempel extra absorbenter skulle fördelas med tanke på ljudfältet. Vi gör ett resonemang kring andra faktorer med hjälp av Figur 62.



Figur 62: Exempel på olika vägar som ljudet kan ta sig fram via i en sal från talare till åhörare. Om ljudet ej reflekteras på sin väg kallas det direktljud.

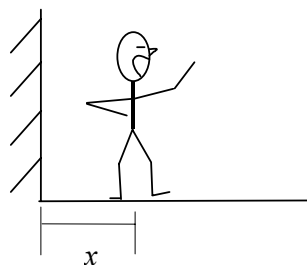
Om vi utgår från en talare eller musiker, så behövs det en del reflekterande ytor, t ex skärmar, i närheten bakom för att få ut mer ljudvolym i lokalen och, inte minst viktigt, för att den som framträder ska höra sig själv. Man kan här ta hänsyn till *lagen om första vågfronten* eller, som den också kallas, *precedence-effekten*:

Om man hör ett ljud dels direkt från talaren och dels som en reflex (eller en fördröjd högtalaråtergivning) inom 25 ms därefter, så uppfattar man bara det första direktljudet (talaren), fast starkare.

Det låter alltså fortfarande som om allt ljud kom direkt från talarens mun till lyssnarens öra. Detta även om det senare av ljuden skulle vara upp till dubbelt så starkt. Fenomenet inverkar alltså positivt på ljudets styrka och kvalitet.

Exempel

Tillämpning av precedenceeffekten.



Om man har en reflekterande vägg eller skärm bakom ljudkällan och man vill dra nytta av denna effekt, så ska alltså avståndet från väggen, för att reflexen ska komma inom $t=25 \cdot 10^{-3}$ s efter direktljudet, högst vara

$$x = \frac{c \cdot t}{2} \approx 4 \text{ m}$$

där siffran två i nämnaren beror på att ljudet färdas fram och tillbaks och ljudhastigheten är $c=340$ m/s.

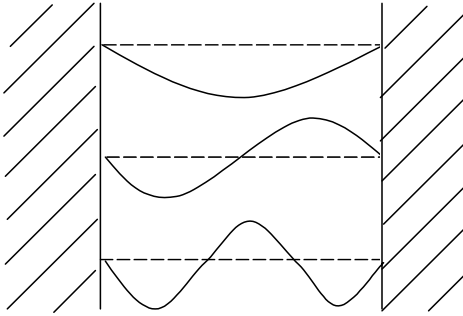
Om vi sedan fortsätter bakåt i salen, så bör man ha stor vinkel på läktaren eftersom framförvarande publik annars absorberar för mycket ljud. Taket bör, som ovan nämnts, vara hårt för att få ut ljudet bakåt i salen. Slutligen bör väggarna vara diffuserande (alltså sprida reflexerna i slumpvisa riktningar) för att man ska få en bra rumskänsla. Detta brukar oftast vara viktigt (=märkas tydligt) i stora salar. Speciellt gäller det att diffusera bakväggen för att undvika skarpa och tydliga enskilda reflexer tillbaks till talaren. Om man vinklar bakväggen/bakre taket kan man dessutom leda lite extra ljudenergi till de bakersta raderna, jämför Figur 62. Har man stor ljudanläggning brukar man istället absorbera bort så mycket som möjligt av bakväggsreflexen.

Dessa åtgärder hjälper dock bara till en viss del om bakgrundsnivån från fläktar, trafikbuller och dylikt är för hög. Ofta får man först säkerställa att ljudisoleringen utåt (se förra kapitlet) är tillräckligt god och att fläktdonen är riktigt dimensionerande så att de inte låter för mycket. Höga ljudnivåer från fläktar kan dock minskas i efterhand genom att bygga till en ljuddämpare vid utflödet. Normen för fläktljud är att det ska ligga under 25 dB(A).

Ett fenomen som kan vara besvärligt är så kallat *fladdereko* som uppstår när ett rum har två hårda parallella väggar och övriga ytor antingen absorberar eller diffuserar ljudet. Resultatet blir att energin dröjer kvar i form av reflexer mellan de två parallella väggarna och ett speciellt ekoljud hörs, som brukar beskrivas som ”plåtigt” eller som när man slår till en styv metallfjäder. Om man inte råkar tycka att det låter coolt så kan man eliminera fladderekot till exempel genom att snedställa väggarna (ca 5° räcker) eller genom att diffusera eller absorbera reflexerna från väggen.

5.4 MODER OCH STÅENDE VÅGOR

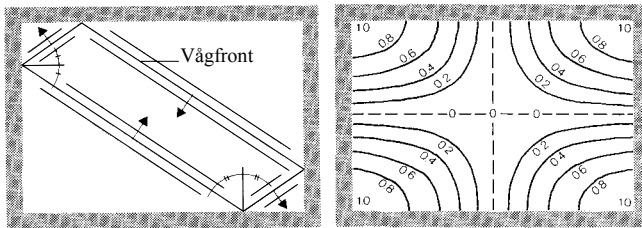
Fladderekot i förra avsnittet uppkom alltså mellan två hårda parallella väggar. Man kan se dessa som ränder i ett endimensionellt problem, eftersom ljudet huvudsakligen kommer att studsas fram och tillbaka i en riktning. Randvillkoret²⁸ för hårda reflexer är partikelhastigheten för ljudvågen, $v=0$. Mellan de två ränderna kommer därför ljudfältet att anta alla lösningar till egenvärdesproblemet²⁹ på hastighetsfördelningen (se Figur 63). Dessa olika vågformer som hör till varsin *egenfrekvens* brukar kallas för *modformer* och varje sådan utgör en *mod*, vilket



Figur 63: De tre första möjliga lösningarna på den en-dimensionella vågekvationen med randvillkoret $v=0$. Bilden kan visa strängar, eller hastighetsfördelning för endimensionella ljudvågor - det ser likadant ut.

är ett abstrakt begrepp som syftar på den specifika lösningen. Ofta använder man ordet *mod* både för att benämna en specifik lösning och när man menar modens form (alltså fältvariabelns variation över rummet). Tillsammans med dessa former hör ett tryckfördelningsmönster.

Om vi för in två ränder till så får vi ett tvådimensionellt rum, som får lite mer komplicerade modformer (jämför Figur 64). Lägg märke till att trycket är högst ute i hörnen och lägst vid symmetrilinjerna.



Figur 64: I ett rektangulärt rum kan man få tvådimensionella modformer för propagerande vågor, till vänster. Motsvarande kurvor till höger förbinder punkter med samma, konstanta tryck. Talen anger relativt ljudtryck.

Ännu mer komplicerat blir ett tredimensionellt rum som får ytterligare två ränder. I bostäder kan man höra moderna speciellt tydligt i badrum. Detta beror på att badrum, förutom att de oftast har mycket reflekterande väggar, är små och att de första moderna därför kommer ganska högt upp i frekvens och därför är separerade frekvensmässigt. Moderna ger sig till känna för vissa toner, egenfrekvenserna, vilket gör att man när man sjunger en skala kan höra hur vissa

²⁸ Hur man matematiskt beskriver att väggen (i princip) är opåverkad av ljudvågens rörelse och hur det inverkar på vågekvationens lösning i rummet. Kolla gärna i böckerna från analyskurserna om det känns oklart.

²⁹ D v s alla sinusformer som är noll vid ränderna, jfr lösning av andragradsekvationer av typen vågekvation från Analys A.

toner får rummet att "sjunga" med och förstärka ljudet (pröva om/när du duschar). I ett vanligt rum finns det, minst, sex stycken ränder. Detta gör att det blir mycket komplicerat att räkna ut de olika modformerna, förutom för moderna med lägst egenfrekvens. Ett rum med skokartongsform och dimensionerna L , B och H , har egenfrekvenserna

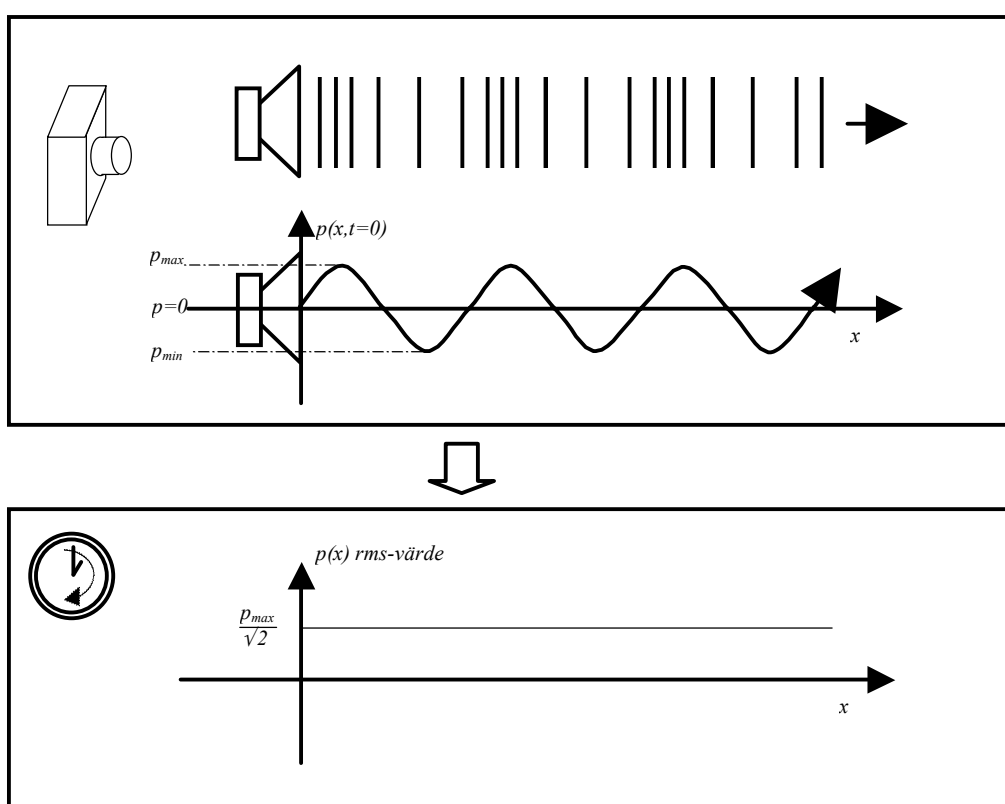
$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2}$$

där

c är ljudhastigheten

n_x, n_y, n_z är heltal som kan anta alla värden

Å andra sidan är det ganska lätt att räkna ut hur många moder det finns i varje frekvensband. Detta bestäms i princip bara av volymen på rummet. Påståendet att man kan bygga bort moder med komplicerade rumsformer är därför fel. Man bara flyttar dem något, frekvensmässigt.



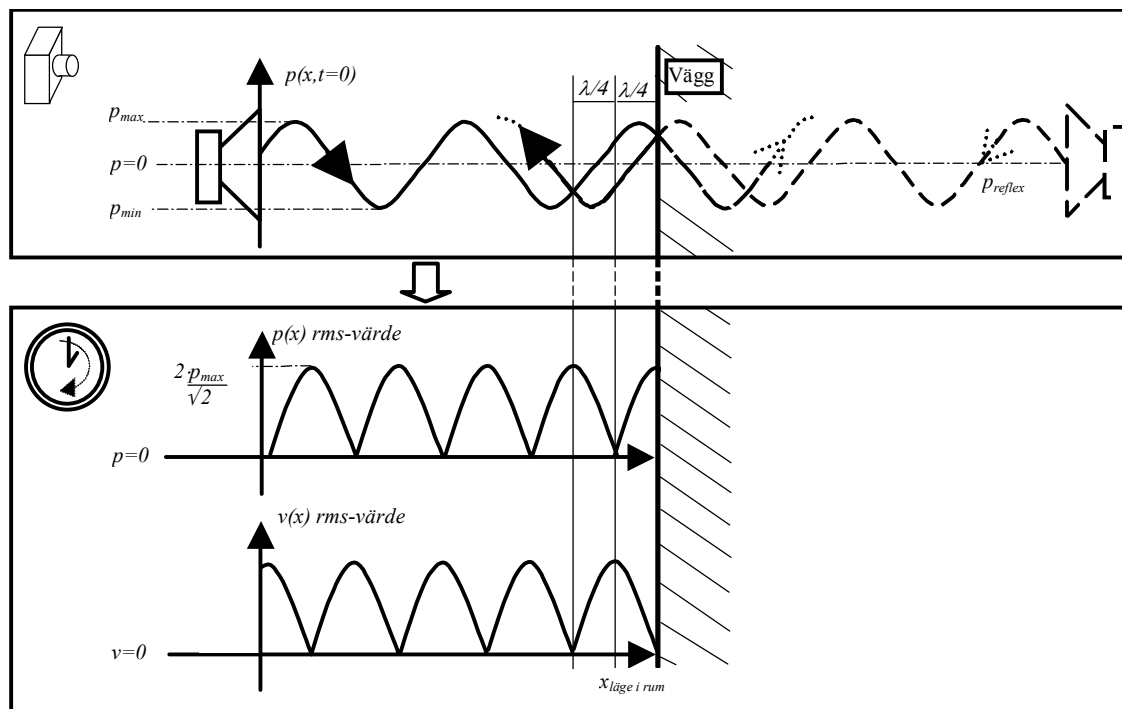
Figur 65: Den översta bilden visar en ögonblicksbild av en högtalare som skickar ut ljud framåt, vilket medför att de olika planen med luftmolekyler förskjuts i förhållande till varandra. Därunder visas motsvarande tryckfördelning i rummet. Kameran representerar att det är en ögonblicksbild. I nästa ögonblick har vägen flyttat sig bort från högtalaren.

I bilden längst ner ser vi motsvarande rms-värde. Klockan representerar att det är ett tidsmedelvärde över rummets positioner.

Som vi konstaterade ovan är partikelhastigheten $v=0$ vid ränderna. Därför har vi maximal tryckamplitud vid ränderna eftersom partikelhastigheten och tryck alltid ligger $\pi/2$ radianer ($=90^\circ$) ur fas. Ett annat sätt att se samma sak är att den hårda randen reflekterar allt som en spegel.

Om en högtalare står vid en vägg kan man alltså tänka att en spegelkälla står på motsvarande plats på andra sidan väggen och skickar ut ljud med samma fas, frekvens och amplitud. Först tittar vi på hur en högtalare skickar ut en ljudvåg där vi inte har någon rand, t ex utomhus. Figur 65 överst visar hur en ögonblicksbild av luftmolekylernas läge ser ut (tänk dig att vi hade kunnat ta ett foto av luftmolekylplanens läge med en kamera). Därunder ser vi motsvarande tryckfördelning, fortfarande alltså som en ögonblicksbild. Över tiden kommer denna våg att vandra framåt med konstant hastighet och vi får då ett tidsmedelvärde i rummet - ett rms-värde - som är jämnt fördelat i rummet, nederst.

Men hur ser det ut vid en vägg? Tänk först att vi har en likadan signal som i Figur 65. Överst i Figur 66 sätter vi nu in en vägg och en fiktiv spegelkälla som representerar vad som händer på grund av randen. Precis vid väggen kommer ljudtrycksvågorna från högtalaren och spegelkällan alltid att mötas i fas³⁰ och kan därmed adderas amplitudmässigt. Vid en perfekt reflekterande vägg kommer amplituden alltid att vara dubbelt så stor som för den inkommande vågen. Alltså blir även rms-värdet dubbelt mot om det enbart funnits den inkommande vågen.



Figur 66: Bilden överst visar tryckfördelning för samma högtalarsignal som i Figur 65 men reflekterad mot en vägg. Reflexen fungerar på samma sätt som en fiktiv spegelhögtalare (streckad linje).

Bilden nederst visar rms-värden (därav klocksymbolen); överst tryckamplitud och därunder motsvarande hastighetsamplitud. Observera den stillastående periodiska variationen över rummet.

Detta leder oss in på fenomenen *stående vågor* och *interferens* (jämför kapitlet om ljudutbredning). Om vi flyttar oss ut en fjärdedels våglängd från väggen så kommer ljudtrycket från spegelkällan *alltid* att vara i motfas med högtalaren - vi får utsläckning (se

³⁰ Det är ju lika långt från ljudkällan till väggen som från spegelkällan till väggen, och de sänder ut identiska signaler.

Figur 66). Eftersom detta alltid gäller kommer rms-värdet att bli noll den punkten. På samma sätt kommer vi, om vi fortsätter ytterligare en fjärdedels våglängd ut från väggen, att återigen få addering med samma fas. Att de olika vågorna stöter ihop och på så sätt påverkar varandra kallas interferens³¹. Resultatet blir en lokal höjning eller minskning av tryck- och hastighetsamplitud beroende på om amplituderna adderas i eller ur fas. För de fall då de olika källorna är placerade på konstant avstånd från varandra och sänder ut signaler med samma fasförhållande blir resultatet en stående våg. Amplituden av de adderade signalerna kommer då att variera enligt ett fast mönster i rummet (därav namnet stående våg), vilket vi såg i fallet med spegelreflex ovan.

5.5 TRANSMISSIONENS INVERKAN

Om man, som Sabine, bara bryr sig om hur mycket som reflekteras kan man definiera absorptionen som ”den energi som inte reflekteras”, ekvation (1.b). I sådana fall är till exempel öppna fönster oerhört bra absorberer. Vill man ha bra absorption i basområdet så är det enklast att låta ljudenergin läcka ut ur rummet. Oftast är detta dock en mindre bra idé av flera anledningar; till exempel skulle enbart sjukligt nyfikna människor i längden stå ut i flerfamiljshus och vid trafikerade gator skulle oljudet utifrån ofta vara värre än den ljudnivåminskning av inomhusljudet som åstadkoms genom ljudtransmission i ut ur huset. I sådana fall får man utvidga definitionen av absorptionskoefficienten till

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4)$$

där vi infört τ , som är en *transmissionskoefficient*, vilken (jämför absorptions- och reflektionskoefficienten i ekv. (1.b)) uppfyller

$$\tau = \frac{\Pi_t}{\Pi_i}$$

Om man vill bygga en vägg som reflekterar så lite som möjligt men inte transmittar ljudenergin vidare måste man maximera den sorts absorption som motsvarar förbrukning av ljudenergi. För att kunna klara detta så måste vi börja i rätt ände: Som vi redan sett i föregående kapitel så är ljudabsorbenter i många fall väldigt dåliga för ljudisolering (utom vid betydande tjocklek). Därför måste man bygga upp ett system där vi utgår från något som är en bra ljudisolator. Vi har då något som vi lite ingenjörsmässigt kan approximera med randvillkoret att väggen är fast inspänd, det vill säga att allt ljud som kommer in reflekteras. Reflexen från denna ska vi nu minimera.

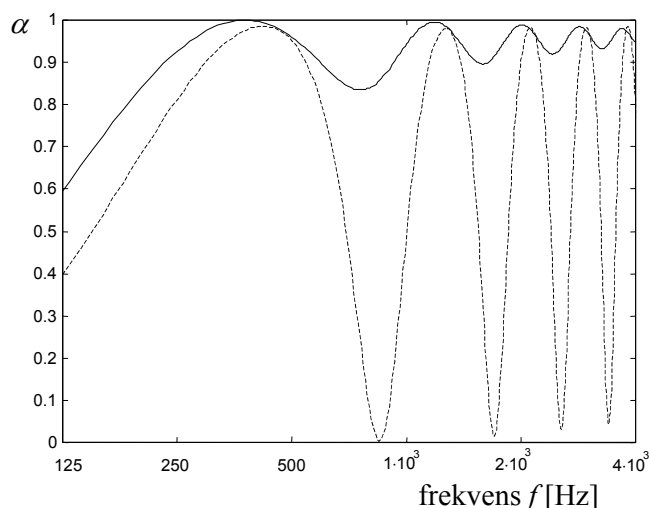
5.6 LJUDABSORBENTER

5.6.1 Porösa absorbenter

Ljudenergin måste på något sätt övergå till någon annan sorts energi om vi vill absorbera ljud utan någon transmission. Vi har i princip två möjligheter; antingen kan ljudet övergå direkt till värmeenergi genom friktion av luftmolekyler mot en yta, eller så sätter ljudet genom luftmolekylernas rörelse fart på någon struktur och därefter sker värmeförluster.

³¹ Jämför med ishockeytermen interference - en spelare påverkar den andre genom att stöta ihop med honom.

Den absorbenttyp som kallas *porösa absorbenter* fungerar enligt den första principen. Luftmolekyler som strömmar genom porer i mineralull, gardiner och dylika material förlorar sin rörelseenergi genom friktion på grund av luftens viskositet. Som vi såg i avsnittet om moder och stående vågor så står luftmolekylerna stilla precis invid en hård vägg. Därför är detta det sämsta stället att placera en tunn absorbent på. På samma sätt som för ljudtrycket kan man se hastigheten $v=0$ vid väggen som en addition av högtalarljudvågens hastighet och



Figur 67: Streckad linje visar absorptionskoefficient för ett tunt tungt tyg som är utsträckt 200 mm framför vägg. Heldragen linje visar 200 mm djup absorbent direkt mot vägg. Lägg märke till att frekvensskalan är logaritmisk, vilket är vanligt för den här typen av kurvor.

reflexljudvågens hastighet i den punkten. Skillnaden blir att reflexen måste ha omvänd fas för att uppfylla randvillkoret $v=0$ vid väggen, som ju ligger exakt mitt emellan högtalaren och spegelkällan. Därför ser vi, när vi betraktar partikelhastighetens variation i rummet, ett stående vågmönster som är förskjutet en fjärdedels våglängd, $\lambda/4$, i förhållande tryckmönstret (jfr Figur 66).

Detta kan man lätt illustrera med en spiral kopplad till en högtalare i ena änden och fast inspänd mot en vägg i den andra änden, vilket demonstreras på föreläsning. Vid den fasta inspänningen står spiralen still, medan den oscillerar fram och tillbaka med stor amplitud i vågriktningen en fjärdedels våglängd ut. Bromsar man rörelsen vid en hastighetsnod händer det inget, men om man bromsar upp rörelsen vid en hastighetsbuk avstannar rörelsen för hela spiralen. Ytterligare en fjärdedels våglängd ut från inspänningen är spiralen återigen still och så vidare. Varje varv på spiralen fungerar i princip som olika plan med luftmolekyler. Om vi alltså vill låta en tunn absorbent, till exempel i form av en gardin, få maximal ljudabsorptionseffekt för en viss frekvens måste vi flytta den (minst) ut till den första hastighetsbukan som ligger $\lambda/4$ ut från väggen. Alltså kommer absorptionen också att variera mycket med frekvens för en gardin, jämför Figur 67 där man kan se hur hastighetsbukarna flyttas förbi gardinen efterhand frekvensen ökas. Ju längre ut från väggen, ju mindre påtagligt brukar det stående våg-fenomenet märkas, varför det bästa resultatet brukar uppnås vid noden närmast väggen. Absorptionen från en porös absorbent framför en orörlig vägg blir alltså helt beroende på förhållandet mellan absorbenttjockleken och ljudets våglängd, det vill säga frekvensberoende men normerat på den aktuella tjockleken.

Exempel

Hur tjock måste en skiva mineralullsabsorbent vara för att den ska dämpa riktigt bra i frekvensområdet ner till 100 Hz om den placeras mot en hård vägg?

För att absorbenten ska absorbera riktigt bra måste den första hastighetsbukan för den stående vågen från väggen räknat ligga innanför absorbentens fysikaliska utsträckning. För alla frekvenser detta är uppfyllt, dvs alla frekvenser över en brytfrekvens då denna buk ligger på absorbentens ytterkant, kommer absorptionen för en bra absorbent ligga nära $\alpha=1$. Om man väljer brytfrekvensen till $f=100$ Hz så kommer buken att hamna (ljudhastigheten är upp till 1.4 gånger lägre för luften i mineralull vid låga frekvenser)

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{c_{abs}}{f \cdot 4} = \frac{280 \text{ m/s}}{100 \text{ Hz} \cdot 4} = 0.70 \text{ m}$$

ut från väggen och följaktligen måste absorbenten minst vara så tjock.

Exempel

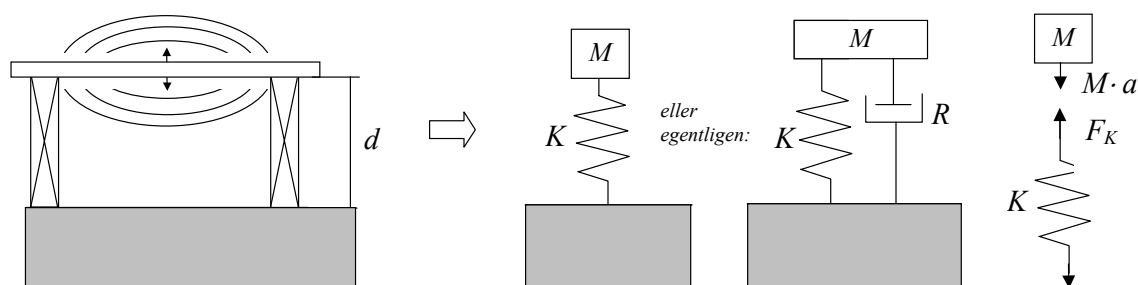
Hur ska en gardin vara för att den ska funkra riktigt bra som absorbent?

Först bör den vara tung för att inte svänga med ljudvågorna så att luftmolekylerna får maximal relativ hastighet mot gardinen över ett brett frekvensområde. Dessutom bör den vara ordentligt veckad för att täcka in ett så brett frekvensområde som möjligt och inte hänga för nära väggen. Om man vill att den ska fungera bra runt 100 Hz så kan vi använda samma beräkning som i exemplet ovan, vilket innebär att den bör hänga 85 cm ut från väggen. Ett mer normalt avstånd är 8.5 cm ut från väggen vilket innebär att gardinen absorberar bäst vid 1000 Hz.

5.6.2 Resonansabsorbenter

Av resonemanget ovan förstår vi att om man vill utvidga en porös absorbents effektiva frekvensområde nedåt i frekvens så blir absorbenttjocklekarna snabbt opraktiskt stora. Men det finns ett alternativ om man vill ha en absorbent som fungerar bra i ett godtyckligt valt, men smalare, frekvensområde. Man använder istället den andra principen och låter ljudvågorna sätta fart på ett resonant system. Systemet får inte vara för tungt för luftmolekylerna att sätta igång, varför man brukar tala om membranabsorbenter för att belysa principen. Om man försöker beskriva ett trägolvs rörelse på regler med luftspalt ovanpå ett tungt tjockt betonggolv vid ljudpåverkan, så har man i princip ett *fjäder-massasystem* enligt Figur 68. Från fysikkursen minns vi att ett sådant system har en *resonans*. Därav namnet

resonansabsorbenter. I verkligheten finns det alltid inbyggt en *dämpare*, som vi definierar



Figur 68 Fjäder-massasystem som analogi till en tunt golvs (massan, M) rörelse framför en luftspalt (fjädersystem med fjäderkonstanten K) och tungt betonggolv (fast inspänning). Längst till höger är friläggningen skisserad.

som något som förbrukar energi, i alla system och det är tack vare denna som ljudenergin kan minskas. Hur *mycket* som absorberas kan man slå upp i tabeller, men vad som ofta är ännu intressantare (jämför exemplet med konsertsalen ovan, där vi eftersträvade mycket lågfrekvensabsorption) är *var* resonansfrekvensen hamnar. Vi gör en friläggning med beteckningar och mått enligt Figur 68. Om golvet har en ytvikt på $M \text{ kg/m}^2$ och luftspaltens bulkmodul är $D = P_0 \gamma = 1 \cdot 10^5 \cdot 1.4 = 1.4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, vilket per ytenhet ger en fjäderkonstant $K = D/d$, så kan vi beräkna golvet's resonansfrekvens som för vilket fjäder-massasystem som helst. Vi frilägger fjäderkraften

$$F_K = K \cdot x = \frac{D}{d} \cdot x$$

och ställer upp Newtons lag

$$F = M \cdot a = -M \cdot \omega^2 \cdot x$$

Tillsammans ger dessa båda samband

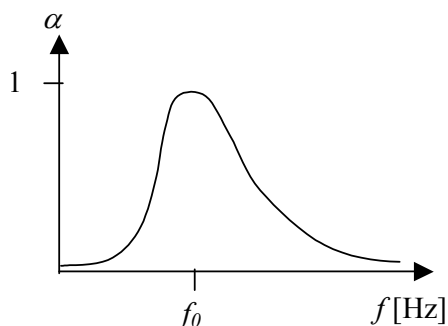
$$-M \cdot \omega^2 + D/d = 0$$

$$\Rightarrow M \cdot \omega^2 = D/d$$

varur resonansfrekvensen erhålls som

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{D} \sqrt{\frac{1}{Md}} \approx 60 \sqrt{\frac{1}{Md}}$$

Ju mindre dämpat systemet är (det vill säga ju mindre ljudenergi som förbrukas i konstruktionen), ju smalare och högre blir resonanstoppens absorption uppritad som funktion av frekvens. Därför brukar man ibland lägga till lite extra dämpning, till exempel i form av mineralull, för att få bättre absorptionsegenskaper i ett bredare frekvensband.

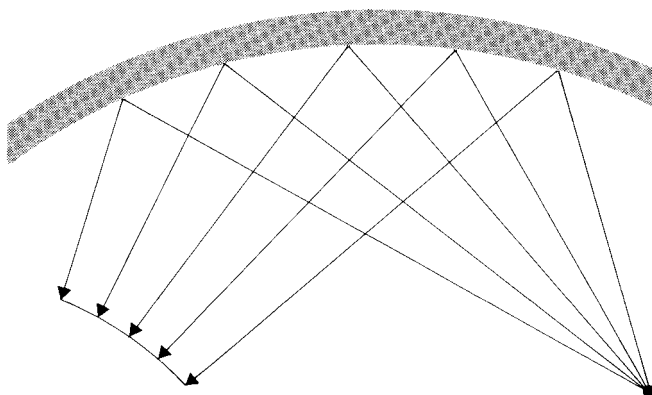


Figur 69:Principiellt utseende för absorptionen hos en resonansabsorbent.

Slutligen ska nämnas att om vi använder oss av två av luftens egenskaper, att det både har massa och bulkmodul, så kan man låta luften självt utgöra ett resonant system. Man får då en resonanstopp för luftens rörelse som kan bromsas med porösa absorbenter, alltså en kombination av de båda principerna ovan. En gardin en bit ut från vägg, som vi diskuterade ovan, kan sägas vara en variant av en resonansabsorbent. Resonansen är då $\lambda/4$ ut från väggen där vi känner av massegenskaperna och luften närmast väggen fungerar då som fjäder. Ännu bättre märks detta om vi accelererar luft och därmed framhäver massegenskaperna hos luft (Newtons andra lag $F=Ma$), helst framför en stillastående luftkudde som då fungerar som en fjäder (jämför luftens egenskaper när den är inspärrad i till exempel en badboll - den fjädrar först när den möter en rand). Detta är till exempel orsaken till att vi hör en tydlig resonans om vi blåser i flaskor - halsen accelererar rörelsen och där fungerar luften som en massa medan luften i kroppen fungerar som en fjäder.

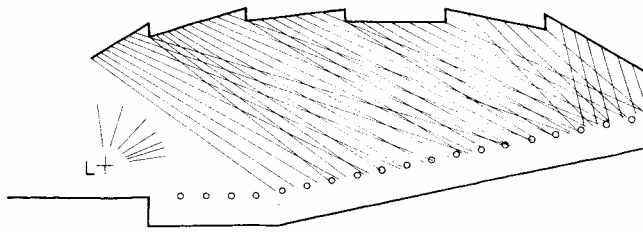
5.7 STRÅLGÅNG

Om man vill få en bättre känsla för vad som händer vid vägg- och takreflexer kan man tänka i termer om strålgång. Vad man gör då är i princip att dra en linje från källan och låta reflexen studsa tillbaka som om det hade varit en ljusstråle som träffade en spegel. Om vi gör det för några enkla fall kan vi till exempel se att man vid konkava ytor kan få en fokusering av reflexerna som ger dålig akustik (Figur 70). Detta är något som kan inträffa till exempel i restauranger vid valvtak, där man i vissa fall kan höra samtal från bord bredvid lika starkt som om personerna suttit vid samma bord.



Figur 70: Fokusering av ljud från källa (till höger) på grund av reflex vid krökt yta.

Man kan även kontrollera att till exempel ett tak sprider ljudet jämnt över en samlingslokal (Figur 71).



Figur 71: Med strålgångstänkande kan man fördela ljudet från scen jämnt till åhörarplatserna.

Nuförtiden använder man ofta strålgångsprogram i datorer för att kontrollera att man inte bygger in onödiga fel i hörsalar och dylikt. Men eftersom beräkningarna blir osäkra efter de första reflexerna, på grund av komplexiteten i problemet, så kan man i nuläget inte vara helt säker på exakt hur till exempel en konsertlokal kommer att upplevas på förhand. Mycket resurser läggs ner, till exempel på Chalmers, på att så bra som möjligt simulera ljudet i lokaler. I slutändan vill man nå därhän att man utifrån en ritning ska kunna lyssna och bedöma hur akustiken i den färdiga lokalen kommer att upplevas.

5.8 ÖVNINGSUPPGIFTER

1. (Funderingsuppgift) Man säger att vanligt tal på en meters avstånd motsvarar en ljudnivå på ca 60dB. Alltså borde man inomhus i regel kunna märka av efterklängen vid vanliga samtal. Ofta gör man inte det - fundera över vad detta kan bero på? Om man märker av den, hur märker man den?
2. I ett rum med volymen (längd x bredd x höjd) $V = 10 \times 5 \times 2 = 100 \text{ m}^3$ är taket och väggarna totalreflekterande och golvet absorptionskoefficient är $\alpha = 0.09$. Vilken absorptionskoefficient måste en ljudabsorbent minst ha vid 1000 Hz om den täcker taket och efterklängen i rummet högst får vara 0.5 s?
3. För att öka taluppfattbarheten i en hörsal installerar man en ljudanläggning. Eftersom salen är stor sätter man en högtalare vid talaren och en 15 m ut i publikhavet. Hur lång tid bör man fördröja högtalarljudet i de olika positionerna? Vad kan man tänka sig för risker med ett sådant förfarande?
4. a) Om en vägg har absorptionskoefficienten $\alpha = 0.5$, vad blir ljudtrycksnivån för en reflex i dB om den inkommande signalen har ljudtrycksnivån $L_p = 100 \text{ dB}$, och vad blir den totala ljudtrycksnivån från de båda bidragen? Antag korrelerad addition. Tips: minns från ljudutbredningsdelen att ljudeffekt är proportionellt mot ljudtrycket i kvadrat, det vill säga $\Pi \propto p^2$.
b) Om en vägg har absorptionskoefficienten $\alpha = 0.99$, vad blir ljudtrycksnivån för en reflex i dB i om den inkommande signalen har ljudtrycksnivån $L_p = 100 \text{ dB}$, och vad blir den totala ljudtrycksnivån från de båda bidragen?
5. Om man sätter en 10 cm tjock mineralullsskiva mot en vägg, hur kommer det principiella utseendet på absorptionskoefficienten α som funktion av frekvensen att bli? Räkna med luftens ljudhastighet och rita upp.
6. Vilken tjocklek bör man välja på reglarna som trägolvet är lagt på i konsertsals-exemplet (det vill säga vilket djup har luftspalten under golvet), om man vill ha resonansfrekvensen $f = 125 \text{ Hz}$ och golvet har ytvikten $M = 5 \text{ kg/m}^2$?

6 BILAGA 1, UTDRAK UR SS 02 52 67

4.2 Klassindelning

Tabell 4.1 – Luftljudsisolering. Minsta värden för vägt reduktionstal, R'_w eller $R'_w + C_{50-3150}$

Utrymme	Klass A $R'_w + C_{50-3150}$ (dB)	Klass B $R'_w + C_{50-3150}$ (dB)	Klass C R'_w (dB)	Klass D R'_w (dB)
Mellan lägenhet och utrymmen utanför lägenhet,	60	56	52"	48
dock mellan loftgång och lägenhet samt mellan trapphus/korridor och hall (eller motsvarande avskiljbara utrymme) innanför tamburdörr.	48	44	39"	36
Inom lägenhet med fler än 2 rum. Mellan minst ett rum och bostadens övriga rum/kök.	44	40	–	–
1) Det rekommenderas att anpassningstermen, $C_{50-3150}$, används också i klass C. Om termen används skall samma gränsvärde tillämpas.				

ANM 1 – Klassningen är inte tillämplig i extrema situationer av typen "musiklokal under bostad". I dylika fall kan även klass A vara otillräcklig. En särskild dimensionering bör utföras så att kraven på högsta ljudtrycksnivå i tabell 4.3 Klass B uppfylls.

ANM 2 – Beträffande dörrars ljudisolering ges vägledning i bilaga A. I klass C bör man välja en dörr i minst Klass R'_w 35 dB mot en hall i lägenhet. För lägenheter med bostadsrum direkt mot trapphus gäller första raden i tabell 4.1. Man bör välja en dörrkonstruktion i minst Klass R'_w 50 dB. Hur man räknar ut det resulterande reduktionstalet hos en skiljekonstruktion som är uppbyggd av olika byggdelar med olika reduktionstal visas i bilaga F.

ANM 3 – Skärpningen mellan klass C och klass B kan speciellt för lätta konstruktioner på grund av anpassningstermens utökade frekvensområde många gånger bli betydligt större än den klasskiljande differensen 4 (5) dB.

Tabell 4.2 – Stegljudsisolering. Högsta värden för vägd normaliserad stegljudsnivå, $L'_{n,w}$ eller $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$

Utrymme	Klass A $L'_{n,w}$ och $L'_{n,w} + C_{I, 50-2500}$ (dB)	Klass B $L'_{n,w}$ och $L'_{n,w} + C_{I, 50-2500}$ (dB)	Klass C $L'_{n,w}$ (dB)	Klass D $L'_{n,w}$ (dB)
I bostadsrum från utrymme utanför lägenhet,	50	54	581"	62
dock från trapphus, korridor eller loftgång.	56	60	641"	68
Inom lägenhet. Till ett av flera bostadsrum	64	68	–	–
1) Det rekommenderas att anpassningstermen, $C_{I,50-2500}$, används också i klass C, på samma sätt som i klasserna A och B. Om termen används gäller gränsvärdet således både för $L'_{n,w}$ och $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$				

ANM 4 – Beträffande stegljudsdämpning för övergolv och golvbeläggningar ges vägledning i bilaga B.

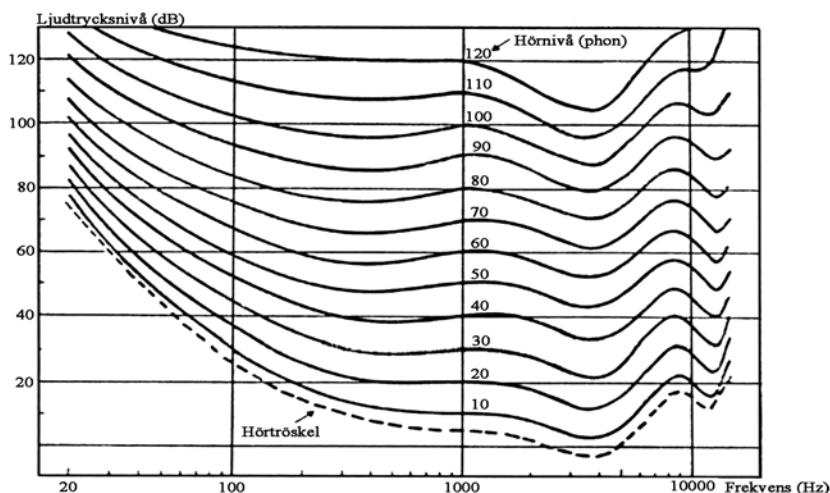
7 REPETITIONSFRÅGOR

7.1 KAPITEL 1

1. Vilka mått brukar användas för att kvantifiera buller?
2. Nämn några skäl till varför det är svårt att finna entydiga samband mellan bullernivåer i dB och den subjektivt upplevda störningen av buller.
3. Vilken bullernivå bör inte överskridas under en 8 timmars arbetsdag om risken för hörselskada ska vara liten?
4. Förutom att ge hörselskador kan buller orsaka en rad andra negativa effekter på människan. Nämn minst 5 st.
5. Vilken myndighet ger ut föreskrifter och råd när det gäller buller och ljudisolering i våra bostäder?
6. Ange högsta tillåtna ekvivalentnivå från trafikbuller i ett sovrum enligt Boverkets riktlinjer.

7.2 KAPITEL 2

1. Vad karakteriserar en longitudinal- resp. transversalvåg?
2. Vilken typ av vågutbredning har vi i luft?
3. Hur hög är ljudhastigheten i luft?
4. Rangordna ljudhastigheten i följand material: Luft, vatten, stål och betong. Börja med materialet med lägst vågutbredningshastighet.
5. Hur förändras ljudhastigheten om temperaturen i luften stiger?
6. Om periodtiden för en sinussvängning ökar hur förändras då frekvensen?
7. Resultatet av en ljudmätning presenteras ofta i ett spektra. Vad har vi längs axlarna i ett spektra?
8. Vad är ljudtrycket om ljudtrycksnivån är 0 dB?
9. Beräkna våglängden vid frekvenserna 50, 1000 och 5000 Hz.
10. Beskriv kortfattat funktionen för ytter-, mellan- och innerörat.
11. Vilken ljudtrycksnivå måste en ton vid 50 Hz ha för att subjektivt låta lika starkt som en ton vid 1000 Hz med ljudtrycksnivån 30 dB? Använd diagrammet i figur 1.



Figur1.

12. Vad menas med hörtröskeln?
13. En hörselnedsättning i det högre frekvensområdet är speciellt handikappande. Varför?
14. Vad innebär en vägning i dB(A) och varför görs den?
15. Antag att en maskin ger upphov till en ekvivalent ljudtrycksnivå på 90 dB(A) under en arbetsdag. För att minska bullerexponeringen stängs maskinen av under 3 av arbetsdagens 8 timmar. När maskinen är avstängd är ljudtrycksnivån 60 dB(A). Vad blir den ekvivalenta ljudtrycksnivån över arbetsdagen för detta fall?

7.3 KAPITEL 3

1. Ljudnivån från ett vindkraftverks generator har uppmätts till 85 dB på 10 meters avstånd. Vad blir ljudtrycksnivån på 80 meters avstånd? Ledning: Räkna med sfärisk vågutbredning.
2. Ljudutbredningen från en vältrafikerad trafikled kan antas vara cylindrisk. Hur mycket faller då ljudtrycksnivån per avståndsfördubbling?
3. Vind och temperatur påverkar ljudutbredningen utomhus. Beskriv hur vindriktning och temperaturens variation med höjden över marken påverkar ljudutbredningen. Visa gärna i figurer.
4. Vad är fas?
5. Vid mätning av tåg- och trafikbuller utanför bostäder tillämpas vanligen två principer för mikrofonplaceringen. Nämn vilka och vad som gäller i resp. position.
6. Ljudtrycksnivån från en ljudkälla har uppmätts till 60 dB. Hur mycket högre blir nivån för fyra likadana ljudkällor?
7. Två ljudkällor ger tillsammans en viss ljudnivå i en mikrofonposition. Hur mycket svagare ska den ena källan vara för att inverka mindre än 0.1 dB på totalnivån? Motivera svaret med en beräkning.
8. Skissa i en figur hur ljudtrycksnivån varierar framför en fasad när ljudet är bredbandigt. Ange typiska ljudnivåer relativt nivån för infallande ljud utan fasad.
9. Vad är diffraktion?
10. Nämn några faktorer som påverkar en bullerskärms effektivitet när det gäller att minska trafikbuller.
11. a) Skissa i en figur hur ljudtrycksnivån varierar med avståndet från en ljudkälla när du befinner dig inomhus i ett relativt odämpat rum. Ange typiska lutningar.
b) Hur påverkas kurvan om absorptionen i rummet ökas?
12. Diskutera hur avståndet till ljudkällan i ett rum kan påverka val av bullerminskande åtgärder.

7.4 KAPITEL 4

1. Ljudalstringen i en byggnad brukar delas in i ett antal kategorier. Ange dessa och beskriv hur ljudet genereras i de olika fallen.
2. I svensk standard SS 025267 görs en indelning i fyra olika ljudklasser. Beskriv ljudförhållandena för de olika klasserna
3. Hur definieras transmissionskoefficienten?
4. Hur definieras reduktionstalet?
5. En vägg har reduktionstalet 60 dB. Hur stor andel av den infallande ljudvågens effekt passerar genom väggen.

6. En väggs reduktionstalskurva bestäms från en mätning enligt $R=L_S-L_M+10\log(S/A)$. Beskriv vad de olika parametrarna står för.
7. Väggars ljudisolering anges ofta med ett vägt reduktionstal s.k. R_w -värde. Beskriv i allmänna ordalag hur R_w -värdet bestäms.
8. Vid beräkning av en väggs reduktionstalskurva utifrån en mätning görs en korrektion med $10\log(S/A)$. Varför görs denna?
9. Stegljudsnivån bestäms enligt $L_n=L_M+10\log(A/10)$. Beskriv hur en stegljudsmätning går till.
10. Vid en fältmätning har följande reduktionstal uppmätts för en skiljevägg. Beräkna R'_w -värdet för väggen. Använd referenskurvan i Kap. 4.

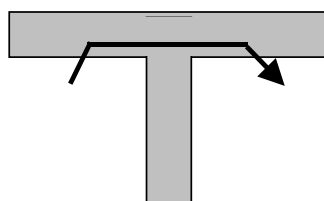
Frekv (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R' (dB)	40	38	41	44	43	52	53	54	56	57	63	64	64	66	67	66

11. Vid en fältmätning har följande stegljudsnivåer uppmätts för ett bjälklag. Beräkna $L'_{n,w}$ -värdet för bjälklaget. Använd referenskurvan i Kap. 4.

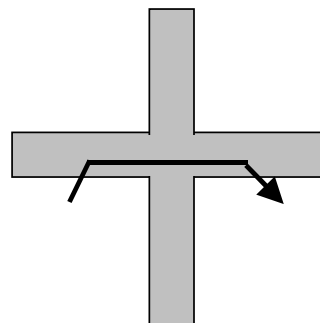
Frekv (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
L'_n (dB)	63	62	64	64	63	60	57	53	47	42	39	36	36	29	24	20

12. Beskriv principiellt utseende för en enkelväggs reduktionstalskurva. Ange typiska lutningar och beteende i kurvan.
13. Beskriv koincidensfenomenet och ange vad som menas med kritisk frekvens.
14. Hur mycket ökar en enkelväggs reduktionstalskurva om väggens ytvikt fördubblas?
15. Beskriv det principiella utseendet för en dubbelvägg. Ange typiska lutningar och förklara dippar i kurvan.
16. Ljudisoleringen för en lättbetongvägg utan ytbeklädnad är ofta otillräcklig som ljudisolerande konstruktion. Varför?
17. Vilken akustisk funktion har mineralullen i en dubbelvägg av gips?
18. Hur påverkar reglarna i en lättvägg ljudisoleringen?
19. I en skiljevägg med ytan 10 m^2 och reduktionstalet 60 dB vid 1000 Hz finns en springa med ytan 1 cm^2 . Beräkna det sammansatta reduktionstalet för konstruktionen. Formeln för sammansatt reduktionstal är $R = -10\log\left(\frac{1}{S}(S_1 10^{-R_1/10} + S_2 10^{-R_2/10} + \dots)\right)$ där $S=S_1+S_2+\dots$
20. Vid fältmätningar av väggars reduktionstal blir värdena ofta lägre än vad som erhålls i laboratorier. Förklara varför.
21. Vilken av nedanstående konstruktioner är sämst ur flanktransmissionssynpunkt. Tjockleken på betongplattorna är samma i båda fallen.

a)



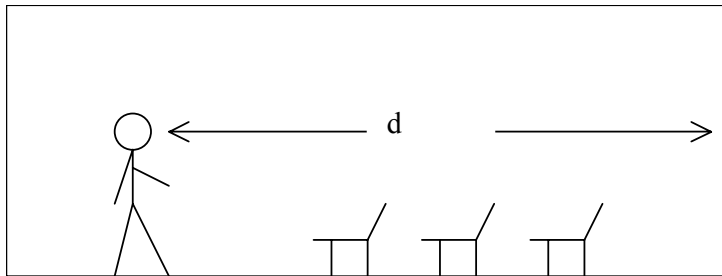
b)



22. Vilka komponenter i en fasad är oftast dimensionerande för ljudisoleringen?

7.5 KAPITEL 5

1. Hur definieras absorptionsfaktorn α ?
2. Hur definieras efterklangstiden T_{60} ?
3. Hur förändras efterklangstiden i ett rum om absorptionen ökas?
4. Beskriv hur absorptionskoefficienten för ett absorberande material mäts med hjälp av ett efterklangsrum.
5. Beror efterklangstiden av ljudets styrka?
6. Rita det principiella utseendet för ljudnivåns avståndsberoende från en källa i ett rum. Hur inverkar absorptionen på kurvan?
7. Vad menas med precedenseffekten?
8. Vad menas med fladdereko?
9. Rita i en och samma figur det principiella utseendet för absorptionskoefficienten som funktion av frekvensen för a) en porös absorbent mot hård yta b) en porös absorbent mot hård yta fast tjockare än föregående c) en resonansabsorbent.
10. Reflexer som kommer senare än 50 ms upplevs ofta störande både av talare och lyssnare. I ett klassrum kan en störande reflex komma från bakväggen (se figuren). Hur långt får avståndet d mellan läraren och bakväggen maximalt vara för att reflexen inte ska komma senare än 50 ms.



8 SVAR OCH LÖSNINGAR

KAPITEL 2

Svar

- 1a) A, b) 6 dB, c) B, d) A och B är lika ljudstarka
2. Se lösningar.
3. a) 93 dBA, b) Nej ($L_{Aeq,8} = 87$ dBA), c) 78 dBA
4. A-1, B-3, C-4, D-2

Lösningar

1. a) Eftersom våglängden är omvänt proportionell mot frekvensen ($\lambda = c/f$) och A har lägst frekvens har alltså A längst våglängd.

b) Ekvation 4 ger

$$L_{pA} - L_{pB} = 20 \log(\tilde{p}_A / p_{ref}) - 20 \log(\tilde{p}_B / p_{ref}) = 20 \log(\tilde{p}_A / \tilde{p}_B) = 20 \log(1/0,5) = 6 \text{ dB}$$

c) Figur 13 visar att ton A (150 Hz, 30 dB) befinner sig vid 20 phonskurvan medan ton B (1000 Hz, 30 dB) befinner sig vid 30 phonskurvan. Alltså bör ton B uppfattas ljudstarkast.

d) Då A och B är 80 dB befinner sig på samma phonkurva bör de uppfattas lika ljudstarka.

2. Vid nivåer kring 70 – 80 dBA är inte dBA ett bra mått för upplevelsen av ljudstyrkan. Dessutom är ett mått på ljudstyrkan inte samma sak som ett mått på störningen ljudet ger. Graden av störning beror på ljudets sammansättning av ljusa och mörka toner och hur ljudet varierar med tiden och dessutom av individuella associationer och preferenser.

3. a) A-vägningen ges ur tabell 9. Ekvation 8 ger

$$L_A = 10 \log \left(10^{\frac{92-26,2}{10}} + 10^{\frac{98-16,1}{10}} + 10^{\frac{95-8,6}{10}} + 10^{\frac{91-3,2}{10}} + 10^{\frac{86-0}{10}} + 10^{\frac{83+1,2}{10}} + 10^{\frac{80+1,0}{10}} \right) = 93 \text{ dBA}$$

b) Ekvation 9 ger

$$L_{Aeq,8} = 10 \log \left(\frac{1}{8} \int_0^8 10^{L(t)/10} dt \right) = 10 \log \left(\frac{1}{8} \cdot \left(10^{65/10} \cdot 8 \cdot \frac{3}{4} + 10^{93/10} \cdot 8 \cdot \frac{1}{4} \right) \right) = 87 \text{ dBA}$$

Arbetsmiljön är inte ok då $L_{Aeq,8}$ överskrider 85 dBA.

$$\text{c) } L_{Aeq,8} = 10 \log \left(\frac{1}{8} \cdot \left(10^{65/10} \cdot 8 \cdot \frac{3}{4} + 10^{93/10} \cdot \frac{1}{4} + 10^{63/10} \cdot 7 \cdot \frac{1}{4} \right) \right) = 78 \text{ dBA}$$

4. A-1, B-3, C-4, D-2

KAPITEL 3

Svar

1. För sfärisk vågutbredning minskar ljudtrycket med 6 dB vid fördubblat avstånd. I en plan våg kommer ljudtrycket att vara konstant då avståndet fördubblas.
2. $L=93.1$ dB.
3. 29.6 dB.
4. 16.3 dB om man godtar ett fel på 0.1 dB.
5. $x=7.9$ m
6. Källan kommer ha en spegelkälla på motsvarande position under marken. Om källan ligger på marken så kommer spegelkällan och källan att befinna sig i samma position, alltså 6 dB förstärkning jämfört med utan hård mark, i övrigt sfärisk utbredning. Om källan befinner sig lite ovanför marken så tillkommer interferens fenomen på grund av tvåkällor.
7. Punkt a) är bäst medan punkt e) också kan vara bra.

Lösningar

1. För sfärisk vågutbredning minskar ljudet med 6 dB vid fördubblat avstånd. I en plan våg kommer ljudtrycket att vara konstant när avståndet fördubblas.
2.
$$L = 10 \log \left(\Pi \rho c / p_{ref}^2 4\pi r^2 \right) = 10 \log \left(0.1 \cdot 1.2 \cdot 340 / \left(2 \cdot 10^{-5} \right)^2 4\pi 2^2 \right) = 93.1 \text{ dB}.$$
3. Jämför med exemplet i avsnitt 3.4.4. Använd ekvation (12). $10 \log(10^3 + 10^3 + 10^{X/10}) = 35$ dB. Antilogaritmering ger $X=29.6$ dB.
4. Använd ekvation (12). $10 \log(10^{X/10} + 10^{(X-\Delta X)/10}) = X + 0.1$ dB $\Leftrightarrow 10^{X/10} + 10^{(X-\Delta X)/10} = 10^{(X+0.1)/10}$
 $\Leftrightarrow 1 + 10^{-\Delta X/10} = 10^{0.1/10} \Leftrightarrow \Delta X = -10 \log(10^{0.1/10} - 1) = 16.3$ dB.
5. Jämför med exemplet i kapitel 3.4.4. Vi kan anta okorrelerad addition, och vi vet att $L_A = 97 - 20 \log \left(\sqrt{x^2 + 1^2} / 1 \right)$, $L_B = 102 - 20 \log \left(\sqrt{x^2 + 2^2} / 1 \right)$. Numerisk lösning eller genom att helt enkelt pröva sig fram får vi att $x=7.9$ m.
6. Källan kommer att ha en spegelkälla på motsvarande position under marken. Om källan ligger på marken kommer spegelkällan att befinna sig i samma position, alltså 6 dB förstärkning jämfört med utan hård mark, i övrigt sfärisk utbredning. Om källan befinner sig lite ovanför marken tillkommer interferensfenomen på grund av två källor.
7. Punkt a) är bäst medan punkt e) också kan vara bra. Anledningen är att i dessa båda punkter är den effektiva skärnhöjden som störst, skärmen täcker störst andel av vinklarna för källan respektive mottagaren.

KAPITEL 4

Svar och lösningar

1. a) Från ekvation (5) ser vi direkt uppställningen för reduktionstal som

$$R = L_s - L_m + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right). \quad \text{Reduktionstalet för exempelvis 50 Hz blir då}$$

$$R_{50} = 68 - 55 + 10 \log \left(\frac{10}{2} \right) = 20.0 \text{ dB. Lösningen för alla R syns i Tabell 14 nedan.}$$

b) Det vägda reduktionstalet beräknas som beskrivet i avsnitt 4.4.1. När vi sänkt referenskurvan 20 dB erhålls försämrande avvikelser enligt Tabell 14. Summan av negativa avvikelser syns vara $1 + 2 + 3 + 4.8 + 4.5 + 6.5 + 2.5 + 2 + 2 = 28.3$, vilket är mindre än 32. Referenskurvan kan nu avläsas vid 500 Hz till 32 dB, se även Figur 72.

c) Springläckage behandlas i avsnitt 6. Ekvation (10) kombinerat med ekvation (3) ger oss att $R = -10 \log \left(\tau + \frac{S_s}{S} \right)$. Från ekvation (4) får vi att $\tau = 10^{-\frac{R}{10}}$ och vi kan genast räkna ut det

nya reduktionstalet som $R = -10 \log \left(10^{-\frac{30.5}{10}} + \frac{10^{-4}}{10} \right) = 30.5 \text{ dB}$. Det extra läckaget märks alltså inte.

d) Samma resonemang som i förra uppgiften ger att $R = -10 \log \left(10^{-\frac{60}{10}} + \frac{10^{-4}}{10} \right) = 49.6 \text{ dB}$.

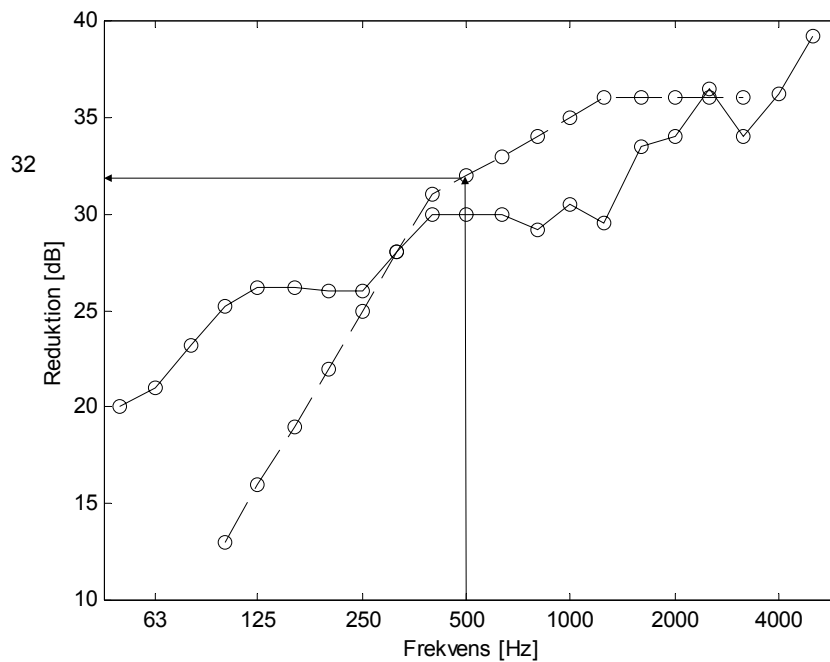
Nu blir det däremot en kraftig försämring på 10.4 dB.

e) När man mäter i laboratorier använder man lokaler som är ytterst ljudtäta. I en fältsituation förekommer däremot flanktransmissioner av olika slag. Dessa överhörningar leder i många fall mycket ljudenergi andra vägar än igenom väggen. Ett annat alternativ kan vara att någon gjort hål i väggen för att göra diverse installationer. Det är heller inte säkert att väggens alla kanter är så täta som tanken kanske var ifrån start.

Tabell 14 Resultat i uppgift 1

Frekvens [Hz]	Reduktionstal [dB]	Avvikelser [dB]
50	20.0	
63	21.0	
80	23.2	
100	25.2	12.2
125	26.2	10.2
160	26.2	7.2
200	26.0	4.
250	26.0	1.0
315	28.0	0.0
400	30.0	-1.0

500	30.0	-2.0
630	30.0	-3.0
800	29.2	-4.8
1000	30.5	-4.5
1250	29.5	-6.5
1600	33.5	-2.5
2000	34.0	-2.0
2500	36.5	0.5
3150	34.0	-2.0
4000	36.2	
5000	39.2	



Figur 72 Avläsning av referenskurva. Flyttade referensvärden (streckad linje) och uppmätta värden (heldragen linje) är uppritade.

2. a) Stegljud behandlas i avsnitt 4. I första uppgiften används ekvation (7) rakt av. För t.ex. 160 Hz tersbandet fås då $L_n = 61 + 10 \log\left(\frac{6}{10}\right) = 58.8$ dB. Resterande resultat ses i Tabell 15.

b) Den vägda stegljudsnivån erhålls enligt avsnitt 4.2. Om vi flyttar referenskurvan uppåt 17 dB erhålls avvikelser enligt Tabell 15. Ogynnsamma avvikelser är i tabellen de negativa, summan av dessa är då $3,5 + 6 + 8,8 + 11,5 = 29,8$ vilket är mindre än gränsvärdet 32,0. Vi läser av referenskurvan vid 500 Hz och ser att $L_{n,w} = 77$ dB.

Tabell 15 Resultat i uppgift 2

Frekvens [Hz]	Stegljudsnivå [dB]	Avvikelser [dB]
50	51.0	
63	53.0	
80	54.0	
100	55.0	24.0
125	60.0	19.0
160	58.8	20.2
200	60.8	18.2
250	63.0	16.0
315	61.8	17.2
400	62.8	15.2
500	65.5	11.5
630	67.8	8.2
800	70.5	4.5
1000	69.5	4.5
1250	71.0	0
1600	71.5	-3.5
2000	71.0	-6.0
2500	70.8	-8.8
3150	70.5	-11.5
4000	70.8	
5000	69.1	

3. a) Koincidens inträffar då det infallande ljudets våglängd projicerad på väggen överensstämmer med böjvåglängden för väggen (se Figur 44). Den lägsta frekvens för vilken koincidens inträffar kallas kritisk frekvens och svarar mot att ljudet faller in parallellt med väggen. När detta sker är våghastigheterna lika det vill säga $c_B = 340 \text{ m/s}$. Vi får att $340/7 = \sqrt{f} \Rightarrow f = 2359 \text{ Hz}$.

b) Se svaret i a)

c) Minska infallsvinkeln mot väggen (se figur 44). Det krävs allt längre våglängder i väggen för att matcha inkommande våg. Vid infallsvinkeln 0 grader ser man att det inte går utan en oändlig våglängd. Om våglängden är oändlig blir också hastigheten oändlig eftersom $c = f\lambda$.

4. a) Olika fasadelements sammansättning beskrivs i avsnitt 4.8.1. Vi får direkt ur ekvation (8) att $R = -10\log\left(\frac{1}{14}\left(2 \cdot 10^{-25/10} + 2 \cdot 10^{-45/10} + 10 \cdot 10^{-55/10}\right)\right) = 33.4 \text{ dB}$.

b) Förbättra fönstret eftersom fönstret har lägst reduktionstal och dessutom är fullt genomförbart att förbättra, jämför t ex avsnitt 4.8.2. Om vi räknar med att förbättra fönstret 5 dB fås en förbättring av väggen med nästan lika mycket. (Räkna själv ut förbättringen som övning). En förbättring på 5 dB för något av de andra elementen ger inte i närheten av denna goda förbättring för det totala reduktionstalet.

KAPITEL 5

Svar

1. På ens eget tal kommer benledning att stå för omkring hälften av ljudet, så att avklingningen sker mycket snabbare från ens eget perspektiv. Är det mycket sorl i lokalen maskeras avklingningsförloppet. Även annat kringljud från fläktar, datorer och så vidare kan maskera efterklängen. I sorlig miljö brukar man märka av efterklängen genom att den samlade ljudeffekten blir hög. Annars märker man ofta efterklängen mest som en klangförändring i talet.
2. $\alpha=0.55$
3. Cirka 25 ms respektive 69 ms.
4. a) 3 dB respektive 105 dB.
b) 20 dB respektive 101 dB.
6. $f=120$ Hz.

Lösningar

2. Från exemplet sätter vi att golvet har $\alpha=0.09$ vid 1000 Hz. Detta motsvarar en absorptionsyta på $\alpha = \frac{A}{S} \Rightarrow A = \alpha \cdot S = 0.09 \cdot 10 \cdot 5 = 4.5 \text{ m}^2$. Sabines formel ger att en absorptionsyta på $T_{60} = K \cdot \frac{V}{A} \Rightarrow A = K \cdot \frac{V}{T_{60}} = 0.161 \cdot \frac{100}{0.5} = 32.3 \text{ m}^2$ behövs. Alltså ska taket ge ett tillskott till absorptionsytan på $32.3 - 4.5 = 27.7 \text{ m}^2$. Vi får $\alpha = \frac{A}{S} = \frac{27.7}{10 \cdot 5} = 0.55$ som ett minimivärde för absorbenten.
3. Vill man dra nytta av precedence-effekten bör man fördröja ljudet vid talaren cirka 25 ms. 15 meter ut bör man fördröja med ytterligare $\Delta t = \frac{15[m]}{340[m/s]} = 0.044 \text{ s}$. Risker med ett sådant förfarande är till exempel att ljudet från bakre högtalaren hörs framåt eller att oönskade reflexer blandar de olika tidsfördröjda ljuden tills all fasinformation försvinner och ljudet blir grötigt. Bäst fungerar elektriskt förstärkta system i hårt dämpade lokaler.

- 4 a) Eftersom $1 = \rho + \alpha$ har vi reflektionskoefficienten $\rho = 0.5$ och $\rho = \frac{\Pi_r}{\Pi_i} = \frac{1}{2}$. Vi kan nu

beräkna skillnad i ljudtrycksnivå, $\Delta L = 10 \cdot \log\left(\frac{p_i^2}{p_{ref}^2}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{p_r^2}{p_{ref}^2}\right)$,

genom att skriva om uttrycket med hjälp av logaritmlagarna

$$\Delta L = 10 \cdot \log\left(\frac{p_i^2}{p_{ref}^2} \cdot \frac{p_{ref}^2}{p_r^2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{p_i^2}{p_r^2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{\Pi_i}{\Pi_r}\right) = 10 \cdot \log(2) = 3 \text{ dB}$$

och alltså får vi ljudtrycksnivån för reflexen $L_{p,r}=100-3=97$ dB. Totalt får vi, eftersom vi adderar helt korrelerade bidrag (identiska till fas och frekvens) och därför kan addera tryckamplituderna

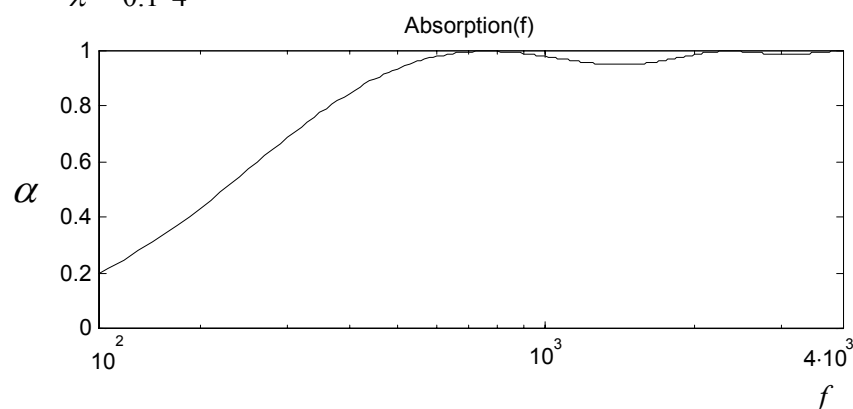
$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \Rightarrow \begin{cases} p_i = p_{ref} \cdot 10^{\frac{100}{20}} \\ p_r = p_{ref} \cdot 10^{\frac{97}{20}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow L = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{tot}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{p_{ref} \cdot \left(10^{\frac{100}{20}} + 10^{\frac{97}{20}} \right)}{p_{ref}} \right) = 104.6 \text{ dB}$$

b) Som ovan har vi $\rho = \frac{\Pi_r}{\Pi_i} = \frac{1}{100}$ och $10 \cdot \log(100) = 20$ dB och alltså får vi ljudtrycksnivån för reflexen $L_{p,r}=100-20=80$ dB. Totalt får vi, som ovan $L = 20 \cdot \log(10^5 + 10^4) = 100.8$ dB.

5. Vi kan räkna med att absorbenten fungerar bra (ligger nära $\alpha=1$) över frekvensen

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{0.1 \cdot 4} = 850 \text{ Hz och faller för frekvenser därunder. En simulering ger}$$



6. Eftersom $f \approx 60 \sqrt{\frac{1}{Md}}$ får vi $d \approx \frac{1}{M} \left(\frac{60}{f} \right)^2 = \frac{1}{5} \left(\frac{60}{125} \right)^2 \approx 46$ mm alltså bör man lite ingenjörsmässigt satsa på regler med dimensionerna 50x50 mm:

$$f \approx 60 \sqrt{\frac{1}{5 \cdot 0.05}} = 120 \text{ Hz, vilket förhoppningsvis ligger tillräckligt nära.}$$

9 INDEX

A

absorbent, 85
absorption, 85
 absorptionskoefficient, 85, 96
 absorptionsyta, 86
addition av ljudtryck, 45
additionsregel, 46
A-filter, 29
aktiv bullerbekämpning, 47
akustikplanering, 89
akustikreglering, 89
akustisk effekt, 37
Arbetsmiljöverket, 12
avståndslag, 37, 39
A-vägning, 7, 29

B

bakgrundsnivå, 92
bandbredd, 23
begränsningsytor, 49
Boverket, 12
Boverkets byggregler, 12
brus, 47
 rosa brus, 24
 vitt brus, 23
buller, 5
bullerskärmar, 53
böjvåg, 68

C

cylindrisk vågutbredning, 40

D

destruktiv interferens, 47
diffraktion, 52
diffusion, 92
diffusor, 87, 88
diffust ljudfält, 87
direktfält, 88
direktljud, 55, 91
dubbelvägg, 68, 71

E

effektaddition, 46
efterklangsfält, 88

efterklangsljud, 55
efterklangsrum, 86
efterklangstid, 86
egenfrekvens, 93
egenvärdesproblem, 93
enkeltvägg, 68

F

fas, 18, 22, 44
 fasskillnad, 22
 fasvinkel, 44
fasadisolering, 79
filter, 23
 oktavbandsfilter, 23
 tersbandsfilter, 23
fjäder-massasystem, 98
fladdereko, 92
flanktransmission, 61, 74
frekvens, 18
frifält, 35
 frifältsvärde, 51

G

geometrisk skugga, 54
grundresonans, 71

H

hammarapparat, 65
Huygen's princip, 53
hörselskador, 9
hörtröskel, 26

I

intensitet, 38
interferens, 46, 48, 49, 95
intermittent buller, 10

K

knutpunktsisolering, 75
koincidens, 69
konstruktiv interferens, 46
korrelerade källor, 45
kritisk bandbredd, 30
kritisk frekvens, 70

L

lagen om första vågfronten, 91
lika-hörnivåkurvor, 26
ljudabsorbent, 85, 96
ljudabsorption, 85
ljudeffekt, 85
ljudenergi, 85
ljudisolering, 57
ljudklass, 58
ljudmätning, 61
ljudreflex, 92
ljudtryck
 effektivvärde, 20
 rms-värde, 20
ljudtrycksnivå, 7, 20
 ekvivalentvärde, 7, 31
longitudinalvåg, 16
loudness, 30
luftljudsisolering, 60

M

maskering, 30
masslag, 69
mjuk mark, 51
mod, 93
 modform, 93

O

okorrelerade källor, 46
oktav, 24

P

periodtid, 18
phonkurvor, 26
plan vågutbredning, 40
porös absorbent, 96
precedence-effekt, 91
psykoakustik, 30

R

reduktionstal, 60
referenskurva för luftljudsisolering, 63
referenskurva för stegljudsnivå, 66

reflektionskoefficient, 85
reflexljud, 55
resonans, 98
resonansabsorbent, 98
resonansfrekvens, 99
riktningskarakteristik, 41
rumsakustik, 55

S

Sabine, 85
sammansatt reduktionstal, 79
sekundärkällor, 53
sfärisk källa, 38
smärtröskel, 26
Socialstyrelsen, 12
spektrum, 19
springläckage, 81
Statens Naturvårdsverk, 12
stegljudsisolering, 65
stegljudsmätning, 65
strålgång, 100
strålningsdiagram, 41
stående vågor, 95

T

taluppfattbarhet, 28
temperatur, 43
ton, 18, 47
transmissionskoefficient, 60, 96
transversalvåg, 16

U

utbredning, 35
utbredningshastighet, 17

V,W

vind, 42
vinkelfrekvens, 18
våghastighet, 17
våglängd, 21
vågutbredningsriktning, 16
vägd stegljudsnivå, 67
vägningskurvor (A,B och C), 29
vägt reduktionstal, 62