

SBI-publik.

STØJ OG LYDISOLATION:

# LYDISOLATION

TEORI, MÅLING, VURDERING OG BESTEMMELSER

---

SBI-NOTAT 24



**STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT**

Danish Building Research Institute





## Støj og lydisolations

LYDISOLATION: Teori, måling, vurdering og bestemmelser  
ved civilingeniør Jørgen Kristensen

### RESUMÉ:

I notatet omtales udviklingen i begrebet lydisolations. Den simple teori for fladers lydisolations og teoriens begrænsninger. Mange forhold har betydning for lydisolations, heriblandt den adskillende bygningsdels udstrækning, materialets porøsitet og bøjningsstivhed, samt tilgrænsende bygningsdeles art og tilslutningsmåde. Resultater fra målinger i laboratorium og i færdige bygninger, hvor monteringsbetingelserne er vidt forskellige, stemmer derfor kun i ringe grad overens. Gennem en række måleresultater er forskellige faktorerers betydning for lydisolations belyst. Vurdering af måleresultater kan ske efter forskellige principper, hvoraf de i Danmark og nabolande benyttede omtales nærmere. Notatets andet afsnit omhandler begrebet trinlydniveau. På tilsvarende måde som for luftlyd dog væsentligt kortere omtales teorien og målinger i færdige bygninger. Endelig omtales de i Danmark og nabolande benyttede vurderingsmetoder.

BYGGERIETS AKUSTISKE MÅLESTATION

Januar 1973

*side 31-35  
51-58  
u-kort*

*00592 P*

YDERLIGERE OPLYSNINGER KAN FÅS VED HENVENDELSE TIL:

Forfatteren

Eftertryk tilladt med kildeangivelsen SBI-NOTAT og nr. Ved brudstykkevis gengivelse er det dog en forudsætning, at ovenstående resumé medtages, da meninger og resultater kan forflygtiges, hvis tekst eller illustrationer tages ud af den oprindelige sammenhæng.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Indledning ..... side 3

I LUFTLYDISOLATION

Teori for luftlydisolation ..... side 3

Massive enkeltvægge ..... side 4

Porøse vægge ..... side 17

Dobbelte vægge ..... side 19

Luftlydisolation i laboratorium ..... side 21

Vægges indsætningsbetingelser ..... side 21

Massive vægge ..... side 22

Porøse vægge ..... side 25

Dobbelte vægge ..... side 26

Andre vægge ..... side 29

Lydtransmission i færdige bygninger ..... side 31

Måling af lydisolation ..... side 33

Vurdering af måleresultater ..... side 35

Middeltallet ..... side 35

Frekvensafhængig kurve ..... side 37

Vurdering af lydisolation i boliger ..... side 41

Hvilke krav stilles til luftlydisolationen ..... side 42

Danmark ..... side 44

England ..... side 45

Finland ..... side 46

Frankrig ..... side 46

Holland ..... side 47

Norge ..... side 47

Sverige ..... side 47

Tyskland DBR ..... side 47

Tyskland DDR ..... side 48

Projektering af lydisolation ..... side 48

Middeltallet 49 dB og sammenhørende kurvekrav ..... side 49

Dansk kurvekrav, ingen middeltal ..... side 50

Danske krav, ingen middeltal, ændring af afvigelses-  
kriterium ... side 50II TRINLYDISOLATION

Bygningslyds opståen og udbredelse ..... side 51

Svømmende gulve ..... side 52

Trinlydniveau målt i laboratorium ..... side 54

Trinlydniveau målt i bygninger ..... side 56



Måling af trinlydniveau ..... side 57  
Middeltal eller frekvensafhængig vurdering ..... side 58  
Vurdering af trinlydniveau i boliger ..... side 60  
Hvilke krav stilles til trinlydniveauet ..... side 61  
    Danmark ..... side 61  
    England ..... side 62  
    Finland ..... side 63  
    Frankrig ..... side 63  
    Norge ..... side 63  
    Sverige ..... side 63  
    Tyskland DBR ..... side 63  
    Tyskland DDR ..... side 64  
    Østrig ..... side 64  
    U.S.A. .... side 64  
Afsluttende bemærkninger ..... side 64  
Litteraturforetgnelse ..... side 67

### Indledning

I midten af forrige århundrede voksede en lang række byer ud af middelalderens stramme byform med de usædvanligt overbefolkede boliger. Der blev i disse år bygget mange boliger af en standard, der selv efter datidens målestok ikke var særlig høj. Lydisolationen i disse boliger var ringe. Den har formentlig været en miljøfaktor, som ikke har haft afgørende indvirkning i datidens livsform. Efterhånden som mennesket fik mere fritid og bedre råd blev lydisolationen en mere betydende faktor i boligbyggeriet. I midten af dette århundrede blev krav til lydisolationen lovfæstet i nogle lande, således i Danmark i 1961. De krav, der blev indført i de forskellige lande var ret forskellige både med hensyn til udformning og med hensyn til kravenes niveau. De fleste krav er oprindelig tilpasset tarv og byggeskik i de pågældende lande uden nogen egentlig videnskabelig eller forskningsmæssig underbygning. Der sker imidlertid i dag en udvikling på dette område, som følges op med internationale standardiseringsstræbelser.

Danske krav)

De danske bestemmelser til lydisolationen afviger på flere punkter fra bestemmelserne i nogle af vore nabolande. Det må formodes, at der med tiden vil ske en harmonisering af disse bestemmelser, idet samhandlen med vore nabolande vil kræve en nedbrydning af handelskranker landene imellem. Det kan derfor være ønskeligt at kende de ligheder og forskelle, som findes i lovgivningen vedrørende lydisolation.

I det følgende er givet en kort oversigt over lydisolationen i teori og praksis samt en oversigt over lydisolationskravene i en række lande som en bedømmelse af, hvilke ændringer det eventuelt vil indebære at konvertere de danske bestemmelser til en form, svarende til den internationalt standardiserede metode til vurdering af luft- og trinlydisolation (ISO R 717). Denne metode anvendes bl.a. i vore nabolande Sverige og Tyskland.

## I LUFTLYDISOLATION

### Teori for luftlydisolation

Læren om lyd - akustik - er et område af fysikken, hvis teoretiske grundlag er blevet udviklet relativt sent i forhold til andre kendte grene af fysikken. Det grundlæggende værk inden for akustikken

"The Theory of Sound" af Lord Rayleigh, udkom i slutningen af forrige århundrede, heri er implicit angivet et udtryk for en vægs lydisolations. Der stilles imidlertid så restriktive forudsætninger, at væggen næppe er praktisk realisabel.

I slutningen af forrige og i begyndelsen af dette århundrede fremkom flere afhandlinger om teorien for vægges lydisolations. Det forudsættes i disse, at væggenes udstrækning er meget stor i relation til lydets bølgelængde, at vægmaterialet er isotropt, at de indfaldende lydølger er plane og at indfaldet sker vinkelret på væggen. Teorien er senere blevet udvidet til bl.a. også at omfatte lydindfald under vilkårlige vinkler. Udderlingen fører desværre til komplicerede, implicite udtryk, hvoraf det ikke umiddelbart er muligt at forklare de enkelte parametres indvirkning på lydisolationsen.

#### Massive enkeltvægge

Forudsættes vinkelret lydindfald, tabsfri udbredelse i vægmaterialet, vægtykkelsen væsentlig mindre end bølgelængden, samt udbredelse af plane lydølger fra væggen til et uendeligt rum, er det muligt at finde et relativt simpelt udtryk for lydisolationsen. Ved de nævnte forudsætninger betragtes en tynd væg, hvis ene side udsættes for et vekseltryk, som er summen af lydtrykkene i henholdsvis den indfaldende bølge og den reflekterede bølge. På væggenes anden side frembringes et tryk, som svarer til lydtrykket i den af væggen udsendte plane lydølge. Lydisolationsen beregnes til:

$$D = 10 \log \left( 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{m\omega}{\rho c} \right)^2 \right) \quad (1)$$

hvor  $m$  er væggenes vægt pr.  $m^2$ ,  $\rho$  luftens massefylde,  $c$  lydhastigheden,  $\omega$  den cykliske frekvens,  $\omega = 2\pi f$ , hvor  $f$  er frekvensen.

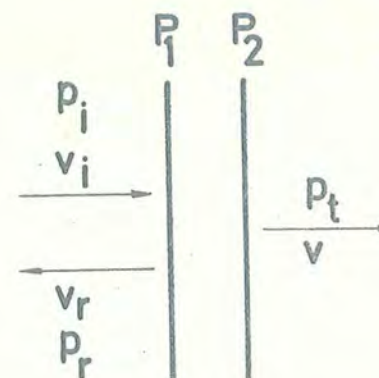
"Vægge uden  
øjningsstivhed")

Efter Newton fås, idet  $P_1$  og  $P_2$  er trykkene på væggenes to sider,  $m$  er væggenes masse pr. arealenhed og  $v$  er væggenes hastighed, faseforskellen mellem trykkene anses for forsvindende:

$$(P_1 - P_2) = m \frac{dv}{dt} \quad (1a)$$

For en harmonisk svingning med vinkelfrekvensen  $\omega$  kan  $\frac{dv}{dt}$  udtrykkes ved  $j\omega v$ , hvor  $j$  er  $\sqrt{-1}$ , d.v.s. en imaginær størrelse.

Fysisk betyder denne, at der er en faseforskel på  $90^\circ$  mellem



tryk og hastighed. Dette fører til:

$$P_1 - P_2 = j\omega m v \quad (1b)$$

Trykket  $P_2$  ved væggen bagside frembringer i luften en plan lyd-  
bølge med trykket  $p_t$ . Mellem tryk og hastighed, består følgende  
relation:

$$p_t = \rho c V \quad (1c)$$

hvor  $\rho$  er luftens massefylde og  $c$  er lydhastigheden. Trykket på  
væggens forside sammensættes af trykkene i den indfaldende og  
den reflekterende lydbølge.

$$P_1 = p_i + p_r = \rho c V_i + \rho c V_r \quad (1d)$$

$$V = V_i - V_r \quad (1f)$$

Af (1d) og (1f) fås:

$$\frac{P_1}{\rho c} + V = 2V_i \quad \text{eller}$$

$$P_1 = 2p_i - \rho c V \quad (1g)$$

Dette udtryk fører i forbindelse med (1b) og (1c) til:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1 + \frac{j\omega m}{2\rho c} \quad (1h)$$

hvoraf dæmpningen  $D$  findes som 10 gange ti-talslogaritmen til

$\left| \frac{p_i}{p_t} \right|^2$ . Dette svarer til udtrykket (1), der findes i de fleste lærebøger i akustik.

For det frekvensområde, som har interesse ved lydisolations i bygninger, og for de kvadratmetervægte, som kommer i betragtning ved de i praksis forekommende bygningsdele, vil gælde følgende betingelse:

$$1 \ll \left( \frac{m\omega}{2\rho c} \right)$$

Indføres denne betingelse i (1) fås:

$$D = 10 \log \left( \frac{m\omega}{2\rho c} \right)^2 = 20 \log \frac{m\omega}{2\rho c} \text{ dB,}$$

der også kan skrives som

$$D = 20 \log m + 20 \log f + \text{konstant.} \quad (2)$$

Udtrykket (2) viser, at lydisolationsen stiger 6 dB ved fordobling af enten massen eller frekvensen. I figurerne 1 og 2 er vist lydisolationsen dels som funktion af frekvensen for konstant masse, dels som funktion af massen ved en fastholdt frekvens. For vægge med større tykkelse vil der være en faseforskel mellem trykkene på væggenes ydersider, hvilket fører til, at udtrykket for dæmpning ændres til:

$$D = 10 \log \left( 1 + \frac{1}{4} \left( n - \frac{1}{n} \right)^2 \sin^2 k_2 d \right) \text{ dB} \quad (3)$$

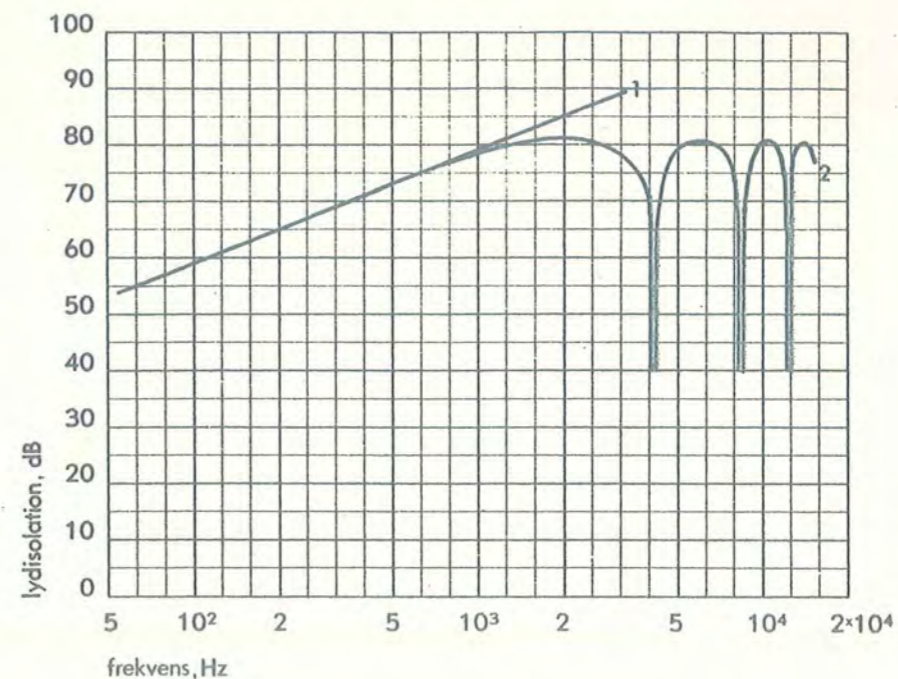
$$\text{hvor } n = \frac{\rho_2 c_2}{\rho c}, \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2} = \frac{2\pi f}{\lambda_2} = \frac{2\pi}{\lambda_2}$$

$\rho$  og  $\rho_2$  er massefylden af henholdsvis luft og vægmateriale,  $c$  og  $c_2$  er lydhastigheden i henholdsvis luft og vægmateriale,  $d$  vægtykkelsen og  $\lambda_2$  bølgelængden i vægmaterialet. Størrelsen  $k_2$  kaldes bølgetal.

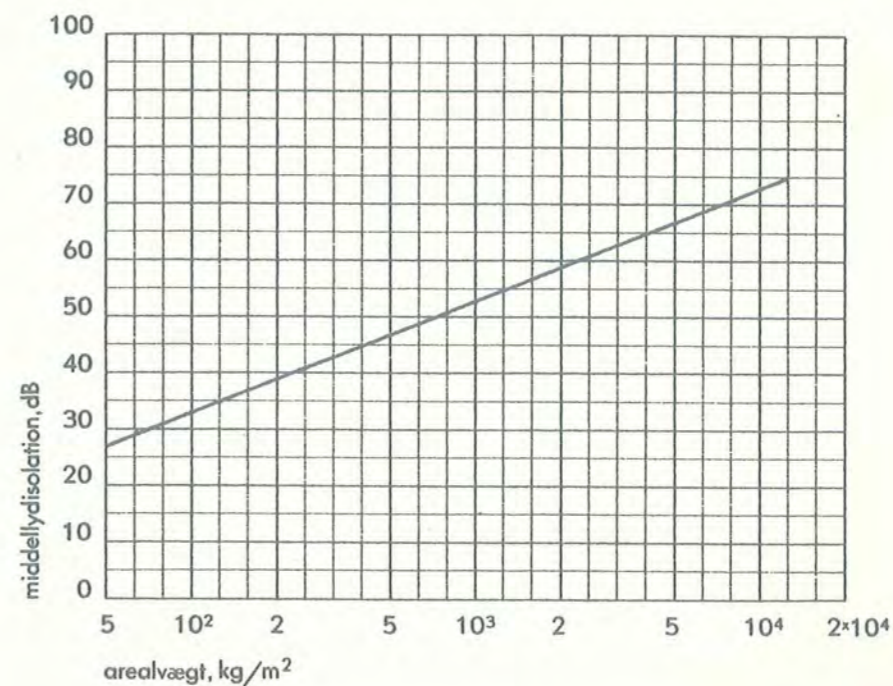
Når  $k_2 d = \pi + s\pi$ , hvor  $s = 1, 2, 3, \dots$ , antager  $D$  værdien nul.

I praksis har det kun betydning for vægge med stor tykkelse. For en betonvæg med tykkelsen 0,50 m vil lydisolationsen først antage værdien nul omkring 4000 Hz.





Figur 1. Lydisolationen som funktion af frekvensen for en 50 cm tyk betonvæg.  
 Kurve 1: Beregnet efter (1).  
 Kurve 2: Beregnet efter (3).



Figur 2. Lydisolationen som funktion af vægten beregnet efter (2).  
 Frekvensen er indsat med værdien  $f = 100 \cdot 3150 = 560 \text{ Hz}$ .

ægtkurve, masse-  
 rve)

Er  $k_2 d \ll 1$  kan sinus udtrykkes ved argumentet, og udtrykket (3) antager værdien (1), idet:

$$\frac{\rho c}{\rho_2 c_2} \approx 0 \quad \text{og} \quad \rho_2 d = m,$$

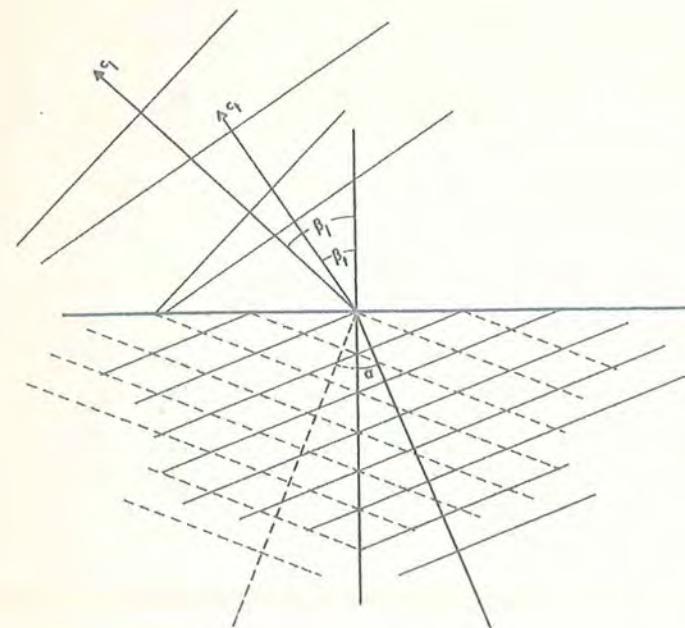
hvor  $m$  er vægts vægt pr. kvadratmeter.

De angivne udtryk (1) og (3) kan også få gyldighed for skråt indfald, blot vil der i udtrykkene komme til at indgå cosinus til indfaldsvinklen.

Efterhånden som måleteknikken blev forbedret, viste det sig, at de simple modeller for beregning af lydets udbredelse var utilstrækkelige. Plane lydbølger i luft udbreder sig således, at de enkelte partiklers bevægelser sker i baner, som er parallelle med udbredelsesretningen. For plane bølger i luft gælder dette i almindelighed, samt for lydbølger i faste stoffer i det specielle tilfælde, hvor lyden falder vinkelret ind på overfladen. Plane bølger betegner en bevægelse, hvor alle udsving, der i et givet tidspunkt ligger i en plan. Sker lydindfaldet under en skrå vinkel mod en flade af fast stof, påvirkes det faste stof af lydbølgerne i luften desuden på en måde, som svarer til en bølgebevægelse i overfladen af det faste stof. Der sker ved overgangen imellem luften og det faste stof en refleksion, hvorved en del af energien tilbagesendes som plane lydbølger. Vinklerne mellem fladenormalen og indfaldsretning, henholdsvis udfaldsretning, er lige store, svarende til den fra optikken kendte regel om ind- og udfaldsvinkel. I det faste stof sker, som det er kendt fra optikken, en brydning ved overgangen fra luften. Der fremkommer herved ikke blot en retningsændring, men også en opløsning af bølgebevægelsen i flere former. Specielt skal fremhæves longitudinal- og transversalsvingninger.

(Brydning ved  
overgang til  
fast stof)

Bølgebevægelsernes brydningsforhold ved overgangen mellem luften og det faste stof er ikke ens for de to svingningsformer. Mellem henholdsvis hastigheden af lydbølgerne i luft og i det faste stof - longitudinalbølger, transversalbølger - og sinus til vinklerne mellem fladenormal og udbredelsesretning består en relation svarende til den fra optikken kendte Snellius' lov:



Figur 3. En lydbølges brydning ved overgang fra luft til fast stof. Den indfaldende lydbølgeenergi fordeles ved overgangen til det faste stof til en reflekteret lydbølge i luft, og til to lydbølger i det faste stof, nemlig en longitudinalbølge og en transversalbølge. Brydningsvinklerne bestemmes af udtrykket (4).

$$\frac{c}{\sin \alpha} = \frac{c_l}{\sin \beta} = \frac{c_t}{\sin \gamma} \quad (4)$$

Ikke alle vinklerne kan antage værdien  $\frac{\pi}{2}$  med mindre komplekse løsninger accepteres. Ifølge den elementære fysik vil en fuldstændig refleksion kunne forventes i dette tilfælde. For strejfende indfald sker der imidlertid ikke en fuldstændig refleksion. Den ikke reflekterede energi omsættes i specielle bølgetyper, såkaldte overfladebølger. Fremkomsten af disse bølgetyper skyldes, at overfladen kan deformeres. Overfladebølger er uden betydning for lydisolationen, men de har væsentlig betydning for svingningsenergis udbredelse i jordoverfladen.

Eksakt teori)

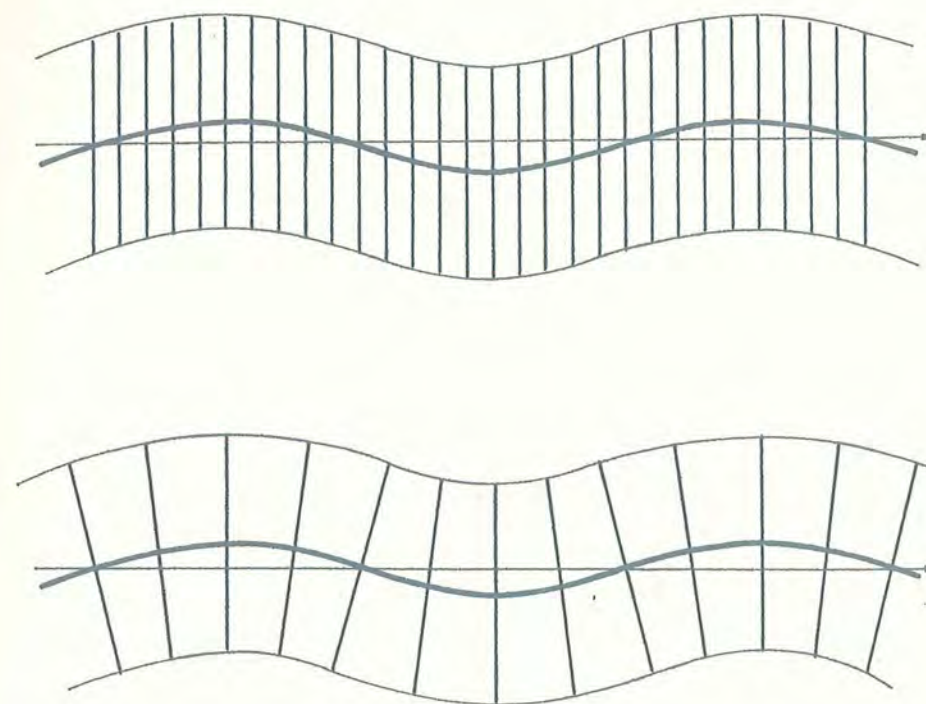
I væggen sker transporten af energi dels i longitudinalbølger, dels i transversalbølger. Der finder gentagne refleksioner sted i en væg, hvilket vanskeliggør en beregning af den transmitterede lydenergi. Eksakte beregninger er første gang udført af Reissner i 1938. De fører imidlertid til helt uoverskuelige resultater.

(Forenklet  
teori for  
tynde vægge)

Ved at betragte problemet ud fra den forudsætning, at vægdimensionerne i praksis er små i forhold til bølgelængden, opstillede Cremer i 1942 en forenklet teori. Ved tynde vægge forstås vægge, hvis tykkelse er mindre end  $1/6 \lambda$ , hvor  $\lambda$  er lydbølgelængden i vægmaterialet. I tynde vægge frembringes ved skrå lydindfald en bølgebevægelse, hvis udbredelsesretning er parallel med vægoverfladen. Bølgebevægelsen minder umiddelbart om den før omtalte transversalbølge, men den betegnes bøjningsbølge. I figur 4 er illustreret henholdsvis en bøjningsbølge og en transversalbølge. Forskellen mellem de to bølgeformer er, at i transversalbølgen sker partikelbevægelserne i baner, der ligger i plane og parallelle tværsnit. I bøjningsbølger sker partikelbevægelsen i baner, der ligger i plane, men ikke parallelle tværsnit, som skifter retning under bølgebevægelsen.

(Påtrykte  
bølger)

Når en lydbølge rammer en væg under en skrå retning, vil den påtrykke væggen overflade en bølgeform, der afhænger af lydtryk og frekvens. I plader og membraner kan der frembringes bølgebevægelser, som



Figur 4. Transversalbølger forekommer kun i medier med stor udstrækning. I tynde plader optræder en udartet bølgeform, en såkaldt bøjningsbølge, der har en vis lighed med transversalbølgen.

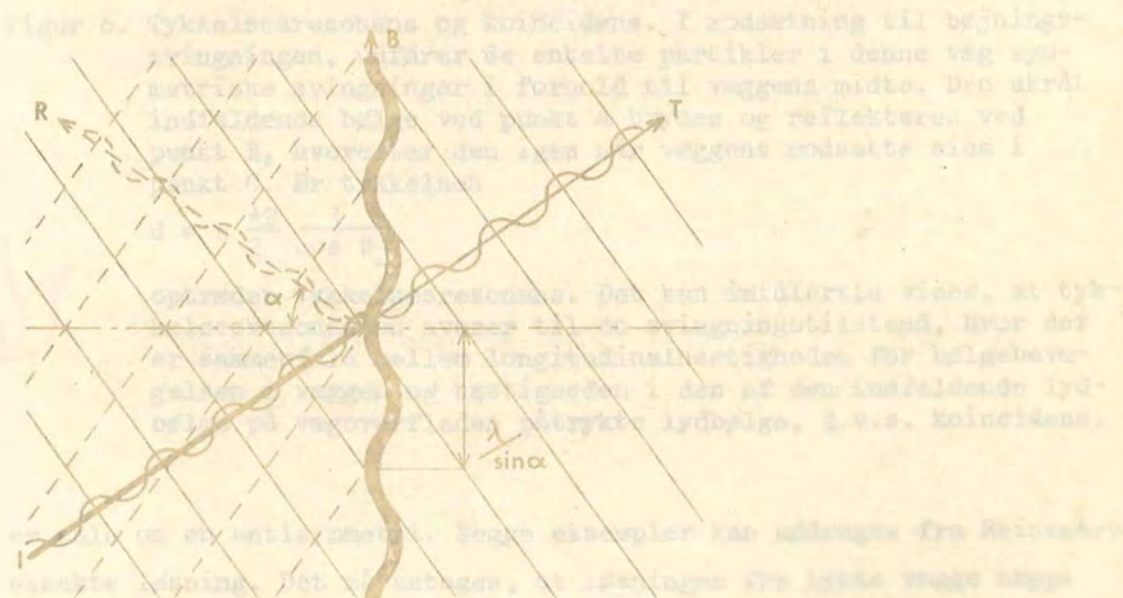
- a) I transversalsvingningen sker de enkelte partiklers bevægelse i parallelle planer (udsnit af et udstrakt medium).
- b) I bøjningssvingningen sker de enkelte partiklers bevægelse i planer, som er vinkelrette på den neutrale akse.

"Frie" bølger)

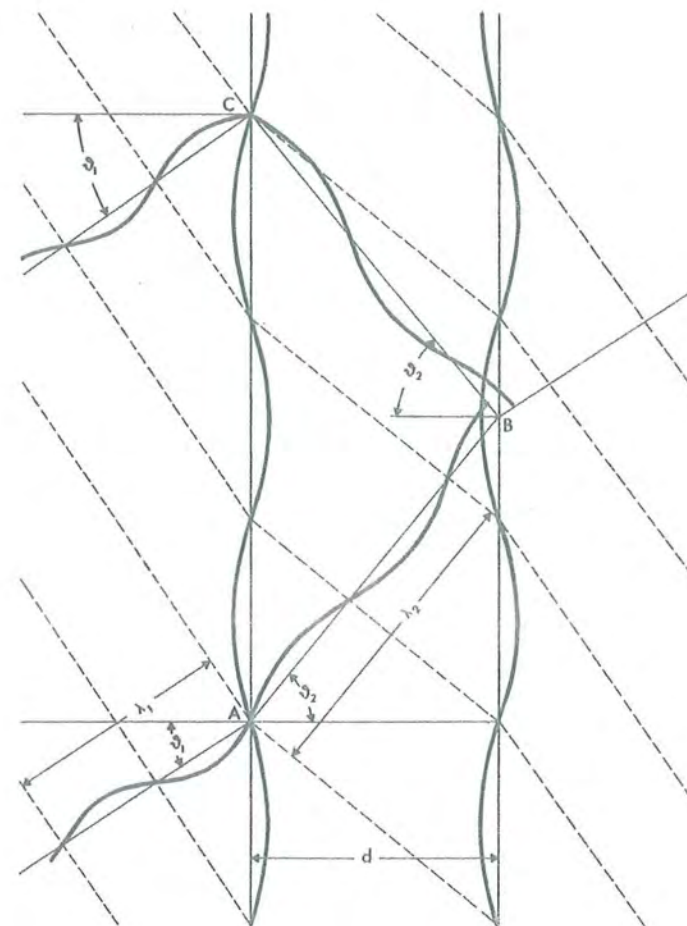
i forhold til andre bølgebevægelser kan bestå i forholdsvis lang tid uden ydre påvirkning. Disse bølger kaldes for "frie" bølger.

(coincidens)

Falder den af en indfaldende lydbølge i en væg frembragte bølgebevægelse sammen med - koinciderer med - væggen "frie" bølger, transmitteres lyden gennem væggen med en ringe dæmpning. Når der i praksis fremkommer en dæmpning skyldes det, at der under lydudbredelse i vægmaterialiet sker en - omend for de fleste bygningsmaterialers vedkommende beskedne - dæmpning. Hertil kommer, at simplificationen ved kun at betragte bøjningsbølgen rummer en tilnærmelse i forhold til den helt eksakte løsning af problemet. I figur 5 er vist en skitse af en plade ved koincidens. Det er imidlertid ikke blot i tynde plader, at der kan forekomme lydtransmission med meget ringe dæmpning i visse frekvensområder. Det gælder også i tykkere plader, hvori der i lighed med de tynde plader eksisterer "frie" bølger, blot i adskilligt flere former end i tynde plader. Ved skråt indfaldende, plane bølger kan der også i dette tilfælde forekomme koincidens mellem den fri og den påtrykte bølgebevægelse. I figur 6 er vist en skitse af en tyk plade ved koincidens. Eksemplet viser en symmetri om pladens midterlinie i modsætning til eksemplet med den tynde plade, hvor der



Figur 5. Bøjningsbølge frembragt i en væg af en indfaldende lydbølge, bølge I, med bølgelængden  $\lambda$ . Hvis bølgelængden  $\lambda/\sin\alpha$  (anti-projektionen) af den indfaldende lydbølge, d.v.s. den væggen påtrykte bølge, falder sammen med bølgelængden for såkaldte "frie" bølger i væggen, optræder koincidens.



Figur 6. Tykkelsesresonans og koincidens. I modsætning til bøjnings-svingningen, udfører de enkelte partikler i denne væg symmetriske svingninger i forhold til væggen midte. Den skrå indfaldende bølge ved punkt A brydes og reflekteres ved punkt B, hvorefter den igen når væggen modsatte side i punkt C. Er tykkelsen

$$d = n \frac{\lambda_2}{2} \frac{1}{\cos \beta_2}$$

optræder tykkelsesresonans. Det kan imidlertid vises, at tykkelsesresonansen svarer til en svingningstilstand, hvor der er sammenfald mellem longitudinalhastigheden for bølgebevægelsen i væggen og hastigheden i den af den indfaldende lyd-bølge på vægoverfladen påtrykte lydbølge, d.v.s. koincidens.

er tale om en antisymmetri. Begge eksempler kan udtrages fra Reissners eksakte løsning. Det må antages, at løsningen fra tykke vægge næppe har nogen væsentlig betydning for bygningsakustikken, derimod kan den have stor betydning i ultralydområdet.

Bøjningsstive vægge)

Beregningsmetoden for tynde plader bygger på, at problemet kan behandles todimensionelt. Der opstilles som angivet af Cremer

en ligning for påvirkning af en del af væggen med bredden 1. Udtrykket herfor og de anvendte betegnelser svarer i princippet til 1a, blot tages nu hensyn til væggens bøjningsstivhed, og der stilles ikke krav om vinkelret indfald. For bevægelsen af et partielt vægelement findes:

$$P_1 - P_2 - B \frac{\delta^4 \xi}{\delta x^4} = \frac{\delta^2 \xi}{\delta t^2} \quad (5)$$

hvor  $P_1 - P_2$  er trykdifferensen over væggen,  $\xi$  forskydningen vinkelret på væggen,  $m$  væggens masse pr. arealenhed og  $B$  er bøjningsstivheden. Når det antages, at den påtrykte bølge er harmonisk med vinkelfrekvensen  $\omega$ , kan opstilles følgende relationer:

$$v = \frac{d\xi}{dt} = j\omega\xi, \quad \frac{dv}{dt} = j\omega v \quad (5a)$$

og

$$\xi = \xi_0 \omega t - j \frac{\omega}{c_B} x \sin \alpha \quad (5b)$$

hvor  $\frac{\omega}{c_B}$  svarer til bølgetallet med  $c_B$  som bøjningsbølgens hastighed,  $\alpha$  er indfaldsvinklen. Indsættes (5a) og (5b) i (5) fås udtrykket:

$$\frac{P_1 - P_2}{v} = j \left( m\omega - \frac{B\omega^3 \sin^4 \alpha}{c_B^4} \right), \quad (5c)$$

hvoraf det i forbindelse med (1b) ses, at væggens stivhed virker som en nedsættelse af væggens masse. Indføres randbetingelserne (1d) og (1f) under indfaldsvinklen  $\alpha$  i (5c) fås:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1 + \frac{j\omega m}{2\rho c} \left( 1 - \frac{B\omega^2 \sin^4 \alpha}{c_B^4 m} \right) \cos \alpha. \quad (6)$$

Højre side af (6) er nul, for

$$\omega_K = \frac{c_B^2}{\sin^2 \alpha_K} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad (7)$$

For en given vinkel vil frekvenser lavere end den af (7) bestemte værdi føre til, at størrelsen på højre side af (6) bestemmes af massen, d.v.s. at systemet er massestyret. Tilsvarende vil systemet ved høje frekvenser være bestemt af stivheden, d.v.s. systemet er stivhedsstyret.

Udtrykket (7) antager sin mindste værdi, d.v.s. laveste frekvens, når  $\alpha_K = \frac{\pi}{2}$ . Den hertil hørende frekvens betegnes grænsefrekvensen  $f_g$ , og under denne frekvens er koincidens ikke mulig.

Indføres koincidensfrekvensen bestemt ved (7) i (6) fås:

$$D = 10 \log \left| 1 + \frac{j\omega m \cos \alpha}{2\rho c} \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_K^2} \right) \right|^2 \quad (7a)$$

Dette udtryk kan såfremt bidraget fra det imaginære led er meget større end 1 omskrives til:

$$D \approx 20 \log \left| 1 + \frac{j m \cos \alpha}{2\rho c} \right| + 20 \log \left| 1 - \frac{\omega^2}{\omega_K^2} \right| \quad (7b)$$

Det fremgår heraf, at lydisolationen kan opfattes som bestående af lydisolationen (1) plus et korrektionsled, som er positiv for  $\omega > \sqrt{2} \omega_K$ .

Bøjningsstivheden B bestemmes af:

$$B = \frac{EI}{1-\mu^2}, \quad (7c)$$

hvor EI er produktet af elasticitetsmodul og inertimoment,  $\mu$  er Poissons tal.

Lyd hastigheden i pladen findes af (7) og (7c) til

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad \omega = \sqrt[4]{\frac{Eh^2}{\rho \cdot 12(1-\mu^2)}} \sqrt{\omega} = \sqrt{c_1} \cdot \sqrt{\omega} \cdot \sqrt{h} \cdot K. \quad (7d)$$

Heraf ses, at bøjningsbølgens hastighed vokser med frekvensen, pladetykkelsen og longitudinalbølgens hastighed.

For en uendelig væg har Cremer angivet følgende udtryk for reduktionstallet over grænsefrekvensen.



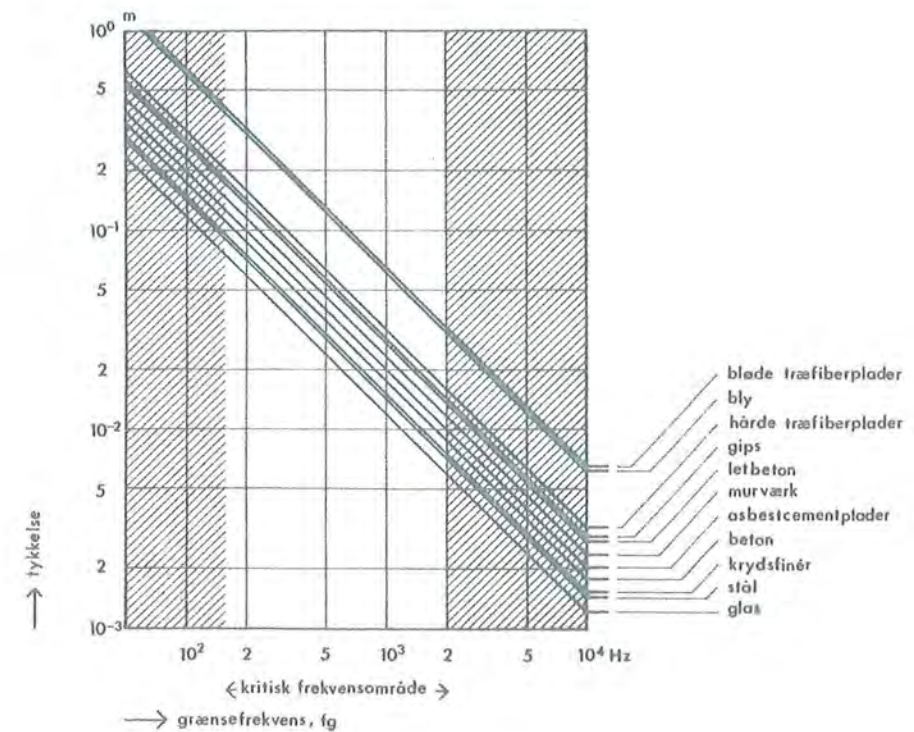
$$D = 20 \log \left( \frac{m2\pi f}{2\rho c} \right) + 30 \log f/f_g + 10 \log \eta - 3 \text{ dB}, \quad (8)$$

hvor  $\eta$  er et udtryk for vægmaterialets indre dæmpning. Grænsefrekvensen  $f_g$  findes af udtrykket (7).

$$f_g = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \approx \frac{c^2}{1,8 c_e h}, \quad (8a)$$

idet  $\alpha_k = 90^\circ$  og bøjningsbølgens hastighed ved denne frekvens svarer til lydhastigheden i luft.

Det ses af (8a), at der for en given tykkelse af et materiale findes en grænsefrekvens. I frekvensområdet omkring grænsefrekvensen sker en nedsættelse af lydisolationen. Det er derfor uheldigt, hvis grænsefrekvensen ligger i et frekvensområde, der har særlig betydning for opnåelse af en god lydisolation. I figur 7 er vist sammenhængen mellem grænsefrekvensen og pladetykkelsen for nogle forskellige materialer.



Figur 7. Grænsefrekvensen  $f_g$  for frie bøjningsbølger i plader afhængig af pladetykkelsen med pladematerialet som parameter.

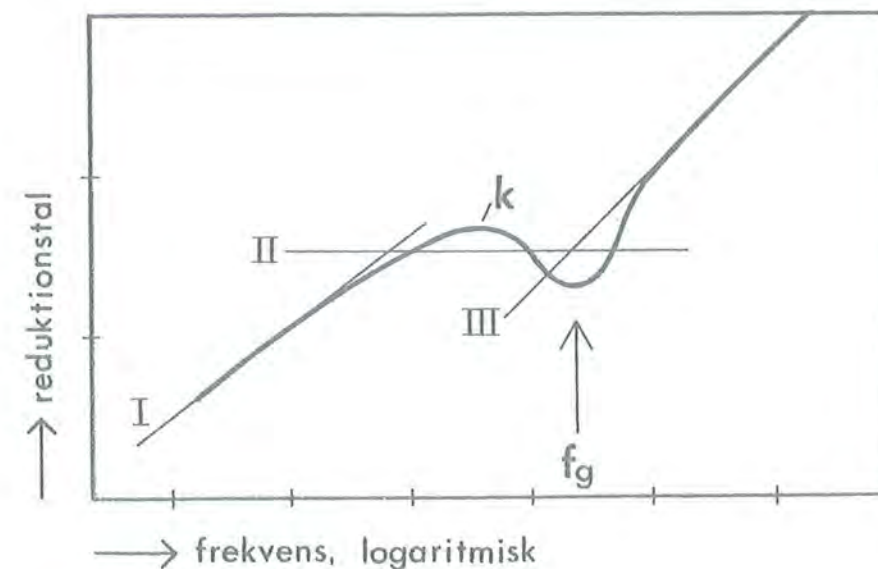
Indspændingens  
indvirkning på  
lydisolationen)

En plades lydisolation afhænger foruden af tykkelse og materiale også af dens udstrækning, af dens tilslutning til omgivende plader, d.v.s. pladens indspændingsforhold, og af pladens indre dæmpning,

hvormed menes den dæmpning af lydsvingningerne, som finder sted under disses udbredelse i pladen. Kun når energitabet ved den indre dæmpning er større end afledningen til de omgivende plader, er en plades lydisolations uafhængig af størrelse og indspænding.

Enkeltvægges lydisolations afhængighed af omgivende vægge er behandlet teoretisk efter flere forskellige modeller. Heckls model er en endelig todimensionel model bestående af en skillevæg med to flankerende vægge. Sewell's modeller er dels en endelig væg i en uendelig, stiv flade, dels en endelig væg omgivet af et uendeligt rør med stive vægge. Undersøgelserne viser, at de væsentligste faktorer er indspændingsforholdene. Stift indspændte vægge giver under grænsefrekvensen ringere resultater end vægge med frie kanter. Over grænsefrekvensen giver Sewell's modeller ens resultater uanset indspændingsforhold, medens Heckls afhænger både af størrelse og indspændingsforhold. I alle modellerne indvirker vægmaterialets indre dæmpning på lydisolations. En forklaring på forskelle i lydisolations ved frekvenser over grænsefrekvenser kan ligge i lydenergi afledning til de omgivende vægge. En af modellerne viser, at mindre vægarealer i den uendelige, stive væg fører til højere lydisolations.

Forløbet af lydisolations som funktion af frekvensen kan almindeligvis angives som vist i figur 8. Linierne I og III svarer til udtryk angivet af Heckl. Linien II er beregnet efter indsættelse af  $f_g$ . For tynde vægge er overensstemmelsen med praktiske resultater nogenlunde, for tykke vægge er den mindre god.



Figur 8. Principielt forløb af lydisolations som funktion af frekvensen for en bøjningsstiv plade. Forløbet kan i reglen tilnærmes med linierne I-III.

Porøse vægge

Alle byggematerialer har i praksis en større eller mindre porøsitet. Den færdige bygningsdel kan desuden være forsynet med udsparede hulrum. Porøsiteten kan være forøget ved anvendelse af tilslag med stor porøsitet, eller ved anvendelse af tilsætningsmidler, som forøger porøsiteten i det færdige produkt. Den lydtekniske virkning af porøsiteten i en væg afhænger imidlertid også af fremstillingsmåden. Porøsiteten kan fx bestå af tilfældigt fordelte hulrum, der kan være indbyrdes forbundet eller afgrænset. Betegnelsen porøse vægge er derfor, set fra et lydteknisk synspunkt, ikke nogen klar definition. I de vægge, hvor porøsiteten består af tilfældigt fordelte, indbyrdes forbundne hulrum, yder skeletstrukturer en af hulrummenes størrelse og indbyrdes fordeling afhængig modstand over for luftgennemtrængelighed. Såvel porøsiteten som luftmodstanden influerer på lydisolationen, derfor er det ved en lydteknisk vurdering af porøse vægges isolationsegenskaber nødvendigt at foretage en opdeling efter vægmaterialets struktur. Med åben og lukket struktur menes i det følgende henholdsvis forbundne og indbyrdes afgrænsede hulrum. Skematiseret kan der være tale om følgende vægtyper:

- 1) Massive vægge, d.v.s. vægge udført med den til normale, såkaldte tunge bygningsmaterialer, svarende porøsitet på indtil ca. 15 % (beton eller tegl).
- 2) Porøse vægge udført af materiale, der er kemisk sammenbundet i åben struktur (porebeton, polystyren- eller polyurethanskum).
- 3) Porøse vægge udført af materiale, der er kemisk sammenbundet i en lukket struktur (cellebeton, polystyren- og polyurethanskum)
- 4) Porøse vægge udført af fibret materiale i åben struktur (mineraluld).
- 5) Porøse vægge udført med porøst tilslag, der har åben struktur (slaggebeton).
- 6) Porøse vægge udført med porøst tilslag, der har lukket struktur (klinkerbeton).

## 7) Vægge udført med udsparede hulrum (hulpladedæk, tegldæk).

Set fra et lydteknisk synspunkt er det først og fremmest væggene 2, 4, 5 og 6 som betegnes porøse vægge. For væggene 5 og 6 afhænger det dog af tilslaget's fordeling og af strukturen i det omliggende materiale. Lydisolationen for de nævnte vægge adskiller sig meget fra lydisolationen for massive enkeltvægge med en tilsvarende vægt pr. arealenhed.

Vægge, hvis porøsitet består af små jævnt fordelte og lukkede hulrum - vægtype 3, i enkelte tilfælde type 5 og 6 - har en lydisolation, som ikke adskiller sig fra massive vægge med samme vægt. Derimod har sådanne vægge en i forhold til deres vægt væsentlig større stivhed end helt massive vægge. Det betyder, at koincidensforholdene for vægge afviger noget fra massive vægge. Vægge med udsparede hulrum - vægtype 7 - kan have noget varierende lydisolation afhængig af hulrummernes fordeling og af den minimale vægtykkelse. Hvis der ikke er tale om udsparinger ud over ca. 35-40 %, og hvis disse er jævnt fordelt, vil lydisolationen for en sådan væg højst være nogle få dB lavere end lydisolationen svarende til en massiv væg med samme vægt.

Vægge med jævnt fordelte og indbyrdes forbundne hulrum eller med porøst tilslag i materiale med åben struktur - vægtyperne 2 og 5 (og eventuelt 6) - har i almindelighed en lydisolation, der er væsentlig mindre end for vægtemæssig tilsvarende massive vægge. Det gælder dog ikke, hvis lyddæmpningen ved udbredelse i væggen over en længde svarende til vægtykkelsen er af samme størrelsesorden som lydisolationen for den massive væg med samme vægt. For de fleste materialer med de omtalte opbygninger vil en lydisolation svarende til massive vægge med samme vægt kunne opnås ved at forsyne væggene med en tæt overfladebeklædning eller overfladebehandling.

Vægge med fibret struktur - vægtype 4 - har ofte en ringe stivhed og tillige en stor dæmpning af lydudbredelsen i materialet. Disse vægges lydisolation afhænger derfor ikke af vægdimensionerne, men alene af væggenes isolation. I nogle materialer er lyddæmpningen ganske betydelig. Lydisolationen for en væg med fibret struktur kan være væsentlig højere end svarende til lydisolationen for en massiv væg med tilsvarende vægt. Ved lave frekvenser er lyddæmpningen i materia-

let ringe, og lydisoleringen vil i reglen være bestemt af væggenes vægt pr. arealenhed. Tætning af overfladen har i dette tilfælde ikke samme virkning som for den tidligere omtalte porøse væg. Det må imidlertid fremhæves, at selv om den i en sådan væg forekommende stivhed er beskeden, så vil den i praksis forekommende lydisolering dog være et samspil af faktorerne: masse, stivhed og udbredelsesdæmpning i materialet.

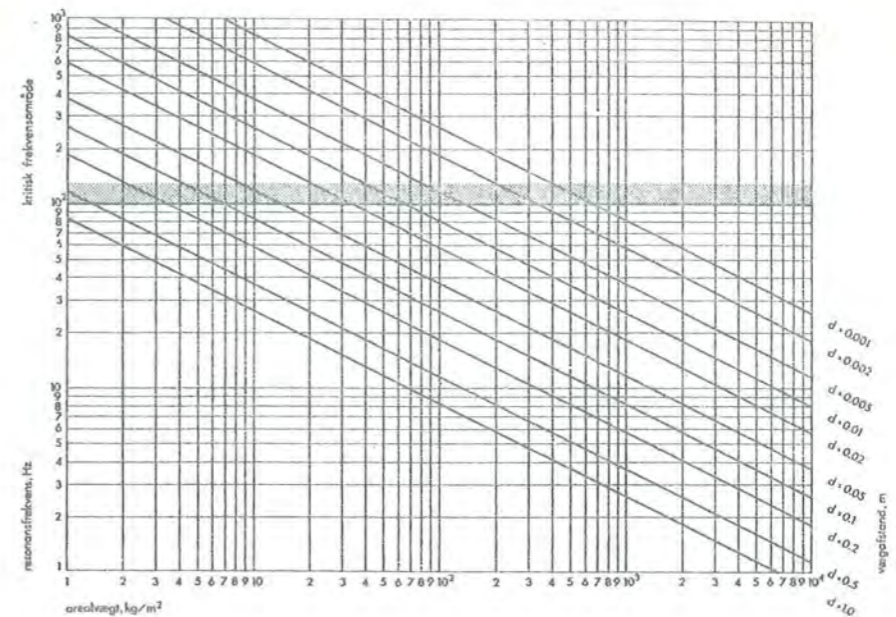
#### Dobbelte vægge

En væg opbygget af to uafhængige enkeltvægge med en større eller mindre afstand kaldes en dobbeltvæg. Hulrummet mellem væggene kan være luftfyldt eller udfyldt med lydabsorberende materiale. Beregning af lydisoleringen for dobbeltvægge er betydelig mere kompliceret end for enkeltvægge. Under forudsætning af, at de enkelte vægge er uendelige, at lydindfaldet sker vinkelret på væggen med plane lydbølger og at der ikke sker tab i hulrummet, kan lydisoleringen beregnes relativt simpelt. Resultaterne af beregningerne stemmer imidlertid ikke godt overens med resultaterne fra praksis. Desuden kan beregningsresultaterne have en meget begrænset gyldighed. Kvalitativt viser resultaterne imidlertid, at lydisoleringen stiger med frekvensen, med luftmelletrumets tykkelse, og at lydisoleringen for dobbeltvægge ved lave frekvenser svarer til lydisoleringen for massive enkeltvægge, hvis masse er summen af de to enkelte vægges masser. Dette gælder imidlertid kun i de frekvensområder, hvor væggenes lydisolering bestemmes af massen. I frekvensområder, hvor lydisoleringen bestemmes af væggenes stivhed, vil lydisoleringen for dobbeltvægge være mindre end for enkeltvægge med samme masse. Luftmelletrummet mellem to enkeltvægge virker som en fjeder. Resonansfrekvensen for dette svingende system bestemmes ved

resonans)

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \cdot \frac{\rho}{d}} \quad (12)$$

hvor  $m$  er massen pr. arealenhed af de to enkelte vægge,  $\rho$  luftens massefylde,  $c$  lydhastigheden i luft og  $d$  afstanden mellem væggene. En grafisk afbildning af resonansfrekvensen i afhængighed af vægafstanden for to ens vægge, d.v.s. svarende til (12) med  $m_1 = m_2$ , er angivet i figur 9.



Figur 9. Resonansfrekvensen  $f_g$  for en dobbeltvæg med to ens enkeltvægge, hvor frekvensen er angivet som funktion af vægten pr. kvadratmeter dobbeltvæg og med afstanden  $d$  mellem de to enkeltvægge som parameter.

incidens)

I dobbeltvægge forekommer koincidens på tilsvarende måde som i enkeltvægge. Anvendes to ens vægge kan virkningen af koincidens være endnu mere udtalt end i enkeltvægge. I princippet kan den lave lyd-isolation i koincidensområdet undgås ved at vælge to enkeltvægge med forskellig koincidensfrekvens, hvilket kan ske ved anvendelse af forskellige vægmaterialer, forskellige vægtykkelser eller både og. I praksis fungerer dette princip ikke godt, fordi såvel brug af to materialer som brug af forskellige vægtykkelser i en dobbeltvæg er uønsket på en byggeplads. For at opnå nogen væsentlig fordel ved brug af to vægtykkelser skal forholdet mellem vægtykkelserne være mere end 1:2.

tilslutning-  
es indvirk-  
g på lydiso-  
ionen)

Dobbeltvægges lyd-isolation afhænger af vægdimensionerne på samme måde som for enkeltvægge, derimod har dobbeltvægges tilslutning til om-givende bygningsdele endnu større indvirkning på lyd-isolationen end enkeltvægges tilslutninger. I vægge, hvor energitabet ved udbredelse i væggen er større end energiafledningen ved tilslutningerne, er væggenes dimension nærmest uden indvirkning på lyd-isolationen.

En teoretisk behandling af dobbeltvægges lyd-isolation er foretaget af Sewell efter en model bestående af to uendelige, stive, adskilte plader, hvori der i et begrænset område findes over for hinanden liggende vægge. Resultaterne af beregning-

erne viser, at den indre dæmpning i vægmaterialet har væsentlig indvirkning på lydtransmissionen. For vægge af materialer uden indre dæmpning svarer lydisolationsen til enkeltvægge med samme vægt. Tabsfaktoren for den indre dæmpning har større indvirkning på lydisolationsen for vægge med lavere grænsefrekvenser end for vægge med høje grænsefrekvenser, fordi tabsfaktorens virkning på lydisolationsen er størst over grænsefrekvensen. Dette forhold kan forklare, at valg af plademateriale ikke er så væsentlig for pladebeklædte dobbeltvægge, når der anvendes plader med  $f_g$  over ca. 2000 Hz.

#### Luftlydisolation i laboratorium

De simplificerede forudsætninger, som er gjort ved den teoretiske behandling af lydisolationsproblemet, kan kun i begrænset omfang etableres ved målinger i laboratorier.

#### Vægges indsætningsbetingelser

I et laboratorium opstilles væggen i et 10-12 m<sup>2</sup> prøvefelt, der udgør adskillelsen mellem to rum, sende- og modtagerum. I nogle laboratorier udgør prøvearealet hele vægfladen, i andre kun en del af vægfladen. I nogle laboratorier er de to rum adskilt således, at prøvefeltet er et selvstændigt bygværk, i andre udgøres prøvefeltet af væggen i det ene rum. I nogle laboratorier er de to rum ikke mekanisk adskilte, således at flankerende vægge passerer prøvefeltet. Størrelsen af sammenhørende sende- og modtagerum er ofte ens. Rumstørrelsen i de enkelte laboratorier er derimod ret forskellig, varierende fra ca. 50 m<sup>3</sup> til ca. 200 m<sup>3</sup>. Undersøgelser foretaget af Kihlman viser, at indsætningsbetingelserne for bøjningsstive vægge influerer på måleresultaterne. Det er desuden vist, at ens store sende- og modtagerum kan give afvigende resultater i forhold til uens store målerum. Det må i forbindelse med den omtalte usikkerhed for laboratorieresultater også fremhæves, at der i praksis altid vil være en vis variation i udførelsen af vægge. For vægge med kompliceret opbygning eller med kompliceret udførelse af tilslutninger kan variationen være ret stor. Jo mere ens vægge kan udføres fra gang til gang, desto mindre spredning vil måleresultaterne fremvise.

enfrekvenser)

En stiv plade med en endelig udstrækning har en dobbelt uendelighed af egensvingninger. For en simpelt understøttet rektangulær plade bestemmes egenfrekvenserne af:

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)} \left[ \left(\frac{n_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_b}{b}\right)^2 \right]}$$

hvor a og b er sidelængerne, n alle positive hele tal, nul inclusive, h pladetykkelsen,  $\rho$  materialets massefylde,  $\mu$  Poissons tal.

For en indspændt plade er den laveste egenfrekvens højere end for en simpelt understøttet plade. Ved lavere frekvenser kan egenfrekvenserne for såvel prøvevæg og omgivende bygningsdele som for sender- og modtagerummet influere på måleresultatet.

For stive enkeltvægge kan indspændings- og stivhedsforhold påvirke lydenergi afledningen langs begrænsningsfladerne. For tynde eller slappe vægge er indspændingsforholdene i reglen uden betydning for lydisolationen, hvorimod tæthedsproblemet langs begrænsningen er meget væsentlig. Dette gælder også for dobbeltvægge. Dobbeltvægge udført af stive enkeltvægge giver alt andet lige meget varierende resultater, afhængig af indsætningen og laboratorieopbygningen. Stive vægge, hvilket i reglen vil sige vægge med stor energiafledning ved tilslutningerne, må ikke tilsluttes en flankerende bygningsdel, hvorigennem en energitransmission fra den ene væg i dobbeltvæggen til den anden væg kan finde sted uden væsentlig dæmpning. Massive vægge med stor egenstivhed, hvilket i praksis vil sige vægge med tykkelser større end 3-5 cm, vil ved anvendelse i en dobbeltvæg kræve helt adskilte konstruktioner for at give den størst mulige lydisolation.

#### Massive vægge

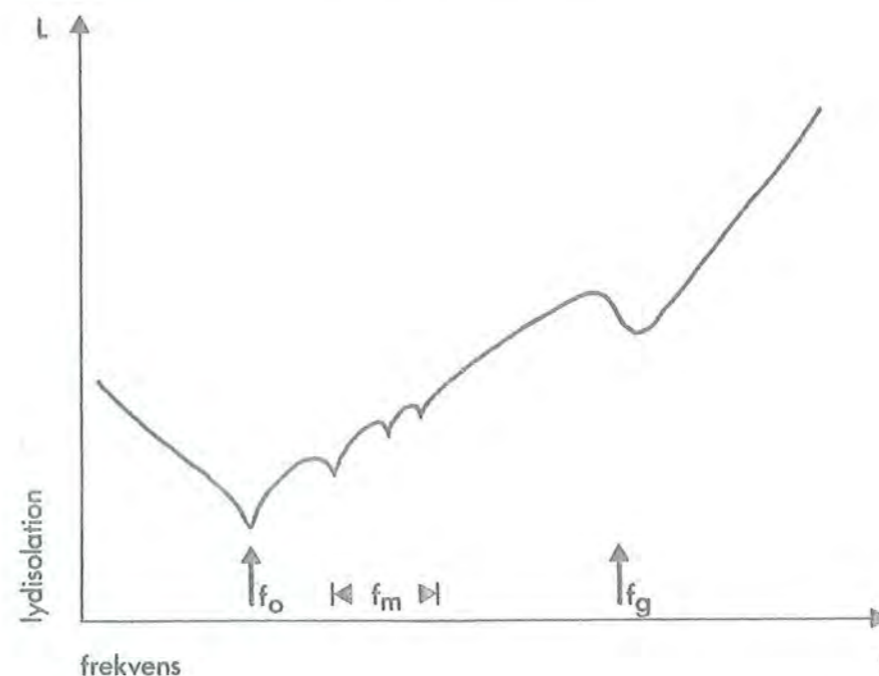
Resonansfrekvens,  
(Egensfrekvens)

For en massiv væg forløber lydisolationen som funktion af frekvensen i princippet som angivet i figur 10. Som det ses af figuren, kan der optræde en række resonansområder. Den laveste resonansfrekvens betegnes  $f_0$ , og dens beliggenhed bestemmes af væggenes masse, stivhed og indspændingsgrad. Resonansfrekvensen aftager med stigende vægt og vokser med stigende stivhed, altså også med indspændingsgraden. For langt de fleste vægge ligger resonansfrekvensen betydeligt under den laveste frekvens, som har interesse ved isolationsmålinger. Frekvensen  $f_g$  angiver den laveste frekvens, hvorved koincidence kan finde sted.

Det er internationalt standardiseret at måle lydisolationen inden for frekvensområdet 100-3150 Hz. Fra et lydisoleringssynspunkt gælder

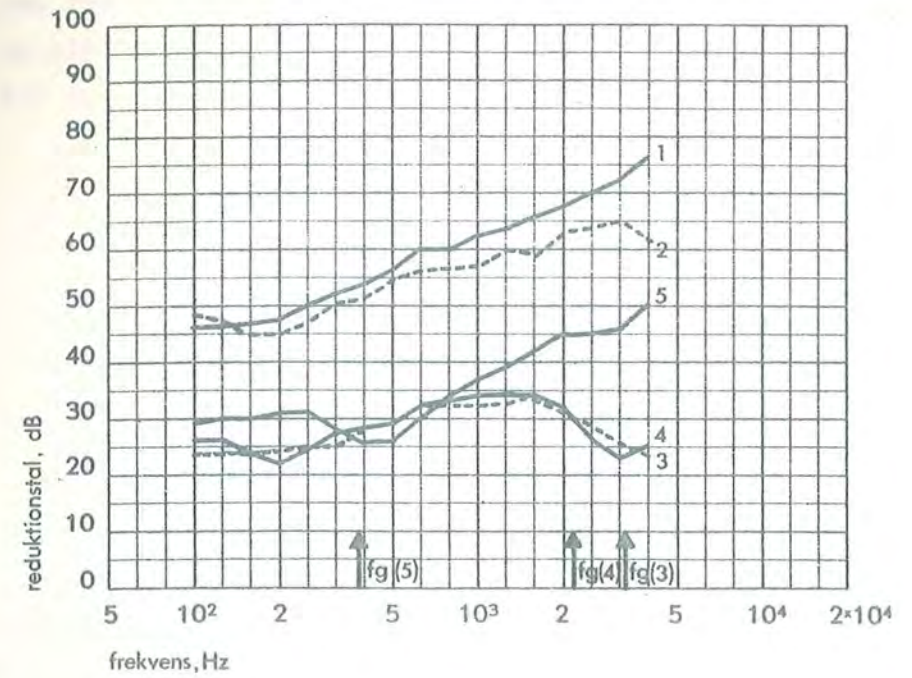


det derfor om at vælge vægkonstruktionen således, at koincidensfrekvensen ligger uden for det angivne frekvensområde.



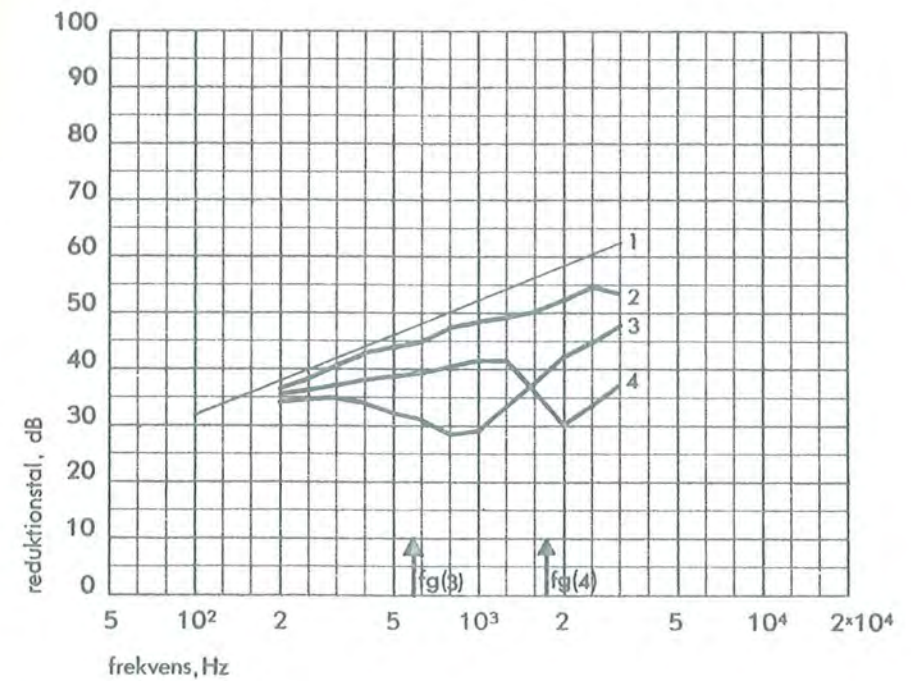
Figur 10. Principielt forløb for en konstruktions lydisolationsfunktion af frekvensen. Under en vis frekvens  $f_0$ , for de fleste konstruktioner fra 5-20 Hz, bestemmes lydisolationen hovedsagelig af konstruktionens stivhed og over  $f_0$ , men under  $f_g$ , hovedsagelig af konstruktionsvægten. I området over  $f_0$  optræder en række resonanser. Lydisolationen ved disse og i området omkring  $f_g$  bestemmes hovedsagelig af materialets indre dæmpning.

I figur 7 ses, at  $f_g$  ligger omkring 100 Hz for 18 cm betonvægge og 23 cm teglvægge. Reduktionstallet for disse og andre vægge er i figur 11 vist som funktion af frekvensen. Grænsefrekvensen  $f_g$  ligger omkring 3000 Hz for tynde plader, fx 4 mm glas og 9 mm gips. Vægge, hvis grænsefrekvens ligger inden for frekvensområdet 200-2800 Hz er 7,5 cm letbeton, 6 cm beton, 17 cm tegl og 8 mm glas. Lydisolationen i frekvensområdet ved grænsefrekvensen er i det foreliggende tilfælde stort set ens. Erfaringer viser, at lydisolationen ved grænsefrekvensen for plader med samme dimensioner udviser det mest udtalte minimum for den tynde plade, og at minimumsværdien bliver mindre udtalt for tykkere plader. En lang række måleresultater indikerer, at lydisolationen i et relativt stort frekvensområde under  $f_g$  stort set er frekvensuafhængig. Dette forløb er antydnet ved II i figur 8. I figur 12 ses reduktionstallet som funktion af frekven-



Figur 11. Reduktionstallet som funktion af frekvensen.

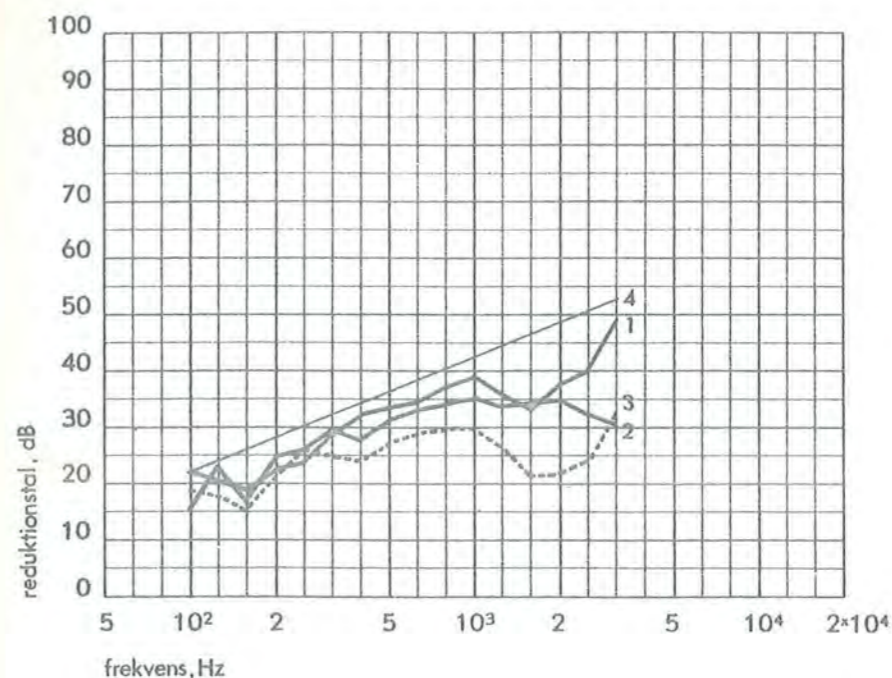
- Kurve 1: 18 cm beton  $R_m = 57 \text{ dB}, I_a 60$
- Kurve 2: 23 cm tegl + puds  $R_m = 54 \text{ dB}, I_a 57$
- Kurve 3: 4 mm glas  $R_m = 27 \text{ dB}, I_a 30$
- Kurve 4: 12 mm gipsplade  $R_m = 29 \text{ dB}, I_a 28$
- Kurve 5: 7,5 mm letbeton  $R_m = 35 \text{ dB}, I_a 33$



Figur 12. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for plader med samme vægt,  $55 \text{ kg/m}^2$ .

- Kurve 1: Lydisolation ifølge (1)
- Kurve 2: 4,2 cm gummi  $R_m = 45 \text{ dB}, I_a 47$
- Kurve 3: 2,5 cm beton  $R_m = 35 \text{ dB}, I_a 32$
- Kurve 4: 0,7 cm stål  $R_m = 37 \text{ dB}, I_a 32$

sen for tre plader af forskelligt materiale, men med samme vægt pr. arealenhed. Lydisolationen som funktion af frekvens og indfaldsvinkel for et 8 mm glas er vist i figur 13.

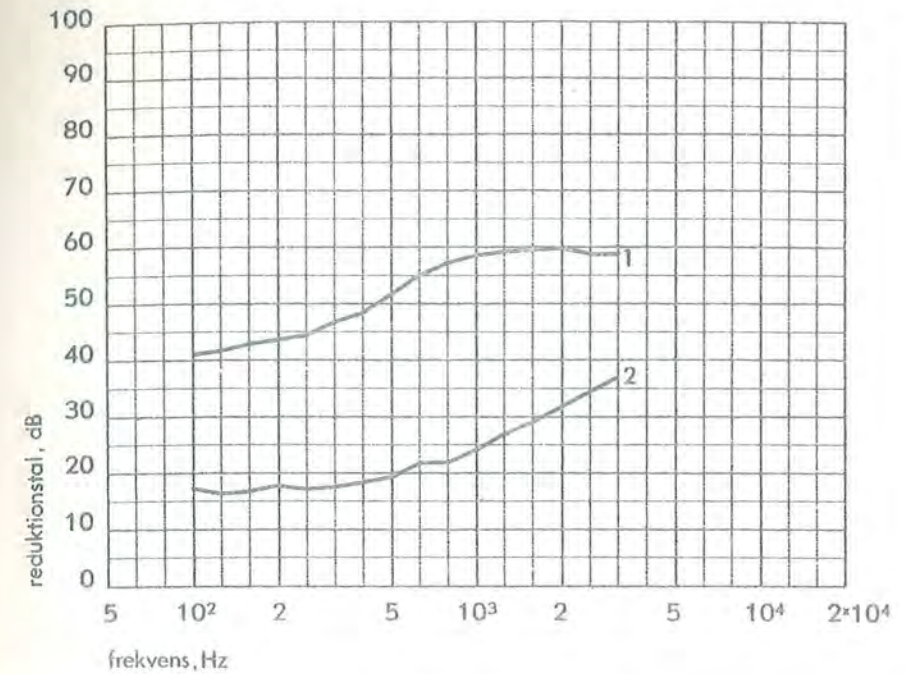


Figur 13. Reduktionstallet som funktion af frekvensen med indfaldsvinklen som parameter for 6,5 mm glas i en uelastisk indspænding.

Kurve 1: Vinkelret indfald  $R_m = 31 \text{ dB}, I_a 35$   
 Kurve 2: Indfaldsvinkel  $45^\circ$   $R_m = 29 \text{ dB}, I_a 33$   
 Kurve 3: Indfaldsvinkel  $75^\circ$   $R_m = 24 \text{ dB}, I_a 26$   
 Kurve 4: Lydisolation ifølge (1).

#### Porøse vægge

Lette porøse vægge uden væsentlig egenstivhed finder i praksis mest anvendelse i form af tapper, portierer, foldevægge o.lign. De fleste porøse bygningsmaterialer forsynes med en tæt overflade i form af plader, puds eller spartling. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for en 25 cm væg af bimsbeton før og efter påføring af pudslag ses i figur 14. Denne væg svarer uden pudslag til den under teorien nævnte type 5. Det fremgår af resultatet for denne væg, at lydisolationen i højere grad er bestemt af væggenes struktur end af dens vægt. Måleresultater for porebetonvægge med samme vægt viser, at middelreduktionstallet vokser med stigende modstand over for luftgennemtrængelighed. Dette gælder dog kun for luftmodstande under en vis grænse, over denne er reduktionstallet konstant. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for 20 cm vægge af Rockwool med

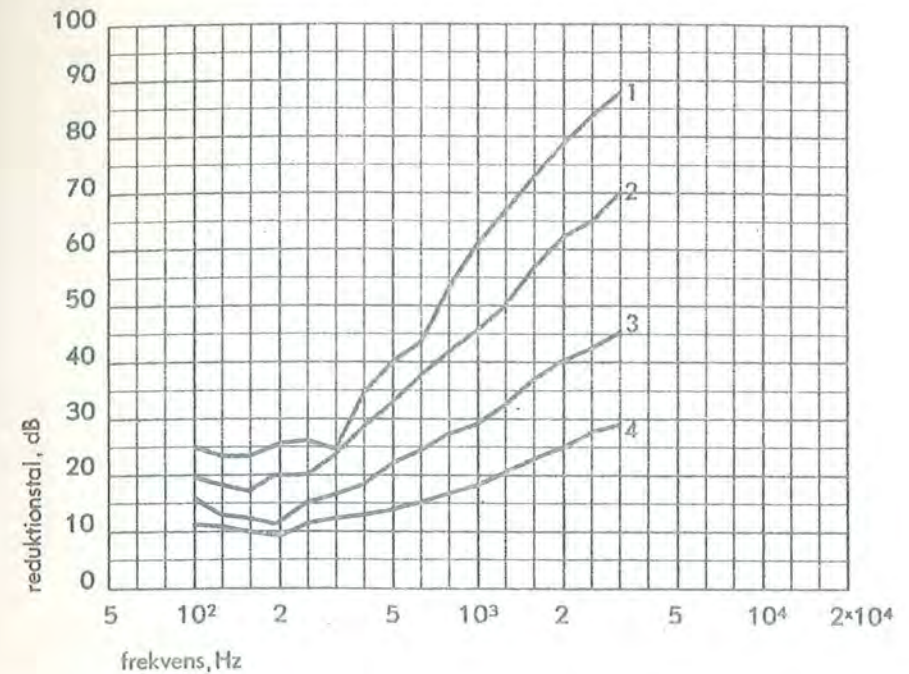


Figur 14. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for en 25 cm væg af bimsbeton med og uden puds.  
 Kurve 1: Med puds  $R_m = 52$  dB,  $I_a 56$   
 Kurve 2: Uden puds  $R_m = 23$  dB,  $I_a 25$

forskellig rumvægt er vist i figur 15. Disse vægge svarer til type 4. Det fremgår af måleresultatet, at der er en betydelig lyddæmpning i materialer med en sådan strukturel opbygning. Ved opbygning af tynde prøvevægge af mineraluld opstår der let utætheder i samlingerne mellem de enkelte plader, derfor vil der naturligvis være en usikkerhed på måleresultater for disse vægge. For tykke prøvevægge vil der i samlingerne mellem de enkelte plader være en betydelig dæmpning, hvilket betyder, at samlingers indvirkning på resultatet aftager med vægtykkelsen.

#### Dobbelte vægge

For at opnå en god lydisolation med dobbelte vægge gælder som for enkelte vægge, at grænsefrekvensen  $f_g$  bør ligge uden for det kritiske frekvensområde. Hertil kommer yderligere, at resonansfrekvensen for masse-luftfjedersystemet, bestemt af afstanden mellem de to enkeltvægge og vægten af disse, jævnfør (12), skal ligge under 100 Hz. Det er yderligere en forudsætning for at opnå den størst mulige lydisolation, at lydtransmissionen fra den ene væg til den anden er væsentlig mindre gennem prøvefeltets ramme end gennem mellemrummet mellem væggene.

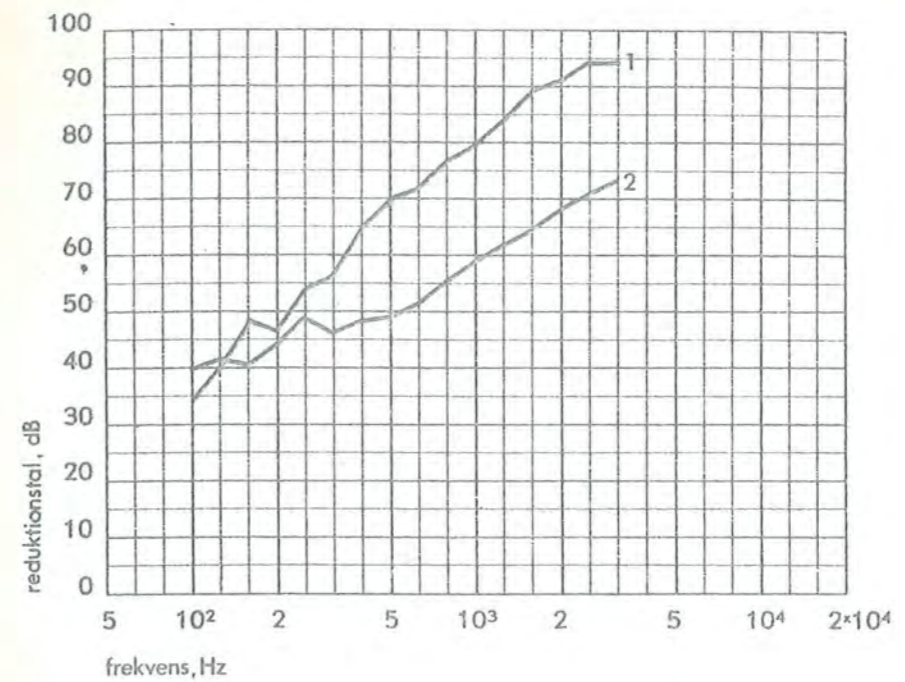


Figur 15. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for 20 cm Rockwool uden beklædning.

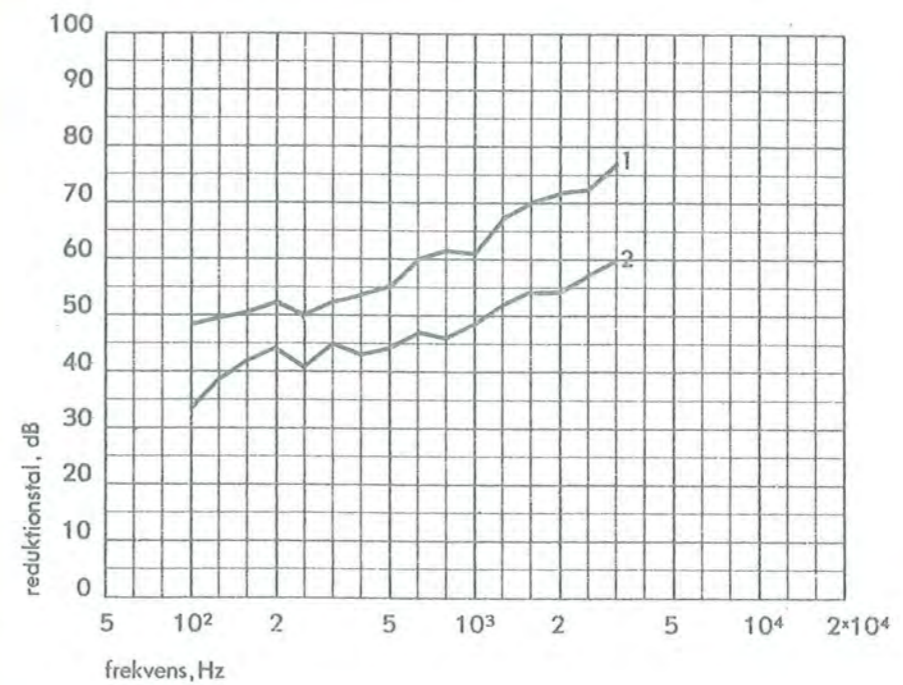
Kurve 1: Rumvægt 150 kg/m <sup>3</sup>	$R_m = 48 \text{ dB}, I_a^{37}$
Kurve 2: Rumvægt 100 kg/m <sup>3</sup>	$R_m = 38 \text{ dB}, I_a^{34}$
Kurve 3: Rumvægt 50 kg/m <sup>3</sup>	$R_m = 25 \text{ dB}, I_a^{26}$
Kurve 4: Rumvægt 30 kg/m <sup>3</sup>	$R_m = 17 \text{ dB}, I_a^{19}$

Derfor opnås den maksimale lydisolations i reglen ikke med dobbelte vægge af beton, letbeton, tegl m.fl., med mindre der ud for hulrummet i væggen findes en dilatationsfuge i de omgivende konstruktioner. Dobbeltvæggens to enkelte vægge kan under disse betingelser betragtes som indsat i hver sin bygning. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for dobbeltvægge af tegl og gips er vist i figur 16 og 17. Virkningen af dilatationsfugen ud for mellemrummet mellem de enkelte vægge ses klart af resultatet. At der i de to tilfælde er forskel mellem isolationens frekvensforløb ved lave frekvenser, må henføres til forskellige opsætnings- og indspændingsbetingelser. Den formindskede lydisolations i området omkring grænsefrekvensen  $f_g$  ændres ikke meget ved anvendelse af to vægge i stedet for en. Anvendelse af fx en 5 cm og en 10 cm væg kan give en forbedring i forhold til to 7,5 cm vægge. En forøgelse af lydisolationsen i området omkring koincidensfrekvensen kan ske ved udfyldning af mellemrummet med mineraluld.

Det er imidlertid en forudsætning, at afstanden mellem væggene er tilstrækkelig stor, at mineralulden i den anvendte tykkelse og tæthed har

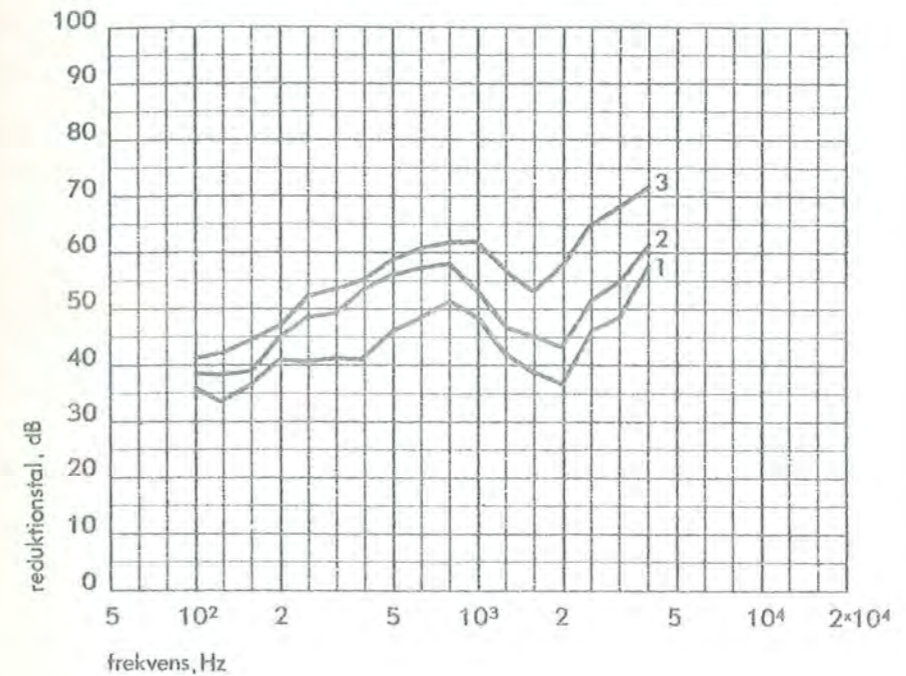


Figur 16. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for en dobbeltvæg af 2 x 12 cm tegl og et 5 cm mellemrum udfyldt med mineraluld. Med og uden dilatationsfuge i de omgivende bygningsdele ud for mellemrummet mellem enkeltvæggene.  
 Kurve 1: Med dilatationsfuge  $R_m^m = 68 \text{ dB}, I_a^m 62$   
 Kurve 2: Uden dilatationsfuge  $R_m^m = 54 \text{ dB}, I_a^m 55$



Figur 17. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for en dobbeltvæg af 2 x 6,5 cm gips og et 4 cm mellemrum med mineraluld. Med og uden dilatationsfuge i de omgivende bygningsdele.  
 Kurve 1: Med dilatationsfuge  $R_m^m = 59 \text{ dB}, I_a^m 61$   
 Kurve 2: Uden dilatationsfuge  $R_m^m = 47 \text{ dB}, I_a^m 50$

en rimelig stor isolation i det betragtede frekvensområde, og at lydtransmissionen gennem eventuelle forbindelser ved prøvefeltets begrænsninger er mindre end transmissionen over mellemrummet mellem væggene. Derfor har mineraluldens tæthed og tykkelse afgørende betydning for lydisoleringen af vægge med særligt tynde pladebeklædninger. Dette fremgår af resultaterne i figur 18.



Figur 18. Reduktionstallet som funktion af frekvensen for en pladebeklædt dobbelt træskeletvæg med 22 mm spånplader på lægter pr. 140 cm.

Kurve 1: Uden mineraluld i mellemrum  $R_m = 42 \text{ dB}, I_a 40$

Kurve 2: Med 10 cm Rockwool i en bredde på 50 cm langs prøvewæggens tilslutning til sider, loft og gulv

$R_m = 48 \text{ dB}, I_a 48$

Kurve 3: Med 10 cm Rockwool ( $30 \text{ kg/m}^3$ ) i mellemrummet

$R_m = 55 \text{ dB}, I_a 57$

#### Andre vægge

bedring af  
vægges lyd-  
ation med  
forsats-  
e)

I nogle tilfælde er det nødvendigt at forbedre en eksisterende væggs lydisolering. Dette fører meget ofte til en konstruktion bestående af tunge vægge med lette forsatsvægge med mineraluld i mellemrummet. For at opnå den største lydisolering bør også i dette tilfælde tilstræbes resonansfrekvenser under 100 Hz og grænsefrekvenser  $f_g$  uden for frekvensområdet 100-3150. Resonansfrekvensen findes af (12), når vægten pr. arealenhed for den lette væg er meget mindre end for

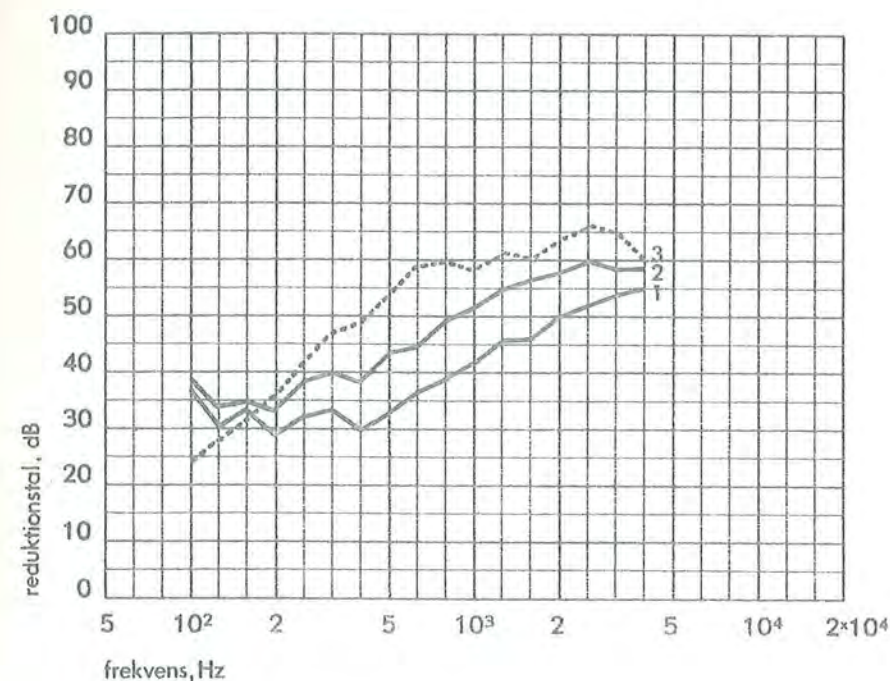
den tunge

$$f_{\text{res}} < 100 \text{ Hz, når}$$

$$m \cdot d \geq 50 \text{ kg cm/m}^2$$

hvor  $m$  er forsatsvæggens vægt  $\text{kg/m}^2$  og  $d$  afstanden mellem den tunge og lette væg i cm.

I nogle tilfælde opnås en næsten lige så god lydisolations med en pladebeklædning på lister, der er fastgjort til den tunge væg. Afstanden mellem listerne, der kun må anbringes parallelt, skal være mindst 60 cm. I figur 19 ses reduktionstallet som funktion af frekvensen for en væg med og uden forsatsbeklædning. Den formindskede lydisolations ved lave frekvenser ved brug af tosidig beklædning må henføres til resonansforhold. Det er derfor vigtigt, at resonansfrekvensen ligger under 100 Hz.



Figur 19. Reduktionstal som funktion af frekvensen for en letbetonvæg med og uden forsatsbeklædning af 9 mm gipsplader på 25 mm lægter pr. 60 cm og med indlæg af 25 mm mineraluld.

Kurve 1: Uden beklædning	$R_m = 39 \text{ dB, } I_a = 40$
Kurve 2: Med ensidig beklædning	$R_m = 46 \text{ dB, } I_a = 48$
Kurve 3: Med tosidig beklædning	$R_m = 50 \text{ dB, } I_a = 51$



Til forsatsbeklædning kan anvendes almindelige plader af gips, hård træfiber o.lign., men også tynde stålplader med påklæbning eller påsmøring af et materiale med særlig stor dæmpningsevne over for lydudbredelse i pladen kan i specielle tilfælde finde anvendelse.

En speciel væg, som i princippet kan siges at være en væg uden stivhed, fremstilles af nogle gummi-fabrikker. Væggen kan bestå af ét - eventuelt to - lag gummi, hvorimellem der kan være indlagt et lag mineraluld. Væggen kan også bestå af gummi, hvori der findes indlæg af fx bly. Vægge af gummi anvendes især ved afgrænsning af støjende arbejdsudøvelse i større industrilokaler.

#### Lydtransmission i færdige bygninger

Sammenligninger mellem talrige måleresultater for vægges lydisolations i laboratorier og i færdige bygninger har i årenes løb vist, at resultaterne ikke stemmer særlig godt overens, hverken for den massive vægtype eller for dobbeltvægstypen. Som det tidligere er omtalt, må de ændrede stivhedsbetingelser i de praktiske konstruktioner føre til nogen afvigelse fra de efter teorien beregnede resultater.

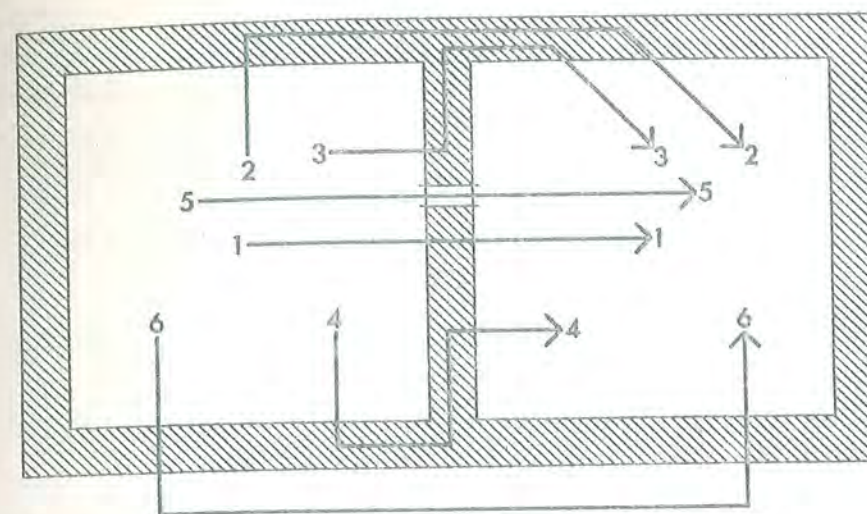
En række forskere har teoretisk behandlet problemet vedrørende lydtransmissionen i bygninger. Det har vist sig muligt at beregne den forventede lydisolations, når dæmpningen i hvert knudepunkt indregnes. Den beregnede lydisolations stemmer i de undersøgte tilfælde relativt godt overens med de målte resultater.

Lydtransmissionen mellem to rum er vist i figur 20. Det må imidlertid bemærkes, at foruden de her viste transmissionsveje (2, 3 og 4) over et knudepunkt, som i en rumlig afbildning vil gå igen flere gange, findes et meget stort antal transmissionsveje over to knudepunkter.

Svarende til reduktionstallet R for en skillevæg kan defineres et flankereduktionstal  $R_n$  ved:

$$R_n = L_s - L_{M,n} + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB,}$$

hvor  $L_s$  er lydtrykkniveauet i senderum, og  $L_{M,n}$  lydtrykkniveauet i modtagerummet, når energioverførsel kun finder sted ad den betragtede



Figur 20. Forskellige veje for lydens transmission fra et rum til et naborum.

- 1: Direkte gennem den adskillende flade.
- 2: Gennem en flankerende flade.
- 3 og 4: Gennem den adskillende flade og en flankerende flade.
- 5: Gennem dele af den adskillende flade, hvis lydisolations er mindre end gennemsnitsværdien.
- 6: Via et flankerende rum.

vej (2, 3 eller 4).  $S$  er det fælles skillefladeareal for de to rum, og  $A$  er antal absorptionsenheder i modtagerum. Flanke-reduktionstal kendes endnu kun for få konstruktioner. Hverken målemetoden eller definitions-ligningen er internationalt standardiseret. For den projekterende ville kendskab til en række konstruktioners flanketransmissionstal imidlertid give mulighed for at forudsige den i en bygning forventede lydisolations med større sikkerhed, end det i øjeblikket kan gøres.

I praksis vil lydtransmissionen ikke blot ske gennem den adskillende væg og de omgivende bygningsdele, men også gennem utætheder eller via flankerende rum. Dette er i figur 20 vist ved transmissionsvejene 5 og 6. Ofte vil disse veje være mere afgørende for lydtransmissionen end vejene 2-4, undertiden også mere afgørende end transmissionen gennem den adskillende bygningsdel. I princippet vil elastiske og lyddæmpende fuger ved samlinger mellem bygningsdele formindske flanketransmissionen, men i praksis lader det sig vanskeligt udføre. En undtagelse udgør en bygning med bærende rammesystem og lette udfyldnings-elementer. Tætningen mellem de adskillende bygningsdele og rammesystemet vil være helt afgørende for de opnåelige resultater.

Måling af lydisolatation

Lydisolatation måles efter regler, som er angivet i DS/ISO/R140. Heri beskrives en standardiseret målemetode, som anvendes i de fleste lande. Desværre er standardiseringen endnu ikke så gennemført, at måleresultater fra forskellige lande umiddelbart er sammenlignelige.

Målinger udføres ved, at en lyd giver anbringes i et rum - senderummet - hvorefter lydtrykniveauet måles i de to rum, hvorimellem lydisolatationen skal måles.

Den målte differens afhænger imidlertid af modtagerummets akustiske tilstand, det er derfor nødvendigt at indføre en korrektion. Det kan ske enten ved at anvende en efterklangstid eller et antal absorptionsenheder som referenceværdi. Ifølge ISO/R140 bør referencestørrelsen være 10 absorptionsenheder, 10 m<sup>2</sup> sab. I flere lande anvendes imidlertid referencestørrelsen 0,5 sekund ved målinger i bygninger. Dette baseres på, at efterklangstiden i møblerede rum i boliger stort set er 0,5 sekund uafhængig af rumstørrelsen.

Ud fra den målte niveauforskel

$$D = L_S - L_M,$$

beregnes lydisolatationen.

I laboratorier, hvor flanketransmissionen er uden indvirkning på måleresultatet, anvendes følgende udtryk:

ionstal) 
$$R = L_S - L_M + 10 \log \frac{A}{S},$$

og i laboratorier, hvor flanketransmissionen indvirker på måleresultatet, anvendes:

$$R' = L_S - L_M + 10 \log \frac{A}{S}.$$

Dette udtryk anvendes også til beregning af lydisolatation i bygninger. Da resultatet ikke udtrykker væggenes isolatation, men isolatationen for væggen plus omgivende vægge, kaldes det ofte for et tilsyneladende

reduktionstal. I det følgende vil blive anvendt betegnelsen reduktionstal for både R og R'.

Da reduktionstallet ikke er defineret ved måling mellem rum, som ikke har en fælles skilleflade, er det nødvendigt at indføre endnu en definition. Dette sker ved korrektion af niveaudifferensen.

Ved anvendelse af referenceværdien  $10 \text{ m}^2$  sab fås den korrigerede niveaudifferens  $D_{10}$ , som i Sverige tidligere blev kaldt "rumsisolering":

$$D_{10} = L_S - L_M + 10 \log \frac{A}{10}$$

Ved anvendelse af referenceværdien 0,5 sekund fås den korrigerede niveaudifferens  $D_{0,5}$ , som anvendes i det danske bygningsreglement under betegnelsen "rumisolation":

lation) 
$$D_{0,5} = L_S - L_M + 10 \log \frac{t}{0,5} .$$

I korrektionsleddene indgår: A, der er antallet af absorptionsenheder i modtagerrummet målt i  $\text{m}^2$ -sab,

S, der er rummenes fælles skillefladeareal målt i  $\text{m}^2$  og t, der er efterklangstiden i modtagerrummet målt i sekunder.

Der findes følgende relation mellem efterklangstid og antallet af absorptionsenheder:

$$t = \frac{0,16V}{A}$$

hvor V er rummets volumen målt i  $\text{m}^3$ .

Mellem de tre udtryk for lydisolationen i bygningen består følgende relation:

$$D_{0,5} = R' + 10 \log \frac{0,32V}{S}$$

$$D_{0,5} = D_{10} + 10 \log 0,032V$$

Hvis således V og S er kendt, kan de øvrige mål for lydisolationen udregnes.

Som før nævnt er efterklangstiden i rum i møblerede boliger stort set uafhængig af rumstørrelsen. For lydisolationen beregnet efter de tre angivne udtryk betyder dette, at rumisolationen vokser med modtagerummets størrelse, at den normaliserede niveaudifferens baseret på 10 absorptionsenheder aftager med voksende modtagerum, og at reduktionstallet er uafhængig af modtagerummets størrelse.

#### Vurdering af måleresultater

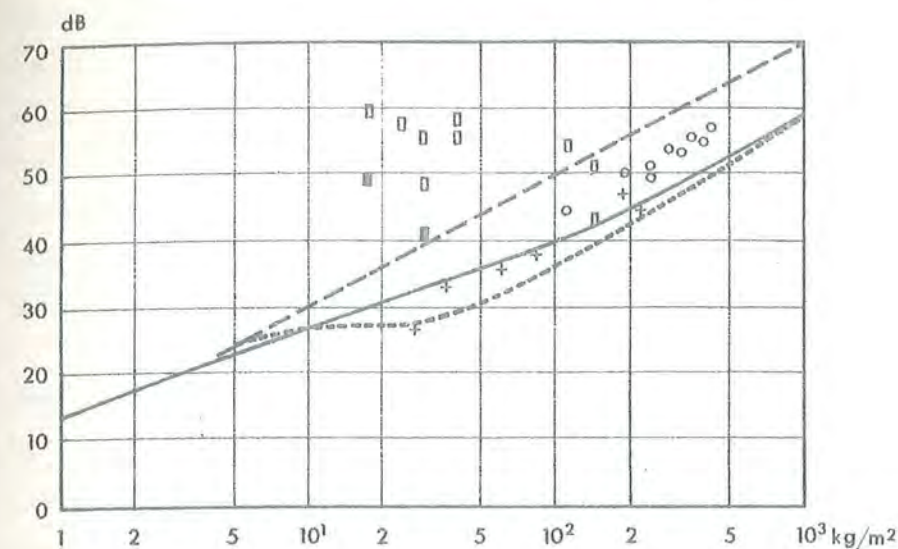
##### Middeltallet

Vurdering af måleresultater kan baseres på middeltallet i de seksten målepunkter, der ligger i det standardiserede frekvensområde fra 100-3150 Hz.

Valget af middeltallet til vurdering af en vægs lydisolations er en logisk følge af den simple teori for lydisolations. I figur 1 og 2 ses, at lydisolations som funktion af frekvensen fremtræder som en ret linie, og at lydisolations for en given frekvens som funktion af massen også er en ret linie. Vælges som frekvens den geometriske middelværdi af 100 og 3150 Hz, svarer funktionsværdien ved denne frekvens til middeltallet for en isolationskurve, der er retlinet i en logaritmisk afbildning. Indsættes  $f = \sqrt{100 \cdot 3150}$  i (2) og optegnes en kurve for isolations som funktion af vægten fås den såkaldte "massekurve" eller "vægtkurve", der angiver middeltallet for lydisolations som funktion af væggenes vægt pr. arealenhed, figur 2. Denne afbildningsform har været anvendt på så mange resultater, at det har været muligt at optegne en empirisk kurve, figur 21, over lydisolations som funktion af vægten baseret på middelreduktionstallet.

Mange måleresultater afviger fra den fundne erfaringskurve. Hertil kan være flere årsager, fx at ikke massive konstruktioner vurderes i relation til massekurven. En del måleresultater ligger over den empirisk bestemte kurve. Det skyldes, at den målte lydisolations kun afviger lidt fra den i figur 1 angivne. Det vil kunne forekomme med vægge, hvis koincidensfrekvens ligger under ca. 100 Hz og over ca. 3000 Hz.

Resultater, som ligger over massekurven, kendes for 12-13 cm betonvægge, for ca. 20 cm klink betonvægge med stor rumvægt og for meget



Figur 21. Middelreduktionstallet som funktion af vægten pr. kvadratmeter. Den fuldt optrukne kurve er en empirisk bestemt "vægtkurve". Den punkterede kurve er beregnet uden hensyn til koincidenseffekt. Den prikkede kurve er beregnet under hensyntagen til koincidenseffekt.  
o : Massive vægge med  $f_g < 100-160$  Hz.  
+ : Massive vægge med  $f_g > 100-160$  Hz.  
□ : Dobbeltvægge med lydabsorberende indlæg.  
■ : Dobbeltvægge uden lydabsorberende indlæg.

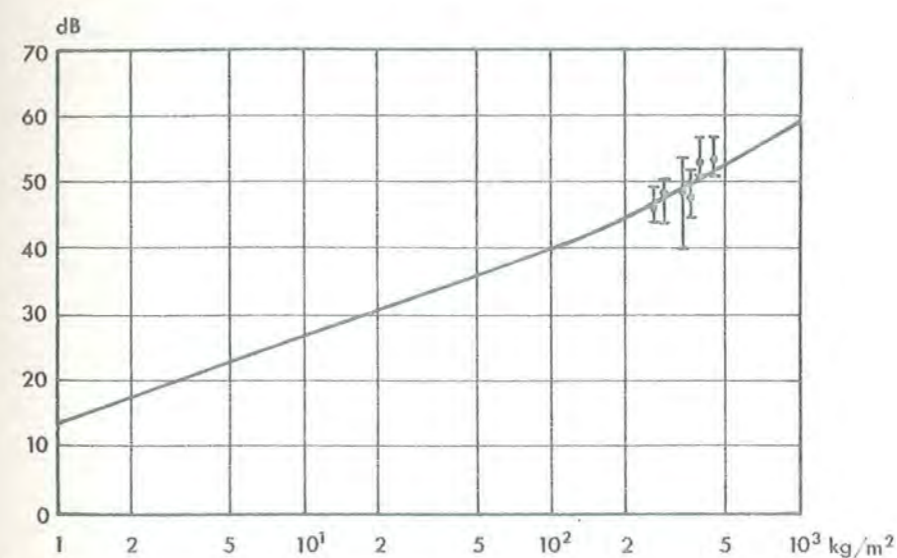
tynde plader af forskelligt materiale. For tyndere massive vægge, fx letbetonvægge 7-10 cm, ligger koincidensfrekvensen midt i frekvensområdet, og der sker en betydelig nedsættelse af lydisolationen. Vurderes lydisolationen for disse vægge på grundlag af middeltallet, behøver det derfor ikke at stemme overens med massekurven. Det er derimod sandsynligt, at middellydisolationen er en del lavere end svarende til massekurven. I figur 21 er indtegnet middellydisolationen for en række massive vægge.

Indtegnes resultater for dobbeltvægge skulle disse, som tidligere omtalt, give en større lydisolation end enkeltvægge. Det gør de som oftest også, men der er dog tilfælde, hvor dobbeltvægge giver mindre lydisolation. Helt lette dobbeltvægge giver ofte isolationsværdier, der ligger indtil 10-15 dB højere end svarende til massekurven.

Måleresultater fra praksis vil som tidligere omtalt afhænge af transmissionen gennem de omgivende bygningsdele. Således er fx en 15 cm betonvægs lydisolation mindre, når den er flankeret af 10 cm

betonvægge, end når den flankeres af 15 cm betonvægge. I figur 22 vises variationer på 10-15 dB for ens vægge. Målinger udført i laboratorier uden flanketransmission kan derfor kun angive en vægs maksimale lydisolation. Vægges udførelse under laboratorieforhold er ofte betydeligt over den standard, som udføres i praksis. D.v.s. at vægge i bygninger må antages at have et ringere reduktionstal end det, der udvises ved laboratoriemålinger.

Middeltallet er et overordentligt simpelt grundlag til vurdering af en vægs lydisolation, men det giver ikke et entydigt resultat. Det samme middeltal opnås med vidt forskellige lydisolationer som funktion af frekvensen. Et middeltal er derfor af begrænset værdi som vurderingsgrundlag uden en samtidig angivelse af lydisolationen som funktion af frekvensen. Da lydisolationens afhængighed af frekvensen ikke fysisk er bundet til det simple udtryk (2), er middeltallet ikke anvendelig til projekteringsformål.



Figur 22. Middelduktionstallet som funktion af vægten pr. kvadratmeter. Den fuldt optrukne kurve er den empirisk bestemte "vægtkurve". I figuren er indtegnet spredningen på middeldrumisolationen ved målinger af seks forskellige vægkonstruktioner: 12 cm beton, 15 cm kalksandsten, 15 cm beton, 23 cm tegl, 18 cm beton og 20 cm beton. Gennemsnitsværdien af middeldrumisolationen er for hver vægkonstruktion markeret ved en udfyldt cirkel.

#### Frekvensafhængig kurve

At karakterisere måleresultatet ved middeltallet af måleresultaterne i de seksten standardiserede frekvenser er en meget enkel metode,

som umiddelbart kan udføres, når måleresultatet foreligger. For at kunne foretage en frekvensafhængig vurdering er det nødvendigt at fastlægge et frekvensforløb og en beregningsmetode, som angiver måleresultatet i forhold til frekvensforløbet.

Ud fra rent fysiske betragtninger ville det være naturligt at vælge et frekvensforløb svarende til den efter teorien forventede isolation, f.eks. svarende til den rette linie i fig. 1. Da opfattelsen af lydisolationen er et fysiologisk problem og ikke et fysisk problem, vil det imidlertid være mere passende at vælge et frekvensforløb for lydisolationen ud fra fysiologiske forhold. En kurve, der angiver dette frekvensforløb, foreligger ikke umiddelbart.

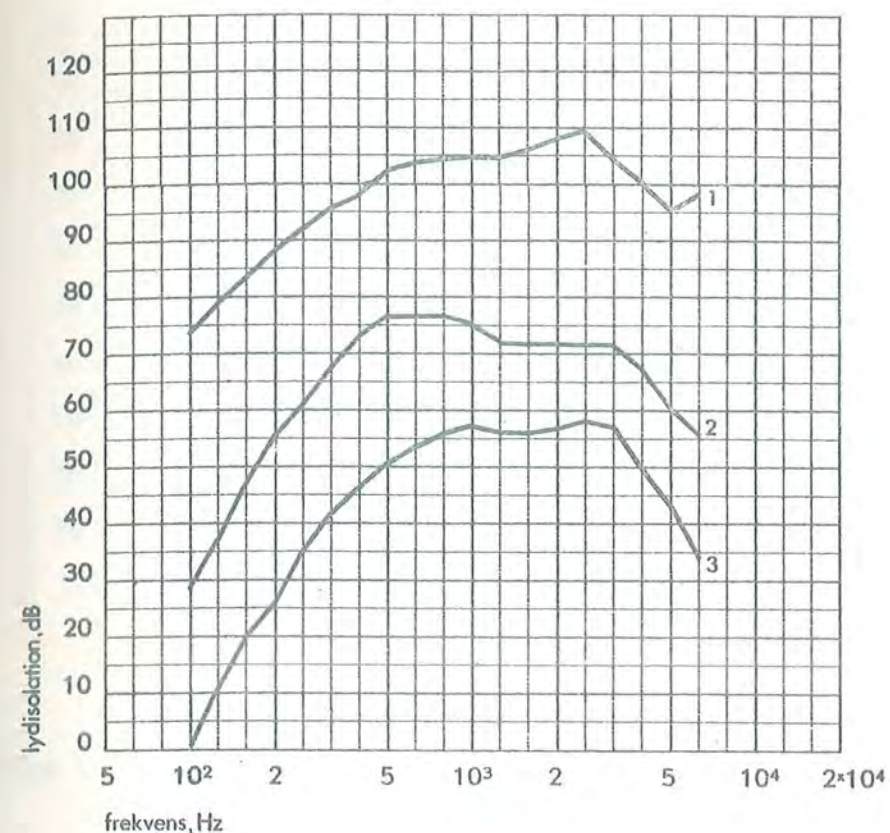
elle funk-  
sbetingelser")

Ved at betragte lydisolationen ud fra funktionelle synspunkter kan der opstilles nogle ønsker vedrørende lydisolationen som funktion af frekvensen mellem to rum. I det ene rum må kunne foregå en vis støjende aktivitet, som ikke må virke generende i naborummet. Der vælges som udgangspunkt et støjniveau i det støjende rum svarende til smertegrænsen, og et støjniveau i naborummet svarende til høretærsklen. Ved smertegrænsen og høretærsklen forstås erfaringskurver, som angiver henholdsvis de højeste lydtrykniveauer et normalt øre kan tolerere uden at føle smerte, og de laveste lydtrykniveauer et normalt øre kan høre. Herved fås det mere fysiologisk betingede forslag til isolation, som er vist i figur 23, kurve 1. Et isolationskrav af denne størrelse ligger imidlertid væsentligt over det niveau, som kan forventes opfyldt i praksis selv med de bedste væg- og dæktyper. Vælges mere realistiske niveauer i det støjgivende og/eller støjmodtagende rum, antager den nødvendige lydisolation værdier, som måske i nogle tilfælde kan opfyldes i praksis.

Vælges et støjniveau i det støjgivende rum svarende til den øvre grænse for lydtrykniveauet for tale eller musik og et støjniveau i det støjmodtagende rum svarende til 20 phonkurven, fås resultatet i figur 24. Om valget skal falde på et støjniveau i modtagerummet svarende til 30- eller 20 phonkurven eller tilsvarende er i den sidste ende et spørgsmål om økonomi.

Til substitution af de fundne frekvensforløb kan fx anvendes den i figuren viste kurve 3, der svarer til det i bygningsreglementet

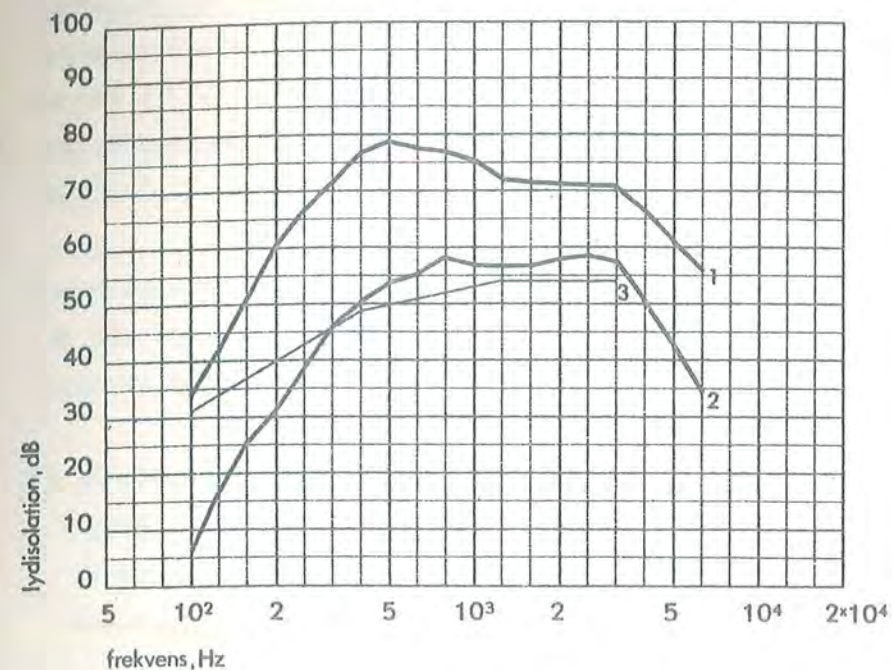




Figur 23. Lydisolation som funktion af frekvensen med niveauet i modtagerum svarende til høretærsklen, 0 phon.  
 Kurve 1: Udgangsniveau i senderum svarende til smertegrænsen.  
 Kurve 2: Udgangsniveau i senderum svarende til det maksimale niveau for normal musikudøvelse.  
 Kurve 3: Udgangsniveau i senderum svarende til det maksimale niveau for tale.

angivne mindste krav til lydisolationen. Det bemærkes både i figur 23 og 24, at kravkurven fra bygningsreglementet tilsyneladende bedømmer lydisolationen ved de laveste frekvenser unødigt hårdt.

Fra et brugssynspunkt er det ønskeligt, at et givet måleresultat ligger over det ønskede frekvensforløb. Det er derfor ved en vurdering nærliggende kun at betragte de målepunkter, som ligger under den angivne kurve. Det kan ske ved at angive størrelsen, gennemsnittet, af afvigelserne mod lavere værdier end angivet ved kurven. Metoden har imidlertid den svaghed, at den ikke kan karakterisere måleresultater, som er bedre end den angivne kurve, og kun dårligt karakteriserer måleresultater med store afvigelser mod lavere værdier.



Figur 24. Nødvendig lydisolationskrav som funktion af frekvensen for at opnå niveauet 20 phon i modtagerummet.  
 Kurve 1: Udgangsniveau i senderummet svarende til det maksimale niveau for musikudøvelse.  
 Kurve 2: Udgangsniveau i senderummet svarende til det maksimale niveau for tale.  
 Kurve 3: Lydisolationskrav mellem boliger.

For at få en frekvensafhængig vurdering, som også giver udtryk for en slags gennemsnitsværdi i lighed med middeltallet, må kravkurven eller referencekurven på lignende måde som middeltallet hæves og sænkes i niveau svarende til måleresultatet. Det kan gøres ved at niveauforskyde den valgte kurve således, at gennemsnitsafvigelsen for de målepunkter, der ligger under kurven, antager værdier inden for et givet interval.

På denne måde kan ethvert måleresultat karakteriseres ved vurderingskurvens niveau. Som skalastørrelse for niveauet kan enten anvendes niveauet ved en fast frekvens eller middeltallet af vurderingskurven i den aktuelle position. I princippet svarer metoden blot til anvendelse af et vejlet middeltal. Når det til et måleresultat hørende niveau for vurderingskurven opgives, haves en kurve, hvorfra gennemsnitsafvigelserne mod lavere værdier ikke overstiger den vedtagne grænse.

Vurdering af lydisolation i boliger

Lydisolationen kan vurderes efter regler, som er angivet i ISO/R717 - Rating of sound insulation for dwellings. I dette dokument beskrives en metode, hvorved et måleresultat kan karakteriseres ved et enkelt tal.

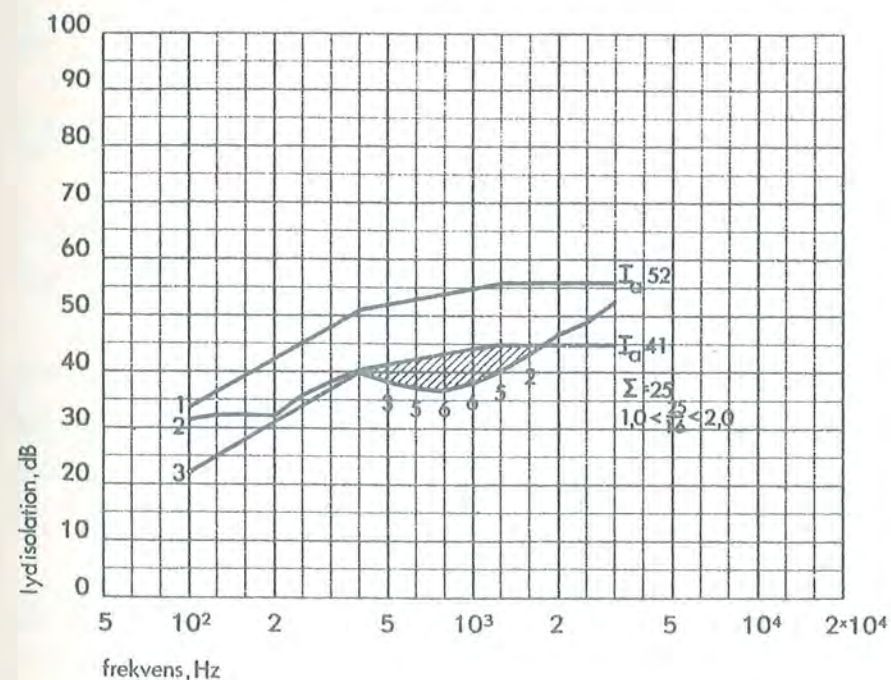
rdiseret  
ngsmetode)

Reduktionstallet  $R'$  og den korrigerede niveaudifferens  $D_{10}$  anvendes som mål for lydisolationen. Måleresultatet sammenlignes med det i figur 25 angivne frekvensforløb, hvis niveau indlægges således:

- 1) at afvigelsen mod lavere værdier end angivet ved kurven og udtrykt ved gennemsnittet af disse afvigelser over alle målefrekvenser skal være større end 1 dB, men mindre end eller lig med 2 dB,

eller

- 2) at gennemsnittet af afvigelserne er mindre end 2 dB og at afvigelsen ved en vilkårlig centerfrekvens ikke overstiger 8 dB ved målinger i 1/3 oktavnband.



Figur 25. Lydisolationen som funktion af frekvensen bedømt i relation til det i ISO/R717 angivne vurderingssystem.  
 Kurve 1: Vurderingskurven I<sub>a</sub>52.  
 Kurve 2: Den målte kurve.  
 Kurve 3: Vurderingskurve I<sub>a</sub>41, som svarer til den målte kurve, d.v.s. den målte kurve kan opfylde et krav svarende til I<sub>a</sub>41.

Et måleresultat, hvis afvigelser fra den i figur 25 angivne kurve 1 opfylder ovenstående kriterium, karakteriseres ved kurven og betegnes  $I_a 52$ .

Betegnelsen I står for Insulation og a for airborne. Tallet 52 er funktionsværdien ved 500 Hz, og denne angiver således niveauet af kurven.

Et måleresultat kan imidlertid også angives ved forskydningen af den tilhørende kurve i forhold til kurven  $I_a 52$ . Dette kan ske ved anvendelse af betegnelsen:

$$M_a = \Delta I_a = I_a - 52 ,$$

hvor  $M_a$  kaldes airborne insulation margin.

Måleresultater, der opfylder kurverne  $I_a 58$  og  $I_a 48$  kan således angives ved henholdsvis:

$$I_a 58 \text{ dB} , \Delta I_a = 6 \text{ dB} , M_a = 6 \text{ dB}$$

og

$$I_a 48 \text{ dB} , \Delta I_a = -4 \text{ dB} , M_a = -4 \text{ dB} .$$

I figur 25, kurve 2, er angivet et måleresultat vurderet efter reglerne i ISO/R717.

nalt refe-  
(niveau)

ISO rekommandationen angiver alene en metode til vurdering af resultatet, og valget af  $I_a 52$  som referenceniveau betyder ikke, at dette som nationalt krav bør foretrækkes frem for andre niveauer. I figur 26 er i tabelform angivet en række værdier af  $I_a$ .

#### Hvilke krav stilles til luftlydisolationen

I adskillige lande har der i flere år været stillet krav til luftlydisolationen mellem boliger, i Danmark siden 1961 og i Tyskland siden 1938. Ofte har bestemmelser om lydisolation karakter af rekommandationer, og kun i få tilfælde er der tale om effektiv kontrol af egentlige lovkrav.

	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	Hz
I <sub>a</sub> 65	46	49	52	55	58	61	64	<u>65</u>	66	67	68	69	69	69	69	69	dB
I <sub>a</sub> 64	45	48	51	54	57	60	63	<u>64</u>	65	66	67	68	68	68	68	68	dB
I <sub>a</sub> 63	44	47	50	53	56	59	62	<u>63</u>	64	65	66	67	67	67	67	67	dB
I <sub>a</sub> 62	43	46	49	52	55	58	61	<u>62</u>	63	64	65	66	66	66	66	66	dB
I <sub>a</sub> 61	42	45	48	51	54	57	60	<u>61</u>	62	63	64	65	65	65	65	65	dB
I <sub>a</sub> 60	41	44	47	50	53	56	59	<u>60</u>	61	62	63	64	64	64	64	64	dB
I <sub>a</sub> 59	40	43	46	49	52	55	58	<u>59</u>	60	61	62	63	63	63	63	63	dB
I <sub>a</sub> 58	39	42	45	48	51	54	57	<u>58</u>	59	60	61	62	62	62	62	62	dB
I <sub>a</sub> 57	38	41	44	47	50	53	56	<u>57</u>	58	59	60	61	61	61	61	61	dB
I <sub>a</sub> 56	37	40	43	46	49	52	55	<u>56</u>	57	58	59	60	60	60	60	60	dB
I <sub>a</sub> 55	36	39	42	45	48	51	54	<u>55</u>	56	57	58	59	59	59	59	59	dB
I <sub>a</sub> 54	35	38	41	44	47	50	53	<u>54</u>	55	56	57	58	58	58	58	58	dB
I <sub>a</sub> 53	34	37	40	43	46	49	52	<u>53</u>	54	55	56	57	57	57	57	57	dB
I <sub>a</sub> 52	33	36	39	42	45	48	51	<u>52</u>	53	54	55	56	56	56	56	56	dB
I <sub>a</sub> 51	32	35	38	41	44	47	50	<u>51</u>	52	53	54	55	55	55	55	55	dB
I <sub>a</sub> 50	31	34	37	40	43	46	49	<u>50</u>	51	52	53	54	54	54	54	54	dB
I <sub>a</sub> 49	30	33	36	39	42	45	48	<u>49</u>	50	51	52	53	53	53	53	53	dB
I <sub>a</sub> 48	29	32	35	38	41	44	47	<u>48</u>	49	50	51	52	52	52	52	52	dB
I <sub>a</sub> 47	28	31	34	37	40	43	46	<u>47</u>	48	49	50	51	51	51	51	51	dB
I <sub>a</sub> 46	27	30	33	36	39	42	45	<u>46</u>	47	48	49	50	50	50	50	50	dB
I <sub>a</sub> 45	26	29	32	35	38	41	44	<u>45</u>	46	47	48	49	49	49	49	49	dB
I <sub>a</sub> 44	25	28	31	34	37	40	43	<u>44</u>	45	46	47	48	48	48	48	48	dB
I <sub>a</sub> 43	24	27	30	33	36	39	42	<u>43</u>	44	45	46	47	47	47	47	47	dB
I <sub>a</sub> 42	23	26	29	32	35	38	41	<u>42</u>	43	44	45	46	46	46	46	46	dB
I <sub>a</sub> 41	22	25	28	31	34	37	40	<u>41</u>	42	43	44	45	45	45	45	45	dB
I <sub>a</sub> 40	21	24	27	30	33	36	39	<u>40</u>	41	42	43	44	44	44	44	44	dB
I <sub>a</sub> 39	20	23	26	29	32	35	38	<u>39</u>	40	41	42	43	43	43	43	43	dB
I <sub>a</sub> 38	19	22	25	28	31	34	37	<u>38</u>	39	40	41	42	42	42	42	42	dB
I <sub>a</sub> 37	18	21	24	27	30	33	36	<u>37</u>	38	39	40	41	41	41	41	41	dB
I <sub>a</sub> 36	17	20	23	26	29	32	35	<u>36</u>	37	38	39	40	40	40	40	40	dB
I <sub>a</sub> 35	16	19	22	25	28	31	34	<u>35</u>	36	37	38	39	39	39	39	39	dB
I <sub>a</sub> 34	15	18	21	24	27	30	33	<u>34</u>	35	36	37	38	38	38	38	38	dB
I <sub>a</sub> 33	14	17	20	23	26	29	32	<u>33</u>	34	35	36	37	37	37	37	37	dB
I <sub>a</sub> 32	13	16	19	22	25	28	31	<u>32</u>	33	34	35	36	36	36	36	36	dB
I <sub>a</sub> 31	12	15	18	21	24	27	30	<u>31</u>	32	33	34	35	35	35	35	35	dB
I <sub>a</sub> 30	11	14	17	20	23	26	29	<u>30</u>	31	32	33	34	34	34	34	34	dB
I <sub>a</sub> 29	10	13	16	19	22	25	28	<u>29</u>	30	31	32	33	33	33	33	33	dB
I <sub>a</sub> 28	9	12	15	18	21	24	27	<u>28</u>	29	30	31	32	32	32	32	32	dB
I <sub>a</sub> 27	8	11	14	17	20	23	26	<u>27</u>	28	29	30	31	31	31	31	31	dB
I <sub>a</sub> 26	7	10	13	16	19	22	25	<u>26</u>	27	28	29	30	30	30	30	30	dB
I <sub>a</sub> 25	6	9	12	15	18	21	24	<u>25</u>	26	27	28	29	29	29	29	29	dB
I <sub>a</sub> 24	5	8	11	14	17	20	23	<u>24</u>	25	26	27	28	28	28	28	28	dB
I <sub>a</sub> 23	4	7	10	13	16	19	22	<u>23</u>	24	25	26	27	27	27	27	27	dB
I <sub>a</sub> 22	3	6	9	12	15	18	21	<u>22</u>	23	24	25	26	26	26	26	26	dB
I <sub>a</sub> 21	2	5	8	11	14	17	20	<u>21</u>	22	23	24	25	25	25	25	25	dB
I <sub>a</sub> 20	1	4	7	10	13	16	19	<u>20</u>	21	22	23	24	24	24	24	24	dB

Figur 26. Skematisk opstilling af vurderingskurverne med hensyn til luftlyd I<sub>a</sub> 20 til 65.

I figur 27 og 28 er givet en skematisk oversigt over, om der stilles krav eller gives rekommandationer, og om kravenes form svarer til indholdet i ISO/R717, samt om kravene til nogle karakteristiske bygningsdele.

	ISO R717	ISO modificeret	Andet grundlag	Lov	Rekommandation	Bemærkninger
Danserk			X	X		
England (incl. Scotland og Wales)			X	X		
Finland	X				X	
Frankrig			X	X		Hvidstøj i senderum dB(A) i modtagerum
Norge			X	X		
Sverige	X			X		
Tyskland (DBR)	X			X		
Tyskland (DDR)	X			X		
U S A		X			X	Frekvensområde 125-4000 Hz
Østrig	X				X	

Figur 27. Oversigt over forskellige landes lovgivning med hensyn til lydisolatation.

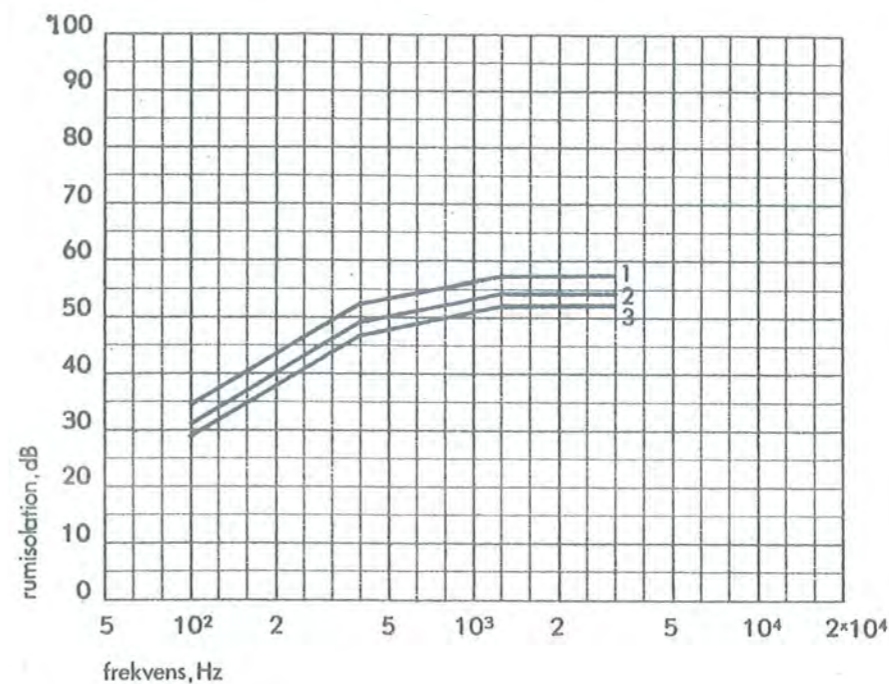
Bygningsdele	Vægge mellem boliger	Etageskillelser mellem boliger		Vægge i boligen	Trapper/reposer	Entréddøre	Vinduer
		luftlyd	trinlyd				
Danmark	+	+	+	+	(+)	$R_m = 30$	+
England (incl. Scotland og Wales)	+	+	+	+	+	+	+
Finland	$I_{n,52}$	$I_{n,53}$	$I_{1,63}$	+	$I_{1,68}$	$R_m = 30$	+
Frankrig	+	+	+	+	+	+	+
Norge	+	+	+	+	+	$R_m = 30$	+
Sverige	$I_{n,52}$	$I_{n,53}$	$I_{1,63}$	+	$I_{1,68}$	$R_m = 30$	+
Tyskland (DBR)	$I_{n,52}$	$I_{n,52}$	$I_{1,60}$	+	$I_{1,60}$	+	+
Tyskland (DDR)	$I_{n,51}$	$I_{n,51}$	$I_{1,63}$	$I_{n,32}$	$I_{1,63}$	$I_{n,27}$	$I_{n,22}$ til $I_{n,42}$
U S A	+	+	+	+	+	+	+
Østrig	$I_{n,52}$	$I_{n,52}$	$I_{1,63}$	$I_{n,44}$	+	$R_m = 30$	$R_m = 30$ til 35

Figur 28. Niveauet af de krav, der stilles til forskellige bygningsdeles lydisolatation, for så vidt de kan sammenlignes. Angivelser i parentes er skønnet niveau. Plus og minus angiver, om der overhovedet findes noget krav.

#### Danmark

Bestemmelserne vedrørende lydisolatation er i Danmark angivet i bygningsreglementet, kapitel 9, hvori der stilles følgende krav til luftlydisolatation mellem boliger. Rumisolatationen  $D_{0,5}$  mellem rum i boliger i etagebyggeri og rækkehusbyggeri må ikke være mindre end angivet ved henholdsvis kurverne 1 og 2 i figur 29. Gennemsnittet af afvigelser mod lavere værdier end angivet ved den respektive

kurve må ikke overstige 1,0 dB. Det forlanges desuden, at middelum-  
isolationen mindst skal være henholdsvis 49 dB og 52 dB.



Figur 29. De i BR-72 angivne krav til rumisolationen som funktion af frekvensen.

Kurve 1: Mellem boliger i rækkehuse.

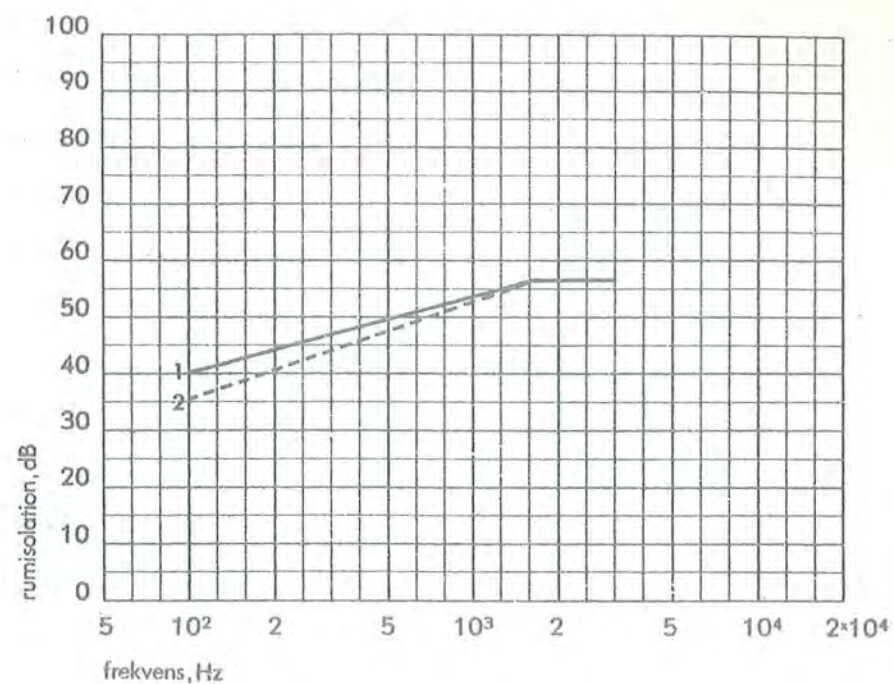
Kurve 2: Mellem boliger i etagebyggeri.

Kurve 3: Mellem undervisningsrum.

### England

Bestemmelserne vedrørende lydisolations er for England og Wales angivet i The Building Regulations 1965, Part G, og for Skotland i The Building Standards (Scotland) Regulations 1963, Part 8.

I England anvendes begrebet niveaudifferens korrigeret til en efterklangstid på 0,5 sekund, d.v.s. svarende til den danske betegnelse rumisolation. Der anvendes to grader af isolation som angivet i figur 30, kurve 1 - Party Wall grade - og kurve 2, grade 1. I Skotland skal vægge og etageadskillelser mellem boliger i etagebyggeri opfylde kurve 2, og vægge mellem rækkehuse kurve 1. Det tillades, at summen af afvigelser mod lavere værdier end angivet ved kurverne er indtil 23 dB, hvilket svarer til en tilladt gennemsnitsafvigelse på mindre end 1,5 dB. I England og Wales anses loven for opfyldt ved brug af nærmere specificerede væg- og dækkonstruktioner. Det forventes, at kravene i England og Wales i nær fremtid ændres



Figur 30. Krav til lydisolationsen som frekvensen mellem boliger i England, Skotland og Wales.  
 Kurve 1: Luftlydisolation mellem boliger i rækkehuse.  
 Kurve 2: Luftlydisolation mellem boliger i etagebyggeri.

til performance standards i lighed med de i Skotland gældende, således at lydisolationsen skal kontrolleres i bygningen og ikke blot på tegningerne.

#### Finland

Finlands bestemmelser vedrørende lydisolationsen er angivet i FBF-norm, svarende til de danske DIF-normer. Bestemmelserne er givet som rekommandationer, men de må i praksis betragtes som lov, da de fleste lokale byggemyndigheder forlanger de i normerne givne rekommandationer overholdt. Normerne er opbygget på grundlag af det i ISO/R717 angivne vurderingssystem. Der stilles ikke samme fordringer til vægges og etageadskillelsers lydisolationsen, idet der generelt forlanges større lydisolationsindeks mellem rum adskilt af etageadskillelser. Normkravene er for boliger  $I_a 52$  og  $I_a 53$ , henholdsvis for vægge og etageadskillelser. Mellem sammenbyggede småhuse er kravet  $I_a 55$ .

#### Frankrig

Bestemmelser vedrørende lydisolationsen er fastlagt i Code de l'Urbanisme et de l'Habitation, paragraf 92, samt i en forord-



ning af 14. juni 1969 nr. 69-596. De franske krav til lydisolations er formuleret således, at der tillades et støjniveau indtil 35 dB(A) i beboelsesrum, når støjniveauet i naboboligen er 80 dB målt pr. oktav i frekvensområdet 125-4000 Hz. Støjniveauerne i de enkelte oktavniveauer korrigeres til en efterklangstid på 0,5 sekund. Niveauet i dB(A) beregnes på grundlag af de korrigerede niveauer.

#### Holland

Bestemmelserne vedrørende lydisolations er i Holland fastlagt i følgende forskrifter NEN 1070 (1962) Natuurkundige grondslagen voor Bouwvoorschriften (NGB) Deel III "Geluidwering in Woningen", Model Bouwverordening og "Voorschriften en wenken voor het outwerpen von woningen". Bestemmelserne er i princippet rekommandationer, der dog i nogle områder har lovkarakter. Kravene er inddelt i 4 kvaliteter og en klassifikation af bygninger sker i henhold til disse. Luftlydisolations måles i 4 oktaver fra 250 til 2000 Hz.

#### Norge

Bestemmelserne vedrørende lydisolations er i Norge angivet i Forskrifter om Bygg, kapitel 53, hvori der stilles følgende krav til rumisolations mellem boliger. Rumisolations  $D_{0,5}$  mellem rum i boliger i etagebyggeri og rækkehusbyggeri må ikke være mindre end angivet ved henholdsvis kurverne 1 og 2 i figur 29. Gennemsnittet af afvigelser mod lavere værdier end angivet ved den respektive kurve må ikke overstige 1,0 dB. Der forlanges desuden, at middelrumisolations skal være henholdsvis 49 dB og 52 dB.

#### Sverige

Bestemmelser vedrørende lydisolations er i Sverige fastlagt i Svenska Byggnorm, kapitel 34. De i normen angivne krav er opbygget efter det i ISO/R717 angivne vurderingssystem. Der forlanges generelt større lydisolationsindeks for rum adskilt med etageadskillelser end med vægge. Kravene er for boliger  $I_{a52}$  og  $I_{a53}$  henholdsvis for vægge og etageadskillelser. Mellem boliger i rækkehuse og lignende bebyggelser  $I_{a55}$ .

#### Tyskland DBR

Bestemmelserne vedrørende lydisolations er fastlagt i DIN 4105. De heri angivne krav er opbygget efter et system, svarende til ISO/R717 og der anvendes den i figur 25 angivne referencekurve  $I_{a52}$ .

Derimod afviger de benyttede betegnelser fra de i ISO-normen angivne. Der anvendes betegnelserne LSM (Luftschallschutzmass) i stedet for de i ISO-normen benyttede  $M_a$  (airborne insulation margin). Kravene er for boliger  $I_a 52$  både for vægge og dæk. Der stilles ikke specielle krav til rækkehuse.

#### Tyskland DDR

Bestemmelserne vedrørende lydisolations er fastlagt i TGL 10687 "Bauphysikalische Schutzmassnahmen - Schallschutz". De heri angivne krav er opbygget efter et system svarende til ISO/R717, og der anvendes den i figur 25 angivne referencekurve. Derimod afviger de benyttede betegnelser fra de i ISO-normen angivne. Der anvendes betegnelserne (Luftschallschutzmass)  $E_L$  i stedet for de i ISO-normen benyttede  $M_a$  (airborne insulation margin). Kravene er for boliger  $I_a 51$  både for vægge og dæk. Der stilles ikke specielle krav til lydisolationsen i rækkehuse.

#### Projektering af lydisolations

Formålet med det i ISO/R717 angivne vurderingsgrundlag er først og fremmest at gøre udveksling af erfaringer ud over landegrænser mulig. Ved at vælge en så fleksibel fremstilling, som ligger i denne vurderingsmetode, kan så godt som alle typer af vægge og dæk indpasses heri. Det betyder en lettelse for udenrigshandel både med komponenter og hele bygninger. En oversigt over vægges og dæks lydisolations i afhængighed af de flankerende bygningsdele kan ikke angives i øjeblikket, men der foreligger tilløb til udarbejdelse af en sådan i Sverige. Tilsvarende vil kunne ske i Danmark, delvis ved bearbejdning af resultater fra Byggeriets Akustiske Målestations undersøgelser af lydisolations i bygninger. Meningen med en sådan bearbejdning af måleresultater bør vel være, at de kan anvendes fx til projekteringsformål. Behandles materialet baseret på ISO/R717 er det direkte anvendeligt i lande, som anvender krav baseret på indholdet i nævnte standard. I Danmark, hvor bygningsreglementet ikke anvender  $I_a$ -værdier, er det nødvendigt at kende isolationskurven som funktion af frekvensen.

I praksis vil opgaverne blive, på basis af tegninger over det aktuelle bygværk, at udregne den forventede rumisolations. Af tegningerne findes skillefladearealer  $S$  og rumvolumener  $V$ . Af:

$$D_{0,5} = R' + 10 \log \frac{0,32V}{S}$$

kan rumisolationen som funktion af frekvensen udregnes. Resultatet skal sammenlignes med den relevante kravkurve i bygningsreglementet, og middeltallet udregnes. Dette må så foretages med resultaterne (angivet ved  $R'$ ) for forskellige vægge med forskellige flankerende bygningsdele. Det er en ret tidsrøvende procedure. Beregningerne ville blive lettere, hvis de kunne udføres med en værdi gældende for hele frekvensområdet. Det kan ske ved brug af middeltallet, men det forekommer mere relevant at anvende kravkurven.

formelregning ved  
g af  $I_a$ )

Betegner fx  $D_{0,5}$  kravkurven, kan denne sammenholdes med den til et måleresultat hørende  $I_a$ -værdi. Måleresultatet er angivet ved reduktionstallet  $R'$ . Spørgsmålet er derfor: hvorledes er relationen mellem det danske krav og  $I_a$ -værdien. Da differensen mellem talstørrelserne, som karakteriserer henholdsvis middeltallet og tilhørende kravkurve, er den samme enten det gælder skoler eller boliger, så kan betragtningen gennemføres alene for kravet til etageboliger.

#### Middeltallet 49 dB og sammenhørende kurvekrav

(Figur 29, kurve 2): Betragtes et måleresultat, hvis frekvensforløb er parallelt med kravkurven, skal alle målepunkter ligge 2 dB over kravkurven, fordi kravkurvens middeltal kun er 47 dB. Den målte kurve, 2 dB over BR's kravkurve, vil bedømt i relation til ISO/R717 på grund af afvigelseskriteriet svare til  $I_a^{54}$ . Et måleresultat med middeltallet 49 dB, som i forhold til kravkurven har 16 dB's afvigelse ved en frekvens, vil, når det bedømmes efter det i ISO/R717 angivne afvigelseskriterium, føre til  $I_a^{42}$ . Resultaterne kan summeres i:

$I_a$ -værdier, som er 7 dB mindre end middeltalskravet, kan aldrig opfylde kravet,

$I_a$ -værdier, som er 5 dB højere end middeltalskravet, vil altid kunne opfylde kravet.

En beregning baseret på kravkurven i relation til  $I_a$ -værdier vil næppe være brugbar, fordi det vil være nødvendigt at dimensionere med for stor sikkerhed. Det vil derfor være rimeligt at undersøge, hvilken betydning middeltallet har.

Dansk kurvekrav, ingen middeltal

Et måleresultat  $I_a 54$ , hvis afvigelser er 8 dB ved fire frekvenser, vil opfylde afvigelseskriteriet for  $I_a 54$  og samtidig have en afvigelse fra kravkurven på 1,0 dB i gennemsnit. Et måleresultat med 16 dB's afvigelse fra kravkurven ved en frekvens vil som ovenfor føre til  $I_a 42$ . Resultaterne kan summeres i:

$I_a$ -værdier, som er 8 dB lavere end kravkurven, kan aldrig opfylde kurvekravet,

$I_a$ -værdier, som er 4 dB højere end kravkurven, vil altid opfylde kurvekravet.

De angivne resultater for de to tilfælde er nøjagtig ens. Der er således den samme variation for  $I_a$ -værdierne, enten der anvendes det nuværende krav eller blot det nugældende kurvekrav.

Danske krav, ingen middeltal, ændring af afvigelseskriterium

En ændring af det danske afvigelseskriterium, således at ingen afvigelser ved en enkelt frekvens må overstige 8 dB, vil ændre den nedre værdi af  $I_a$  fra  $I_a 42$  til  $I_a 50$ , d.v.s. svarende til kravkurven. Herved ville variationsintervallet ændres fra 12 dB til 4 dB.

Af udtrykket:

$$R' = D_{0,5} - 10 \log \frac{0,32V}{S}$$

fås, når der i stedet for resultater ved de enkelte frekvenser og middeltal anvendes resultater angivet ved  $I_a$ -værdier:

$$I_a = R'(I_a)_{\text{nødv.}} \geq D_{0,5}(I_a)_{\text{krav}} - 10 \log \frac{0,32V}{S}$$

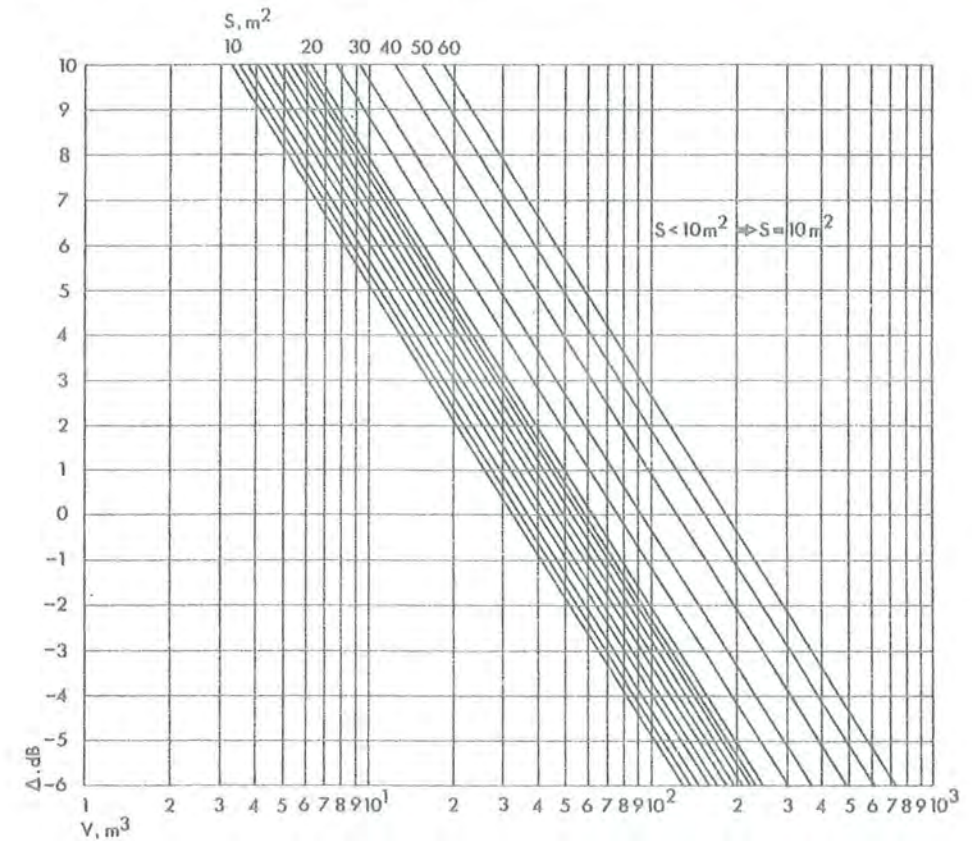
Som de danske krav er i dag, må for  $D_{0,5}(I_a)_{\text{krav}}$  ifølge ovenstående indsættes  $I_a 54$  for at opnå sikkerhed for kravets opfyldelse. Herved fås henholdsvis den nødvendige og tilstrækkelige  $I_a$ -værdi til:

$$I_a \text{ nødv.} \geq I_a 42 - 10 \log \frac{0,32V}{S}$$

$$\text{og } I_a \text{ tilstræk.} \geq I_a 54 - 10 \log \frac{0,32V}{S}$$

$$\Delta = I_{a \text{ tilstræk.}} - I_{a 54} \geq -10 \log V - 10 \log 0,32 \text{ dB} + 10 \log S.$$

Dette udtryk er afbildet i figur 31, hvor den nødvendige differens kan aflæses. Hvis det danske afvigelseskriterium ændres til det i ISO/R717 angivne, skal blot i stedet for  $I_{a 54}$  indsættes den  $I_{a}$ -værdi, som angives ved kravkurven.



Figur 31. Differensen  $\Delta$  afbildet som funktion af volumenet  $V$  med arealet  $S$  som parameter. Er fx  $V = 100 \text{ m}^3$  fås for  $S$  henholdsvis 10, 20 og 50  $\text{m}^2$ ,  $\Delta$ : -4,7, -2, + 1,8 dB, hvoraf findes, idet  $I_{\text{tilstræk.}} \geq I_{a 54} + \Delta$ , henholdsvis:  $I_{a \text{ tilstræk.}}$ :  $I_{a 50}$ ,  $I_{a 52}$ ,  $I_{a 56}$ .

## II TRINLYDISOLATION

### Bygningslyds opståen og udbredelse

Trinlyd er en speciel del af det mere omfattende begreb bygningslyd, d.v.s. den lyd, der frembringes i en bygningsdel ved slag eller gnidning mod denne med et andet legeme. Lyden kan dels betragtes under dens udbredelse i bygningsdelene fjærnt fra stedet for lydens opståen, dels i området nær ved lydkilden. Lydudbredelse i bygningsdele langt fra lydkilden kan på enkelte punkter sammenlignes med luftlydudbredelsen. For at få en god isolation mod luftlyd er det nødvendigt med en tæt adskillelse mellem rummene, på

tilsvarende måde er det nødvendigt med en adskillelse i bygningsdelen, fx en luftspalte, der helt adskiller bygningen i to dele. Den metode er imidlertid lidet egnet til praktisk anvendelse. Det er uhyre vanskeligt at foretage en effektiv isolation mod bygningslyds udbredelse i bygningsdelene. Et væsentligt bidrag til forhindring af lydets udbredelse er at dæmpe lydkilden eller at indlægge et dæmpende lag mellem lydkilden og bygningsdelene.

En teoretisk behandling af problemet vedrørende bygningslyds opståen ved slag med en fast genstand mod en bygningsdel er først sket i de senere år. Ved at gøre den simplificerende forudsætning, at et mindre legeme slår mod en uendelig stor plade, kan problemet løses matematisk. Forholdet mellem den påvirkende kraft og det påvirkende legemes hastighed er frekvensafhængig og reel, hvilket er et forbavsende simpelt resultat. Den afgivne lyds spektrale fordeling afhænger af stødtiden, faldmasse, dækkets tykkelse og stivhed samt af det mellem hammer og dæk liggende materiale. Jo blødere mellemlag, desto mere forskydes frekvensspektret mod lavere frekvenser.

#### Svømmende gulve

Ved at indskyde et blødt mellemlag og på dette udlægge en bøjningstiv plade kan opnås en betydelig nedsættelse af den lydenergi, der transmitteres til den bærende plade. Denne konstruktion betegnes som et svømmende gulv. Resonansfrekvensen  $f_0$  for den svømmende plade bestemmes af

$$\text{Resonansfrekvens)} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{m}},$$

hvor  $S$  er stivheden af det mellemliggende elastiske lag og  $m$  er vægten pr. arealenhed af den svømmende plade.

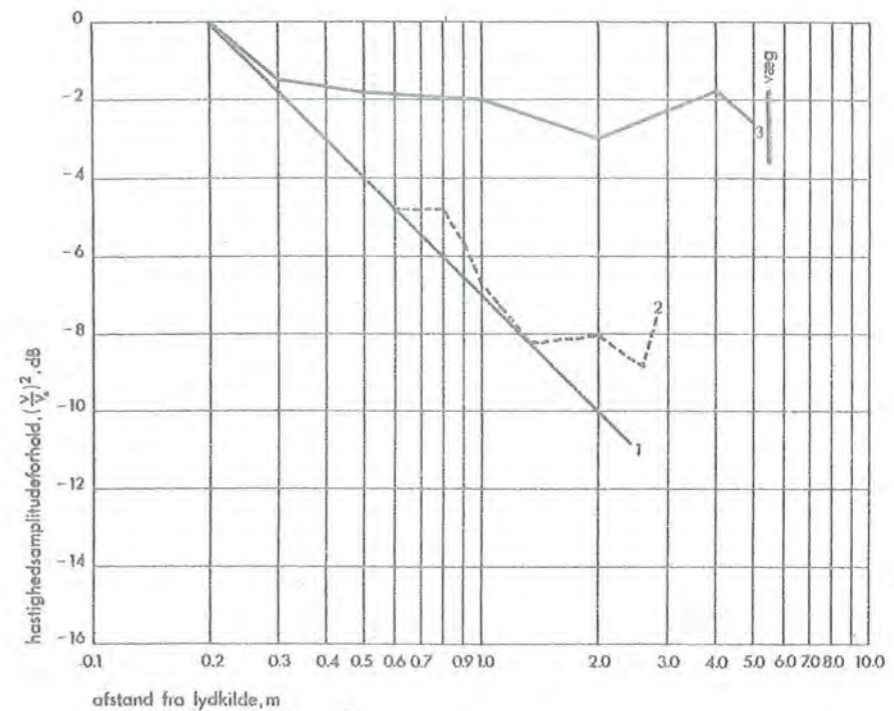
I princippet vil der med en svømmende plade kunne opnås en meget væsentlig nedsættelse af lydtransmissionen. Over resonansfrekvensen kan der maksimalt opnås en forbedring svarende til:

$$\Delta = 40 \log \frac{f}{f_0}.$$

Det er dog kun under forudsætning af, at der sker en dæmpning af lydudbredelsen i mellemrummet mellem den svømmende plade og den bærende plade, og at den svømmende plade enten har ubegrænset udstrækning og en ringe indre dæmpning, eller en begrænset udstrækning og en meget høj indre dæmpning.

pladestørrelsens  
virkning på  
(transmissionen)

Da en svømmende plade i praksis er begrænset, vil der fra de frie pladekanter ske en refleksion af lydenergi. I en vis afstand fra slagstedet vil der derfor opstå et delvis stationært lydfelt. I figur 32 ses måleresultater, som viser dette forhold.



Figur 32. Den relative hastighedsamplitude som funktion af afstanden fra en mekanisk punktpåvirkning af et dæk uden gulvbelægning.

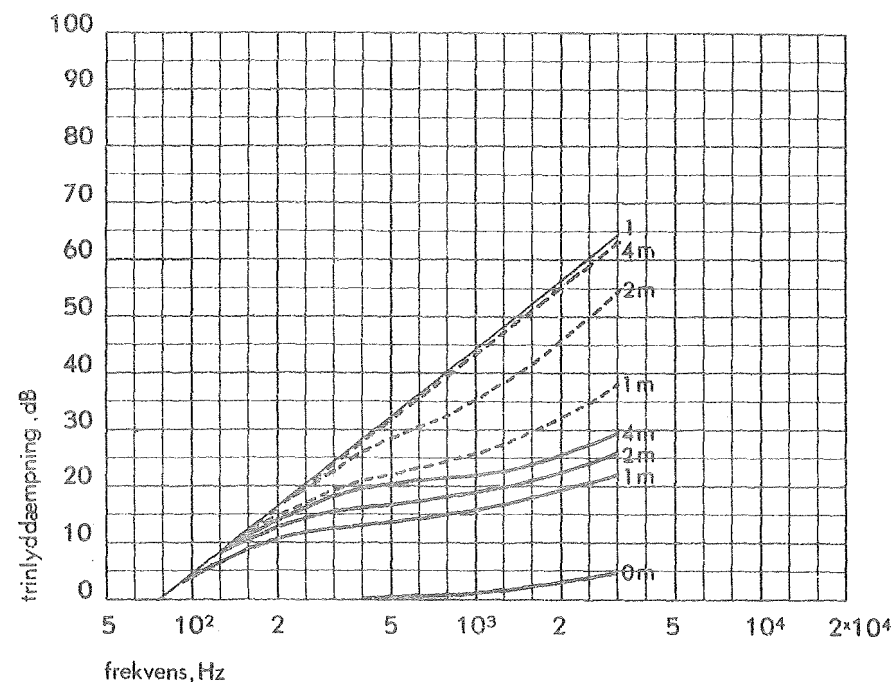
Kurve 1: Teoretisk forløb af amplituden for en uendelig stor plade.

Kurve 2: Målt forløb i laboratorium.

Kurve 3: Målt i en bygning med refleksionsmuligheder fra 4 tunge vægge.

For en given pladestørrelse vil den stationære tilstand indtræffe jo nærmere påvirkningsstedet, desto mindre den indre dæmpning er i den svømmende plade. Faste forbindelser mellem den svømmende plade og den bærende plade virker som broer - lydbroer - hvorover lydenergien kan transmitteres. Selv en enkelt fast forbindelse med et tværsnitsareal på mindre end en fjerdedel af en kvadratcent-

timeter er tilstrækkeligt til at nedsætte den maksimalt opnåelige lyd­dæmpning meget betydelig. I figur 33 er vist nogle af Cremer beregnede resultater.

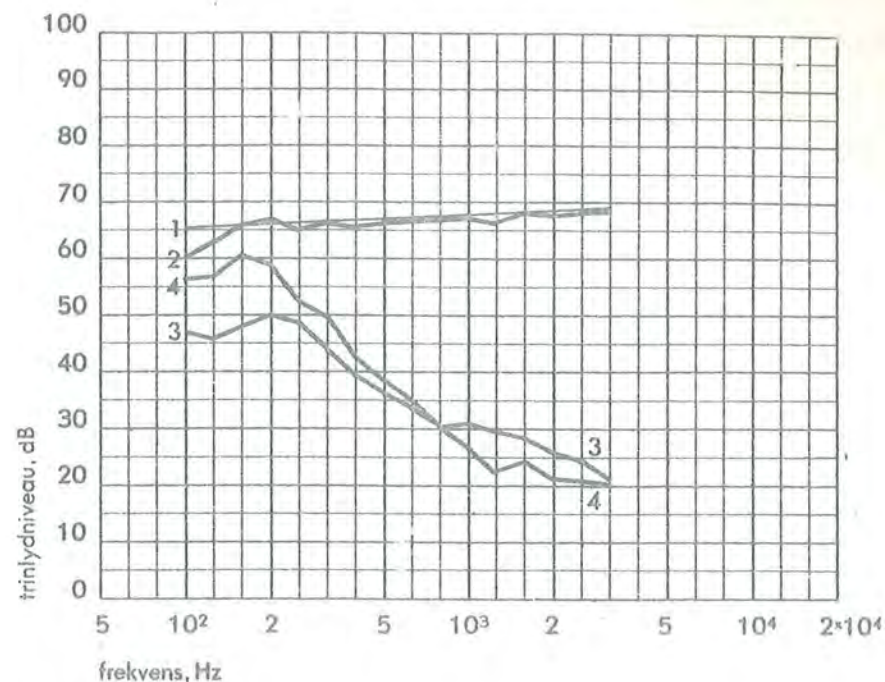


Figur 33. Beregnet trinlyddæmpning som funktion af frekvensen for et svømmende gulv med en  $1 \text{ cm}^2$  lyd­bro under plader med de indre dæmpninger  $\eta = 0$  svarende til beton, og  $\eta = 0,20$  svarende til asfalt. På kurverne er angivet afstanden fra bankestedet. De punkterede linier gælder for plade med indre dæmpning, og de fuldt optrukne linier gælder for plade uden indre dæmpning. Ved bankning umiddelbart over lyd­broen er resultatet ens for de to plader. Den øvre grænse for dæmpningskurverne udgøres af kurve 1, den maksimalt opnåelige trinlyddæmpning med hældningen svarende til  $40 \log (f/f_0)$ .

#### Trinlydniveau målt i laboratorium

For at kunne udføre reproducerbare måleresultater må der foreligge en brugbar lydkilde. En sådan er internationalt standardiseret. Den har 5 hamre af stål, hver på 500 gram, og som hver falder to gange pr. sekund fra en højde af 40 mm. Med denne maskine opnås et delvist stationært lydtrykniveau under dækket. For et dæk uden belægning afhænger det frembragte støjniveau af dækkets tykkelse, geometri og materiale. Støjniveauet stiger i det store og hele kun lidt med frekvensen. Ifølge teorien kan ventes en stigning med frekvensen svarende til hældningen  $(f)^{1/4}$ . Hældningen er indtegnet



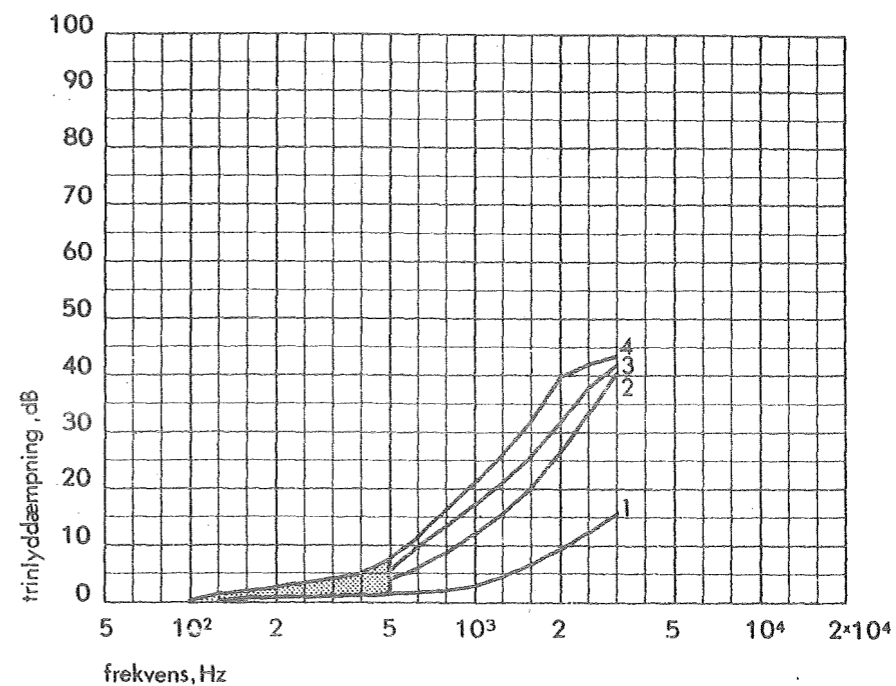


Figur 34. Trinlydniveauet som funktion af frekvensen.  
 Kurve 1: Hældning svarende til  $10 \log (f/f_0)^{1/4}$ .  
 Kurve 2: Trinlydniveau under 14 cm dæk uden gulvbelægning.  
 Kurve 3: Trinlydniveau under 14 cm dæk med svømmende gulv.  
 Kurve 4: Trinlydniveau under 14 cm dæk med tæppebelægning.

i figur 34 sammen med resultater fra målinger på dæk uden gulvbelægning, med tynd gulvbelægning samt med svømmende gulv. Med nogle gulve er det vanskeligt at undgå en pulverisering af overfladen umiddelbart under hamrene, hvorved der sker en beskedent dæmpning af den ved højere frekvenser overførte energi. Differenserne mellem støjniveauer målt under dæk henholdsvis uden og med gulvbelægninger betegnes trinlyddæmpning. Den teoretiske forbedring opnås almindeligvis ikke. En undersøgelse af svømmende gulve viser, at der er nogenlunde overensstemmelse mellem den målte dæmpning for asfaltgulve i laboratorium og den efter teorien beregnede. Derimod er der væsentlige divergenser mellem de ved målinger på svømmende betongulve fundne dæmpninger og de efter teorien beregnede. Det skyldes, at dæmpningen ved lydets udbredelse i betonpladen er betydelig mindre end i de anvendte asfaltgulve. Relativt små asfaltgulve kan i forhold til betongulve med samme udstrækning på grund af reflektionsbidragenes størrelse bedømmes som meget store, d.v.s. at asfaltgulve er nærmere forudsætningen om uendelige pladestørrelser end betongulve.

beton contra  
(falt)

Resultater fra målinger af flere typer af gulvbelægninger udlagt på forskellige støbte dæk viser, at trinlyddæmpningen stort set er uafhængig af dækket. I figur 35 ses resultater for nogle typer af gulvbelægninger.



Figur 35. Trinlyddæmpningen som funktion af frekvensen for tynde gulvbelægninger.

Kurve 1: Linoleum.

Kurve 2: PVC med skumunderlag.

Kurve 3: Linoleum på korkment.

Kurve 4: Tæppebelægning.

#### Trinlydniveau målt i bygninger

Målinger i bygninger bekræfter de fra laboratoriet kendte resultater med hensyn til trinlyddæmpning. Derimod er spredningen af trinlydniveauet under dæk ret stor, og det kan afvige betydeligt fra det i laboratoriet målte niveau. Det skyldes, at lydtransmissionen i praksis ikke blot sker gennem det adskillende dæk, men også gennem de omgivende bærende konstruktioner. Forsynes undersiden af et dæk med en lydisolierende beklædning formindskes den fra dækket til rummet udstrålede lydenergi, men det resulterende niveau afhænger af de omgivende vægges lydtransmissionsegenskaber. Med beton- eller teglvægge er den resulterende virkning ringe, med pladebeklædte træ- eller stålskeletvægge kan virkningen af den lydisolierende beklædning være ganske effektiv. Metoden kan være et

supplement til en god gulvbelægning, men den er ikke en erstatning for denne.

Ved mange gulvbelægningsarbejder er en god og rigtig arbejdsudførelse en afgørende forudsætning for at opnå et brugbart resultat. Det gælder i meget høj grad for svømmende betongulve. En gulvbelægning med så udbredt anvendelse som trægulv på strøer giver meget varierende resultater på grund af vekslende arbejdsudførelse.

#### Måling af trinlydniveau

Trinlydniveau måles i praksis efter regler angivet i DS/ISO/R140, hvori beskrives dels en standardiseret lydkilde - bankemaskinen -, dels en standardiseret målemetode, som anvendes i de fleste lande. Desværre er der mulighed for at vælge to korrektionsmetoder, hvorfor måleresultater fra forskellige lande ikke behøver at være umiddelbart sammenlignelige.

Målinger udføres ved at lyd giveren - bankemaskinen - anbringes i et rum - senderummet. Det frembragte lydtrykniveau måles i de omliggende rum. Det målte niveau afhænger imidlertid af modtagerummets akustiske tilstand. Som det allerede er omtalt under måling af lyd-isolation, er det nødvendigt at indføre en korrektion med enten efterklangstiden eller antallet af absorptionsenheder som referenceværdi. Ifølge ISO/R140 bør referencestørrelsen være  $10 \text{ m}^2$  sab. I flere lande, bl.a. Danmark, anvendes imidlertid 0,5 sekund som referencestørrelse. Det gælder imidlertid kun for målinger udført i bygninger.

Ud fra det målte niveau L beregnes:

$$T_{10} = L + 10 \log \frac{A}{10} ,$$

eller

$$T_{0,5} = L - 10 \log \frac{t}{0,5} .$$

Mellem de to udtryk består følgende relation

$$T_{0,5} = T_{10} - 10 \log 0,032 V ,$$

trinlydniveau)

hvor  $V$  er modtagerummets volumen i  $m^3$ . Der anvendes ved målingerne enten 1/3 oktav eller 1/1 oktav filtre. Det anbefales i ISO dokumentet, at offentliggøre resultater med niveauer pr. 1/1 oktav. Hvis målingerne er udført med 1/3 oktavfiltre, skal der adderes 5 dB til de aflæste resultater. Det er ikke muligt at subtrahere 5 dB fra et måleresultat udført med 1/1 oktavfiltre og få niveauet pr. 1/3 oktav. I Danmark forlanges måleresultater angivet i niveau pr. 1/3 oktav.

#### Middeltal eller frekvensafhængig vurdering

Medens anvendelse af middeltal til karakterisering af måleresultater vedrørende luftlyd har været almindelig anvendt, er det ikke i samme grad tilfældet for trinlyd. En grund hertil er utvivlsomt, at måleresultaterne kun sjældent har et blot delvis retlinet forløb som funktion af frekvensen.

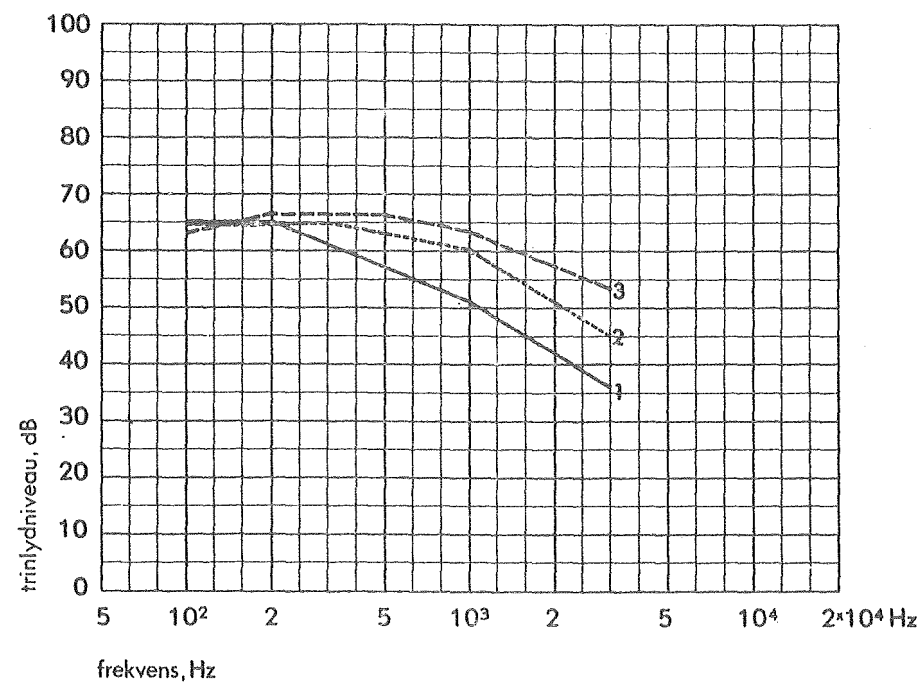
Opstilling af et frekvensafhængigt vurderingsgrundlag er også vanskeligt. Vælges fx en kurve svarende til 10 eller 20 Phon som udgangspunkt for det tilladelige støjniveau, vil det i praksis være meget vanskeligt at måle, om kravet er opfyldt. Det må desuden være en forudsætning, at kravet fastsættes i forhold til relevante lyd-kilder, lyden af fodtrin. Det er imidlertid vanskeligt at fastlægge, hvor meget støj der er normalt for trinlyd, fordi lyd-kilden afhænger af et betydeligt antal variable faktorer - gulvbelægning, fodtøjets art, personens gangvaner m.m. Det er derfor ikke som for luftlydisolationens vedkommende muligt direkte at fremstille et sekundært krav ved angivelse af den nødvendige dæmpning.

Selv om dette kunne gøres, er der imidlertid endnu et problem, nemlig lydstyrken fra støjkilden. For at kunne måle støjniveauet i praksis, må det frembragte støjniveau være så højt, at det kan udskilles fra baggrundsstøjniveauet. I overensstemmelse med teorien for bygningslyds frembringelse kan støjkildens styrke ikke ændres uden, at der samtidig sker en ændring af støjniveauet både i styrke og i frekvenssammensætning. Da det er nødvendigt at kunne udføre målinger, har man valgt at standardisere en lyd-kilde - den tidligere omtalte bankemaskine. Støjniveauet frembragt med denne maskine svarer ikke til det af fodtrin frembragte. Undersøgelser viser, at den målte forbedring henholdsvis ved brug af bankemaskine

bankemaskine  
(fra fodtrin,  
lydniveau  
(fra trinlyd))

og personens gang som støjkilder ikke er ens for alle belægninger. Der er nogenlunde overensstemmelse mellem resultaterne for svømmende gulve, medens bankemaskinen giver for gode resultater med tynde, påklæbte belægninger, og for dårlige resultater med tæppebelægninger. Til trods for disse ulemper ved brug af bankemaskine, anses fordelene ved at have et signal, der kan måles uden for helt ekstreme tidspunkter, som værende tilstrækkelig stor til stadig at foretrække maskinen som lydkilde.

I Bygningsreglement for købstæderne og landet angives, at trinlydniveauet skal følge en nærmere angiven kurve - som er vist i figur 36. Denne kurve er resultat af målinger udført på 14 cm betondæk med trægulv på strøer på brikker af 10 mm kork, idet denne konstruktion bliver anset som et ønskeligt mindstemål for trinlydisolationen. I Tyskland har man valgt en anden kurve - figur 36 - som udgangsniveau. Der foreligger ingen fysiologisk begrundelse for valget af disse kurver, trods dette har de begge vist sig at være særdeles anvendelige i praksis.



Figur 36. Krav til trinlydniveau som funktion af frekvensen målt pr. 1/3 oktav.  
 Kurve 1: Danmark.  
 Kurve 2: Tyskland.  
 Kurve 3: England.

(standardiseret  
vurderingsmetode)

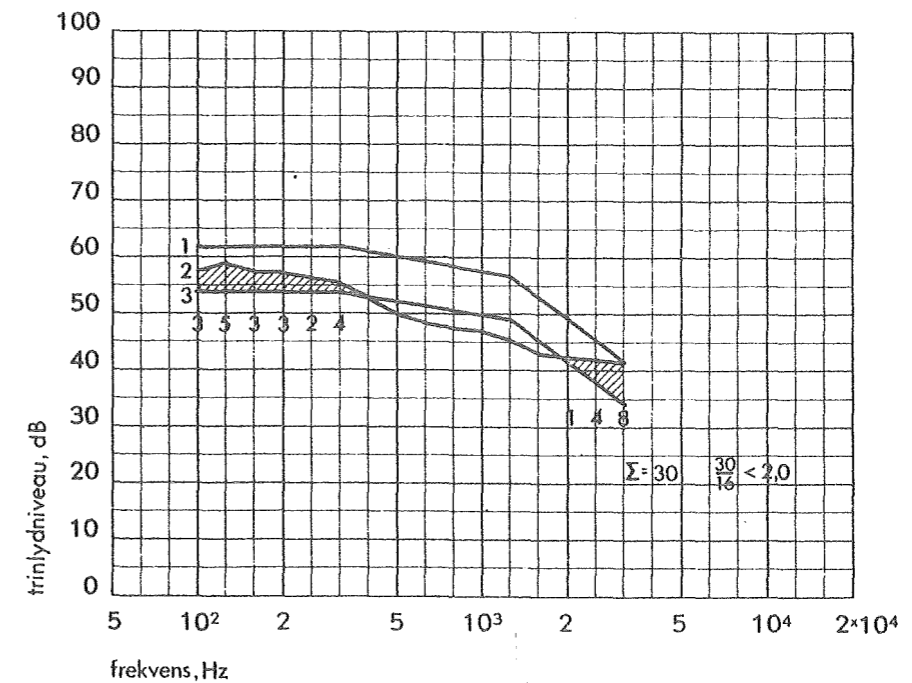
### Vurdering af trinlydisolation i boliger

Trinlydniveauet kan vurderes efter regler, som er angivet i det før nævnte dokument ISO/R717 - Rating og sound insulation for dwellings. Trinlydniveauet anvendes som mål for isolationen mod trinlyd. Måleresultatet sammenlignes med det i figur 37 angivne frekvensforløb, hvis niveau indlægges således,

- a) at afvigelse mod højere værdier end angivet ved kurven og udtrykt ved gennemsnittet af disse afvigelser over alle målefrequenser skal være større end 1 dB, men mindre end eller lig med 2,0 dB,

eller

- b) at gennemsnittet af afvigelserne er mindre end 2 dB, og at afvigelsen ved en vilkårlig frekvens ikke overstiger 8 dB ved målinger i 1/3 oktavbånd.



Figur 37. Trinlydniveau som funktion af frekvensen bedømt i relation til det i ISO/R717 angivne vurderingssystem.

Kurve 1: Vurderingskurven I<sub>i</sub>60, svarende til I<sub>i</sub>65 ved brug af oktavfiltre.

Kurve 2: Den mælte kurve.

Kurve 3: Vurderingskurven I<sub>i</sub>52 som svarer til den mælte kurve, d.v.s. den mælte kurve kan opfylde et krav svarende til I<sub>i</sub>52, men da målingerne er udført med 1/3 oktavfiltre skal der adderes 5 dB til resultatet, således at måleresultatet svarer til I<sub>i</sub>57 - I<sub>i</sub>52 + 5.

Et måleresultat, hvis afvigelser fra den i figur 37 angivne kurve 1 opfylder ovenstående kriterium, karakteriseres ved kurven og betegnes  $I_{i,65}$ . Betegnelsen  $I$  står for Insulation og  $i$  for impact. Tallet 65 er ordinatværdien ved 500 Hz for støj i oktavbånd, og denne angiver således niveauet af kurven.

Et måleresultat kan også angives ved forskydningen af kurven op og ned i forhold til kurven  $I_{i,65}$ . Dette kan ske ved betegnelsen:

$$M_i = \Delta I_i = I_{i,65} - I_i ,$$

hvor  $M_i$  kaldes impact insulation margin.

Måleresultater, der opfylder kurverne  $I_{i,70}$  og  $I_{i,55}$  kan således angives ved henholdsvis:

$$I_{i,70} \text{ dB, } \Delta I_i = M_i = -5 \text{ dB}$$

$$I_{i,55} \text{ dB, } \Delta I_i = M_i = 10 \text{ dB .}$$

ISO/R717 angiver alene en metode til vurdering af resultatet. Valget af  $I_{i,65}$  som referenceniveaukurve betyder ikke, at den som nationalt krav bør foretrækkes for andre niveaukurver. I figur 38 er angivet en række værdier af  $I_i$ . Hvis der anvendes 1/3 oktavfiltre, skal der adderes 5 dB til den angivne værdi for at få  $I_i$  værdien. Dette skyldes, at et oktavbånd indeholder tre 1/3 oktavbånd og  $10 \log 3 \sim 5$  dB.

#### Hvilke krav stilles til trinlydniveauet

I en række lande har der i flere år været stillet krav til trinlydniveauet i boliger. I Danmark siden 1961 og i Tyskland siden 1949. Bestemmelserne har i nogle lande karakter af rekommandationer. I nogle tilfælde er der tale om krav med en effektiv kontrol af disse. I figur 27 og figur 28 er vist en oversigt over, om der stilles krav eller gives rekommandationer, og om kravenes form svarer til indholdet i ISO/R717.

#### Danmark

I Danmark er bestemmelserne vedrørende lydisolationsniveau angivet i Bygningsreglement for købstæderne og landet, kap. 9, hvori der stilles følgende krav til trinlydniveauet. Etageadskillelser skal udføres

ionalt  
referenceniveau)

	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150 Hz
I <sub>i</sub> 75	77	77	77	77	77	77	76	75	74	73	72	69	66	63	60	57 dB
I <sub>i</sub> 74	76	76	76	76	76	76	75	74	73	72	71	68	65	62	59	56 dB
I <sub>i</sub> 73	75	75	75	75	75	75	74	73	72	71	70	67	64	61	58	55 dB
I <sub>i</sub> 72	74	74	74	74	74	74	73	72	71	70	69	66	63	60	57	54 dB
I <sub>i</sub> 71	73	73	73	73	73	73	72	71	70	69	68	65	62	59	56	53 dB
I <sub>i</sub> 70	72	72	72	72	72	72	71	70	69	68	67	64	61	58	55	52 dB
I <sub>i</sub> 69	71	71	71	71	71	71	70	69	68	67	66	63	60	57	54	51 dB
I <sub>i</sub> 68	70	70	70	70	70	70	69	68	67	66	65	62	59	56	53	50 dB
I <sub>i</sub> 67	69	69	69	69	69	69	68	67	66	65	64	61	58	55	52	49 dB
I <sub>i</sub> 66	68	68	68	68	68	68	67	66	65	64	63	60	57	54	51	48 dB
I <sub>i</sub> 65	67	67	67	67	67	67	66	65	64	63	62	59	56	53	50	47 dB
I <sub>i</sub> 64	66	66	66	66	66	66	65	64	63	62	61	58	55	52	49	46 dB
I <sub>i</sub> 63	65	65	65	65	65	65	64	63	62	61	60	57	54	51	48	45 dB
I <sub>i</sub> 62	64	64	64	64	64	64	63	62	61	60	59	56	53	50	47	44 dB
I <sub>i</sub> 61	63	63	63	63	63	63	62	61	60	59	58	55	52	49	46	43 dB
I <sub>i</sub> 60	62	62	62	62	62	62	61	60	59	58	57	54	51	48	45	42 dB
I <sub>i</sub> 59	61	61	61	61	61	61	60	59	58	57	56	53	50	47	44	41 dB
I <sub>i</sub> 58	60	60	60	60	60	60	59	58	57	56	55	52	49	46	43	40 dB
I <sub>i</sub> 57	59	59	59	59	59	59	58	57	56	55	54	51	48	45	42	39 dB
I <sub>i</sub> 56	58	58	58	58	58	58	57	56	55	54	53	50	47	44	41	38 dB
I <sub>i</sub> 55	57	57	57	57	57	57	56	55	54	53	52	49	46	43	40	37 dB
I <sub>i</sub> 54	56	56	56	56	56	56	55	54	53	52	51	48	45	42	39	36 dB
I <sub>i</sub> 53	55	55	55	55	55	55	54	53	52	51	50	47	44	41	38	35 dB
I <sub>i</sub> 52	54	54	54	54	54	54	53	52	51	50	49	46	43	40	37	34 dB
I <sub>i</sub> 51	53	53	53	53	53	53	52	51	50	49	48	45	42	39	36	33 dB
I <sub>i</sub> 50	52	52	52	52	52	52	51	50	49	48	47	44	41	38	35	32 dB
I <sub>i</sub> 49	51	51	51	51	51	51	50	49	48	47	46	43	40	37	34	31 dB
I <sub>i</sub> 48	50	50	50	50	50	50	49	48	47	46	45	42	39	36	33	30 dB
I <sub>i</sub> 47	49	49	49	49	49	49	48	47	46	45	44	41	38	35	32	29 dB
I <sub>i</sub> 46	48	48	48	48	48	48	47	46	45	44	43	40	37	34	31	28 dB
I <sub>i</sub> 45	47	47	47	47	47	47	46	45	44	43	42	39	36	33	30	27 dB

Figur 38. Skematisk opstilling af vurderingskurver med hensyn til trinlyd I<sub>i</sub>45 til I<sub>i</sub>70. Udføres målinger med 1/3 oktavfiltre, skal der til den angivne værdi for I<sub>i</sub> forhøjes med 5.

således, at trinlydniveauet i beboelsesrum ikke overstiger den i figur 36 angivne kurve 1. Der tillades afvigelser mod højere værdier, når gennemsnittet af disse afvigelser ikke overstiger 1,0 dB.

#### England

I England måles trinlydniveauet pr. 1/3 oktav, og det målte niveau korrigeres til en efterklangstid på 0,5 sekund, d.v.s. svarende til den danske betegnelse trinlydniveau. Trinlydniveauet i naboboliger må ikke overstige den i figur 36 angivne kurve 3. Der tillades dog afvigelser mod højere værdier, når summen af disse ikke overstiger 23 dB, hvilket svarer til en tilladt gennemsnitsafvigelse på mindre end 1,5 dB.



Finland

I Finland måles trinlydniveauet pr. 1/3 oktav, og det målte niveau korrigeres til en absorptionsevne i rummet svarende til 10 m<sup>2</sup> sab. Normerne i Finland er rekommanderende, og der anvendes det i ISO/R717 angivne vurderingssystem. Der rekommanderes i øjeblikket et trinlydniveau, som pr. oktav svarer til I<sub>1</sub>63 som i Sverige.

Frankrig

I Frankrig måles trinlydniveauet pr. 1/1 oktav i frekvensområdet 125-4000 Hz, og det målte niveau korrigeres til en efterklangstid på 0,5 sekund. På basis af de korrigerede niveauer udregnes støjniveauet i dB(A), som ikke må overstige 70 dB(A) i beboelsesrum.

Norge

I Norge måles trinlydniveauet pr. 1/3 oktav, og det målte niveau korrigeres til en efterklangstid på 0,5 sekund i modtagerummet. Kravene er angivet i Forskrifter om Bygg, hvori det forlanges, at trinlydniveauet i beboelsesrum ikke overstiger den i figur 36 angivne kurve 1. Der tillades afvigelser mod højere værdier, når gennemsnittet af disse afvigelser ikke overstiger 1,0 dB.

Sverige

I Sverige måles trinlydniveauet pr. 1/3 oktav, og det målte niveau korrigeres til en absorptionsevne i modtagerummet svarende til 10 m<sup>2</sup> sab. Kravene er angivet i Svensk Byggnorm, og der anvendes det i ISO/R717 angivne vurderingssystem. I øjeblikket skal trinlydniveauet i beboelsesrum være mindre end svarende til I<sub>1</sub>63. Det må fremhæves, at kravet gælder for 1/3 oktavresultater korrigeret med 5 dB.

Tyskland DER

I Vesttyskland måles trinlydniveauet pr. 1/1 oktav, og det målte niveau korrigeres til en absorptionsevne i modtagerummet svarende til 10 m<sup>2</sup> sab. Kravene er angivet i DIN 4109, og der anvendes det i ISO/R717 angivne vurderingssystem, men ikke de deri givne betegnelser. I øjeblikket skal trinlydniveauet i beboelsesrum være mindre end svarende til I<sub>1</sub>68 dB.

Tyskland DDR

I Østtyskland måles trinlydniveauet pr. 1/1 oktav, og der korrigeres til 10 m<sup>2</sup> sab. Kravene er angivet i TGL 10687, og der anvendes det i ISO/R717 angivne vurderingssystem, men ikke de deri angivne betegnelser. I øjeblikket skal trinlydniveauet i beboelsesrum være mindre end svarende til I<sub>1</sub>68 dB.

Østrig

I Østrig måles trinlydniveauet pr. 1/1 oktav, og der korrigeres til 10 m<sup>2</sup> sab. Bestemmelserne er angivet i Önorm B8115, de er rekommanderende, men i flere delstater lokalt lovfæstet. Der anvendes det i ISO/R717 angivne vurderingssystem, men ikke de deri angivne betegnelser. I øjeblikket skal trinlydniveauet i beboelsesrum være mindre end svarende til I<sub>1</sub>68.

U.S.A.

I U.S.A. måles trinlydniveauet pr. 1/3 oktav, og det målte niveau korrigeres til en efterklangstid på 0,5 sekund. Der findes ikke i U.S.A. noget fælles krav til trinlydniveauet, men enkelte stater, fx staten New York har regler for lydisolations. The Federal Housing Authority anbefaler i FHA Bullo 260 brug af en kurve betegnet INR. Kurveformen svarer ikke til nogle af de tidligere nævnte. Der anvendes en vurderingsmetode svarende til den i ISO/R717 angivne.

AFSLUTTENDE BEMÆRKNINGER

Fra at være en viden baseret på meget forenklet teoretisk grundlag har begrebet lydisolations udviklet sig til at være en erfaringsviden, som bygger på resultater fra målinger af lydisolations i færdige bygninger. Det er karakteristisk, at målinger i næsten alle lande udføres efter den samme metode, mens bedømmelsen og behandlingen af resultaterne afviger på væsentlige punkter. Den form, som det enkelte land har givet sine krav til lydisolations, er temmelig forskellige. Med rette kan det spørgsmål stilles: hvor ligger de danske bestemmelser i forhold til bestemmelserne i de forskellige lande, vi har en vis forbindelse med.

Det fremgår, at Danmark og Norge udgør en mindre gruppe med ens bestemmelser og vurderingsgrundlag. Den største gruppe af lande med delvis ens bestemmelser og vurderingsgrundlag udgøres af Sverige, Finland, Øst- og Vesttyskland, Østrig og delvis U.S.A. Bestemmelserne i

disse lande knytter sig tæt til det i ISO/R717 angivne vurderingsgrundlag. Afvigende fra de øvrige lande er derimod Frankrig, Holland og England, der udgør tre grupper. Englands principper for vurdering falder dog delvis sammen med de dansk-norske.

Vil udviklingen gå i retning af, at de øvrige lande tilpasser sig det i ISO/R717 angivne grundlag, fordi det anvendes i den største gruppe af lande? Et sådant spørgsmål kan ikke besvares på nuværende tidspunkt, hvor det ikke er muligt at sige, hvilken vej udviklingen vil gå.

De franske bestemmelser, der er ganske nye, er meget karakteristiske, idet de tilgodeser netop det funktionskravsprincip, der i dag anses som noget fundamentalt ved udarbejdelsen af nye bestemmelser. Det franske krav er mere vendt mod begrebet funktionskriterier end noget andet lands bestemmelser. De fastlægger kun støjniveauet i et beboelsesrum, dog med den begrænsning, at støjniveauet i naboboliger skal være af en given størrelse. Bestemmelserne siger ikke noget om den egentlige isolation, der må betragtes som et afledet funktionskrav.

De danske bestemmelser bygger på isolationsbegrebet, således at differensen mellem de i to rum målte og korrigerede niveauer skal være større end isolationskravet. Ved den dansk-norsk-engelske vurdering, vil den faktiske isolation være afhængig af måleretningen, medmindre sende- og modtagerum er lige store. Kravet om en bestemt niveaudifferens mellem rum med delvis vilkårlige størrelser vil derfor ikke være direkte anvendeligt til projektering. I praksis vil kun de færreste være i stand til at forvalte bestemmelser baseret på disse funktionskriterier.

Det i ISO/R717 angivne vurderingsgrundlag baseres på målingen af en bygningsdels lydisolations, altså i højere grad en slags komponentkrav. Kravet går dog både på komponenten og dennes opsætning i bygningen. Efter manges opfattelse er det - ved at stille kravet på denne måde - lykkedes at finde et mere projekteringsvenligt system, der foruden vurderingsmetoden i ISO/R717 samtidig indeholder angivelse af kvalitetsniveauer.

Om man i Danmark ved en fremtidig revision af lydisolationskravene



vil eller bør følge den i ISO/R717 anlagte kurs, er naturligvis et spørgsmål, som fremtiden må afgøre.

Hvis man ønsker at gå ind for en bedre og mere udbredt forståelse af lydisolationsproblemerne, er det et spørgsmål, om ikke det i det lange løb ville være bedre at vælge den af ISO standardiserede metode, uanset om det reelt måtte betyde et tilbageskridt for anvendelse af det rene funktionskriterium. Uanset om vore bestemmelser vedrørende lydisolations i fremtiden vil følge de af ISO stillede forslag, eller vi vil beholde vort nuværende system, så vil det være en betydelig lettelse i bedømmelsen af andre landes krav, hvis der blev anvendt det i ISO-forslaget angivne afvigelseskriterium. Herved vil begrebet middeltal falde bort. Det vil være muligt at regne ud, hvilke isolationsniveauer, der - angivet efter ISO-systemet - vil kunne opfylde de i Danmark stillede krav til rumisolations. Desuden vil den i ISO/R717 indeholdte metode til kvalitetsniveauangivelse direkte kunne udnyttes.

Litteraturfortegnelse

- R. Berger: Über die Schalldurchlässigkeit. Dissertation. München 1910.
- H.W. Bobran: Trittschallisolerung durch weiche Bodenbeläge und fussnahe Wärmedämmschichten. Lärmbehämpfung 1960, pag. 1.
- O. Brandt: Ljudisolering hos fönster og glaspartier. Teknisk Tidsskrift 1954, pag. 1129.
- L. Cremer: Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. Akustische Zeitschrift 1942, pag. 81.
- L. Cremer: Calculation of Sound Propagation in structures. Acustica 1953, pag. 317.
- L. Cremer: Fortschrifte und Forschungen im Bauwesen Reihe D, Heft 2. Schallschutz I og Heft 23 Schallschutz II. Stuttgart 1952.
- L. Cremer: Theorie der Entstehung des Klopfeschalls. Frequens 1948, pag. 61.
- L. Cremer: Theorie des Klopfeschalles bei Decken mit schwimmendem Estrich. Acustica 1952, pag. 167.
- L. Cremer: Berechnung der Wirkung von Schallbrücken. Acustica 1954, pag. 273.
- A. Eisenberg: Dis Schalldämmung von gläsern und Verglasungen. Glastechnische Berichte 1958, pag. 197.
- E. Fortun: Trittschallverhalten fusswarmer, elastischer Bodenbeläge und Belagskombinationen. Boden, Wand und Decke 1961, Heft 7.
- K. Gösele: Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. Acustica 1968, pag. 334.
- K. Gösele: Schallabstrahlung von Platten die zu Peigeschwingungen angeregt sind. Acustica 1953, pag. 243.
- J. Götz: Über den Schalldurchgang durch Metallplatten in Flüssigkeiten bei Schrägem Einfall einer ebenen Welle. Akustische Zeitschrift 1943, pag. 145.
- M. Heckl: Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. Acustica 1960, pag. 98.

- M. Heckl: Untersuchungen an orthotropen Platten.  
Acustica 1960, pag. 109.
- M. Heckl: Schallabstrahlung von Platten bei punktförmiger  
Anregung.  
Acustica 1959, pag. 371.
- M. Heckl: Einige anwendungen des Reziprozitätsprinzips  
in der Akustik.  
Frequenz 1964, pag. 299.
- F. Ingerslev: Lærebog for bygningsingeniører.  
København 1949.
- R. Josse: Les Parois Doubles utilisées a des fins Acou-  
stiques.  
Cahier du Centre Scientifique et Technique du  
Batiment, Juni 1966, cahier 693.
- T. Kihlman: Sound Transmission in Building Structures of  
Concrete.  
Journal of Sound and Vibration 1970, pag. 435.
- A. London: Transmission of Reverberant Sound Through Single  
Walls.  
Journal of Research of National Bureau of Stan-  
dards. Volume 42, 1949.
- T. Mariner: Technical Problems in Impact Noise Testing.  
Building Research, jan-feb. 1964, pag. 52.
- D. Olgyk and  
T.D. Northwood: Assesment of Footstep Noise Through Wood-joist  
and Concrete floors.  
Journal of The Acoustical Society of America,  
1968, pag. 730.
- H.J. Purkis and  
P.H. Parkin: Indirect Sound Transmission with Joist and Solid  
Floors.  
Acustica 1952, pag. 237.
- Lord Rayligh: The Theory of Sound.  
London 1873.
- H. Reissner: Schallstrahl - Durchgang durch planparallele Platten.  
Helv.Phys.Acta 11 (1938 pag. 140).
- J. Sadowski und  
B. Szudrowicz: Einfluss weicher Gehbeläge auf das Luftschall-  
dämmass der Decke.  
Lärmbekämpfung 1968, pag. 34.
- A. Schoch: Der Schalldurchgang durch Platten.  
Acustica 1952, pag. 1.
- A. Schoch: Über ein asymphototisches Verhalten von erzwun-  
genen Plattenschwingungen bei hohen Frequenzen.  
Akustische Zeitschrift 1937, pag. 113.



- E.C. Sewell: Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle.  
Journal of Sound and Vibration, May 1970, pag. 21.
- E.C. Sewell: Two-dimensional Solution for transmission of reverberant sound through a double partition.  
Journal of Sound and Vibration, May 1970, pag. 33.
- E.C. Sewell: Exact solution for transmission of reverberant sound through a circular panel in a waveguide.  
Journal of Sound and Vibration, August 1970, pag. 397.
- W. Westphal: Ausbreitung von Körperschall in Gebäuden.  
Acustica 1957, pag. 335.
- J.J. Williamson and R.K. Mackenzie: Sound Insulation of Lightweight Concrete Build International.  
Juli/august 1971, pag. 244.
- E. Wintergerst: Theorie der Schalldurchlässigkeit von einfachen und zusammengesetzten Wänden.  
Die Schalltechnik Bd. 4, 1931, pag. 85.
- V.I. Zaborov: Sound Insulation of double Walls joined at the Edges.  
Sovjet Physics-Acoustics 1965, pag. 135.
- W. Westphal: Zur Schallabstrahlung einer zu Beigeschwingungen angeregten Wand.  
Acustica 1954, pag. 603.  
DIN 52217, Entwurf März 1970 - Flankenübertragung.