Aalborg Universitet

Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder

Rasmussen, Birgit

Publication date:
1984

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Rasmussen, B. (1984). *Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder*. Danmarks Tekniske Højskole, Lydteknisk Institut. Rapport Nr. 113

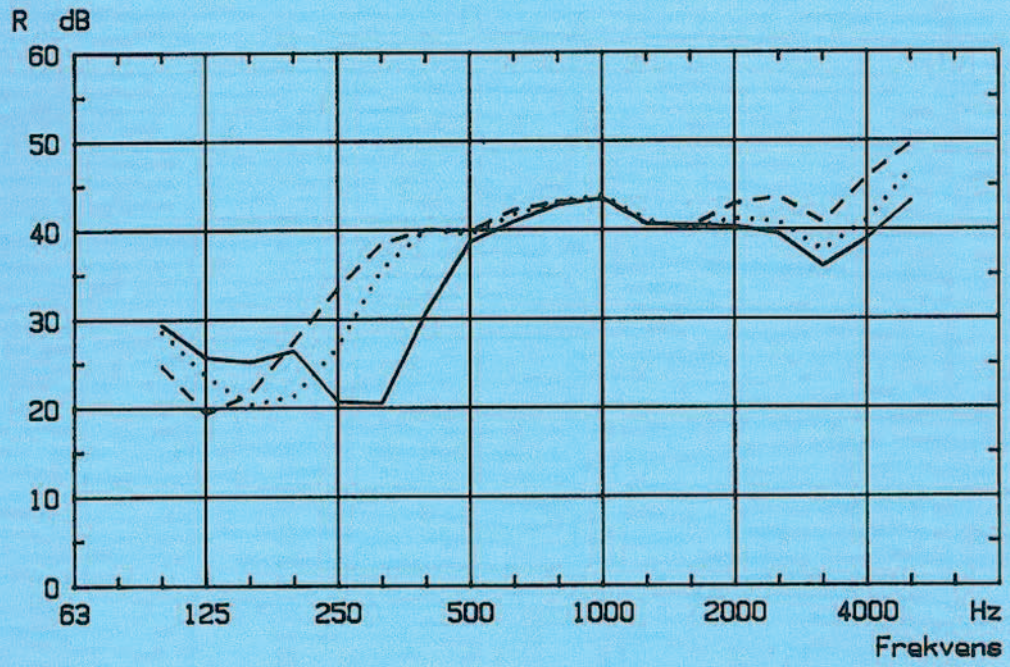
General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from vbn.aau.dk on: May 10, 2024

Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder



Lydteknisk Institut
Rapport nr. 113 1984

Selvejende institution tilknyttet Akademiet for de tekniske Videnskaber

Lydteknisk Institut

Postadresser:
☒ c/o Danmarks tekniske Højskole
Bygning 352
DK-2800 Lyngby
Telefon: 02-88 16 22
Telex: 37529 dth/dia dk
Giro 6 07 91 48
☐ Gregersensvej 3
DK-2630 Tåstrup
Telefon: 02-99 77 55

TEKNISK RAPPORT

Rapport nr. 113	Dato Marts 1984 BR/bm
Rapporttitel Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder	Institutleder A. C. Nilsson
Klient/Rekvirent Teknologistyrelsen	Klientens/Rekvirentens ref. 1982-133/317-82.183
Udført af Birgit Rasmussen	Sign.

Resumé

Rapporten beskriver en eksperimentel undersøgelse af lydisolationen for 2-lags termoruder. Reduktionstallets afhængighed af glastykkelser, laminering, hulrumsdybde (glasafstand) og hulrumsfyldning er undersøgt. Formålet med undersøgelsen er at give vinduesproducenterne bedre muligheder for at vælge en rude med en lydisolation, der er optimeret i forhold til rudens vægt, tykkelse og pris.

Hovedresultaterne af undersøgelsen er følgende (gas benyttes som betegnelse for SF_6):

- Termoruder med forskellige glastykkelser kan have en højere lydisolation end symmetriske ruder med samme eller endog noget større vægt.
- Ændringer i hulrumsdybden (glasafstanden) har en afgørende indflydelse på lydisolationen for gasfyldte ruder, men ikke på luftfyldte ruders lydisolation.
- Gasfyldning i små hulrum (6-9 mm) medfører en forringelse af lydisolationen. Ved hulrumsdybder over 12 mm medfører gasfyldning en forbedring af lydisolationen.

Ved undersøgelsen er benyttet vinduer i størrelsen 12M × 12M. Der er udført målinger på termoruder monteret dels i en fast karm, dels i et oplukkeligt vindue. Ruder monteret i et oplukkeligt, tæt vindue havde i de fleste tilfælde en højere lydisolation end de samme rudetyper i fast karm. Denne effekt afhang af rudetypen og skyldes specielle forhold vedrørende kobling af lydfelterne i vinduesåbningen og termorudens hulrum.

Resultaterne af undersøgelsen viste tydeligt, at en optimering af lydisolationen i forhold til rudens vægt, tykkelse eller pris ofte kan medføre en forbedret lydisolation eller en lavere pris.

Distribution
☐ LI
☒ Fri
☐ Rekvirent

Antal sider 111

Rapporten, incl. eventuelle kurveblade eller tegninger, må kun reproduceres in extenso.
Anden form for offentliggørelse af måleresultater og/eller konklusion fra rapporten kræver skriftlig godkendelse fra instituttet.

INDHOLDSFORTEGNELSE

		Side
	SUMMARY	6
1.	INTRODUKTION	7
	1.1 Projektets baggrund	7
	1.2 Projektets formål	8
	1.3 Afgrænsning af projektfase I	10
2.	VINDUERS YDEEVNE	12
	2.1 Funktionskrav	12
	2.2 Produktdata	13
	2.3 Myndighedskrav	14
3.	MÅLING OG VURDERING AF VINDUERS LYDISOLATION	16
	3.1 Trafikstøj - udendørs og indendørs	16
	3.2 Måling af vinduers reduktionstal	18
	3.3 Lydisolation - vurderingsmetoder	19
	3.4 Principper for valg af vindueskonstruktioner	22
4.	VINDUESKONSTRUKTIONERS LYDISOLATION	25
	4.1 Lydtransmission gennem vindueskonstruktioner	25
	4.2 Reduktionstalskurve for 2-lags termorude	28
	4.3 Beskrivelse af 2-lags termorude	29
	4.4 Resonansfrekvens for 2-lagsrude	31
	4.5 Glastykkelser og koincidens	34
	4.6 Laminering	36
	4.7 Glastykkelser	36
	4.8 Glasafstand (hulrumsdybde)	37
	4.9 Gasfyldning	39
	4.10 Egensvingninger i termorudens hulrum	43
	4.11 Karm/ramme-konstruktioner	44
	4.12 Fugetætninger	48

Side

5. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE 50
5.1 Hovedformål 50
5.2 Påstande om ruders lydisolation 50
5.3 Principper for forsøgsplanlægning 52
5.4 Forsøgsplan 53
5.5 Beskrivelse af termoruder 57
5.6 Beskrivelse af fast karm 59
5.7 Beskrivelse af oplukkeligt vindue 60
5.8 Montage af prøveemner 62
5.9 Målemetode 62
5.10 Beskrivelse af målerum 65
5.11 Måleprocedure 66

6. MÅLERESULTATER 70
6.1 Generelle bemærkninger 70
6.2 Oversigter over resultater 71
6.3 Glastykkelser, symmetriske ruder 75
6.4 Glastykkelser, asymmetriske ruder 78
6.5 Glastykkelsernes betydning - flere resultater ... 78
6.6 Laminering 79
6.7 Glasafstand 83
6.8 Gasfyldning 86
6.9 Gasblandinger 91
6.10 Fast karm / oplukkeligt, tæt vindue 93
6.11 Tætninger i karm/ramme-fuge 99

7. OPTIMERING AF LYDISOLATION 101
7.1 Optimering - definition 101
7.2 Optimering - lydisolation 101
7.3 Optimering af lydisolation i forhold til rudens vægt 102
7.4 Optimering af lydisolation i forhold til rudens tykkelse 103
7.5 Optimering af lydisolation i forhold til prisen . 104

Side

8. KONKLUSION 106

9. REFERENCER 108

SUMMARY

The report describes an experimental investigation of sound insulation for double glazings (sealed units). Influence of glass thicknesses, damping layers, interpane spacing and gas filling are investigated. The aim of the project is to provide better possibilities for choosing of glazing with sound insulation optimized with respect to weight, thickness or price of the glazing.

The majority of the measurements are carried out with the glazings mounted in a firm frame. Some of the measurements are repeated for the same types of glazings mounted in a hinged window. The window size 12M × 12M is chosen, since this size is recommended in the Danish standard for classification of windows [5].

The results of the experimental investigation are as follows (in this context gas is equivalent to SF_6):

- A better sound insulation could be obtained for double glazings with different glass thicknesses than for symmetric glazings with the same or somewhat higher weight.
- Changes in the interpane spacing influences considerably the sound insulation of gas filled glazings, but not air filled glazings.
- A gas filling in small cavities (depths 6-9 mm) decreases the sound insulation. With an interpane spacing more than 12 mm an increase in sound insulation is obtained by gas filling.
- An increased sound insulation is obtained, if one of the glass panes is laminated.

Mounted in an hinged, tight window the double glazings had in nearly all cases a higher sound insulation than the same types of glazings in a firm frame. The influence of this effect was depending on the type of glazing. The phenomenon is due to some special relations concerning the coupling of sound fields in the window opening and the interpane space.

The investigation clearly indicated, that a simple relationship does not exist between the sound insulation and the thickness. Therefore, an increased sound insulation or a reduced price may be the result of an optimizing process leading to an appropriate choice of window type.

1. INTRODUKTION

1.1 Projektets baggrund

I ca. 650.000 boliger i Danmark er der høje støjniveauer som følge af støj fra biler, fly og tog.

Høje støjniveauer indendørs skyldes først og fremmest lydtransmission gennem vinduer og kan ofte mindskes ved en ændring af vindueskonstruktionen. I det nye bygningsreglement, BR-82 [1], er der angivet krav til det indendørs støjniveau i boliger. Både ved projektering af nybyggeri og ved udskiftning af vinduer i eksisterende, hårdt støjbelastet bebyggelse er der således behov for kendskab til vinduers lydisolation.

Et aktuelt eksempel på støjbelastet bebyggelse er boligerne i området omkring lufthavnen i Kastrup. Til lydisolering af disse boliger har myndighederne bevilget ca. 100 mio. kr. Resultatet er en forbedret lydisolation hovedsagelig som følge af de akustiske egenskaber for de monterede vinduer.

Lydisolationen for en vindueskonstruktion afhænger dels af karm/ramme-konstruktionen incl. tætningen af fuger, dels af glaskonstruktionen, som næsten altid i praksis er en termorude.

Termoruders lydisolation er bestemt af en lang række parametre såsom glastykkelser, laminering, glasafstand, og gasfyldning. Det har vist sig, at disse parametre ofte vælges lidt tilfældigt blandt de utallige muligheder, bl.a. fordi der mangler nøjere undersøgelser af de enkelte konstruktionsparametres betydning.

På Lydteknisk Institut er der i de senere år udført et stort antal målinger på mange forskellige vindueskonstruktioner. Da disse målinger er udført som rekvirerede opgaver [2], har det ikke været muligt at udføre systematiske målinger for at kortlægge indflydelsen af de enkelte konstruktionsparametre på lydisolationen. Det har dog været muligt at konstatere, at en mindre konstruktionsændring i nogle tilfælde har en overraskende stor effekt - negativ eller positiv.

For rude- og vinduesproducenter er det vigtigt at kende årsagen til et eventuelt dårligt måleresultat samt at kunne vurdere, om og hvordan en ønsket forbedring kan opnås med minimale omkostninger. Specielt er det af afgørende betydning for en vinduesproducent at vide, om den ønskede forbedring kan opnås ved ændring af glaskonstruktionen eller om karm/ramme-konstruktionen og eventuelt også tætninger skal forbedres.

Set fra vinduesproducentens synspunkt er det som regel ikke særlig attraktivt med indgreb i selve karm/ramme-konstruktionen, der er fastlagt under vidtgående hensyntagen til produktionsteknik og til vinduets funktion og udseende samt ydeevne som klimaskærm. En ændring af ruden er derimod ofte en enkel løsning, selv om rudens konstruktionsparametre ikke kan vælges frit, men må fastlægges inden for visse begrænsninger hidrørende fra den aktuelle vindueskonstruktion. Eksempelvis begrænses rudetykkelsen af glasfalsens dybde, og rudens vægt af rammens og beslagenes bæreevne. Endelig er prisen for en rude næsten altid i praksis en afgørende faktor ved valget af rude.

Ideen til projektet er bl.a. opstået på baggrund af, at der i de senere år har været et stort antal henvendelser vedrørende vinduers lydisolation. Henvendelserne er kommet fra producenter, rådgivende ingeniører, arkitekter, entreprenører og brugere, og der er således konstateret et bredt behov for information om vinduers lydisolation.

En nøjere vurdering af behovet er foretaget ud fra erfaringer fra rekvirerede opgaver vedrørende typeprøvning og produktudvikling udført for bl.a. vinduesproducenter.

1.2 Projektets formål

Formålet med projektet er at give vindues- og rudeproducenter bedre muligheder for at vælge/udvikle ruder med en lydisolation, der er optimeret i forhold til rudens vægt, tykkelse og pris.

En total undersøgelse af vinduers lydisolation omfatter en undersøgelse af både karm/ramme- og glaskonstruktioner. Næsten alle nye vindueskonstruktioner er "almindelige" vinduer (standardprodukter) med termoruder. En forøget lydisolation opnås ved anvendelse af lydisolerende termoruder. Kun i få tilfælde bliver der anvendt separate forsatsvinduer, og for sådanne konstruktioner er det relativt enkelt at opnå en høj lydisolation. Det største behov for mere viden om lydisolerende vinduer dækkes således ved en undersøgelse af vinduer med 2- og 3-lags termoruder.

Vurderet ud fra en helhedsbetragtning skønnes det mest hensigtsmæssigt at opdele det samlede projekt i 3 faser:

1) 2-lags termoruder
2) 3-lags termoruder
3) karm/ramme-konstruktioner

Den foreliggende rapport omhandler undersøgelsen af 2-lags termoruder, som stadigvæk udgør ca. 85% af produktionen af termoruder. Resultaterne fra dette delprojekt danner tillige en god baggrund for undersøgelsen af 3-lagsruder og karm/ramme-konstruktioner.

Ved de eksperimentelle undersøgelser af 2- og 3-lags termoruder vælges der fortrinsvis prøveemner med almindeligt forekommende glastykkelser, glasafstande og gasfyldninger. Selv med disse begrænsninger er der faktisk over 100 forskellige 2-lags termoruder og over 1000 forskellige 3-lags termoruder.

På denne baggrund ses det let, at en beregningsmodel for ruders lydisolation vil være nyttig, bl.a. ved vurdering af en ændring af en rude, da det i praksis er umuligt at måle på alle kombinationer af konstruktionsparametre. Med udgangspunkt i undersøgelsesresultaterne vil det blive forsøgt at udarbejde en sådan beregningsmodel.

Undersøgelsen skulle således give et mere sikkert grundlag for projektering af vinduers lydisolation, specielt for et optimalt valg af termorude til en given vindueskonstruktion.

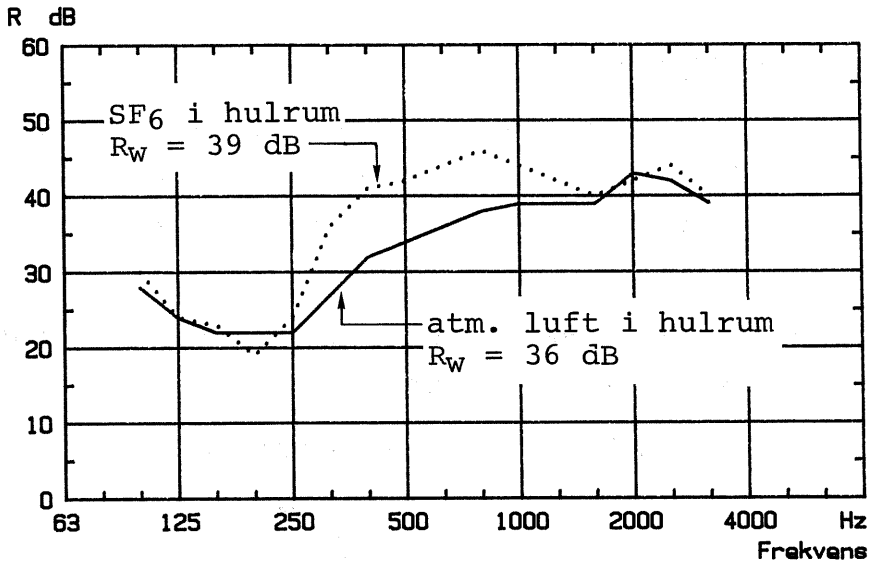
1.3 Afgrænsning af projektfase I

Projektfase I omfatter en eksperimentel undersøgelse af 2-lags termoruder. Undersøgelsen er i princippet generel, men en afgrænsning af projektet har naturligvis været nødvendig af økonomiske grunde.

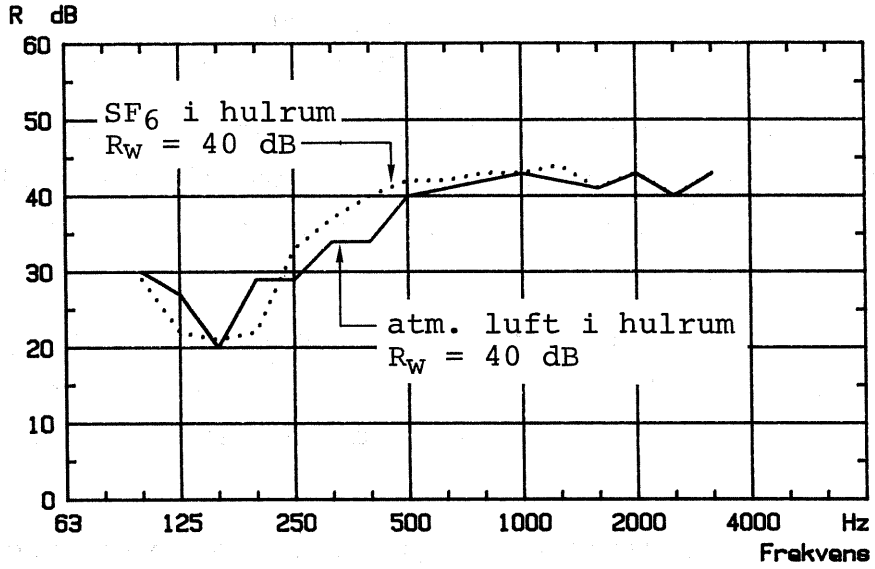
I 1980 blev der udført et pilotforsøg. Herunder blev det klarlagt, at gasfyldning i termoruder i nogle tilfælde medfører en væsentligt forhøjet lydisolation, se figur 1.1, men i andre tilfælde er uden betydning, se figur 1.2. Undersøgelsen af 2-lags ruder er søgt tilrettelagt således, at dette og lignende fænomener kan forklares ud fra undersøgelsesresultaterne.

Ved udfærdigelsen af rapporten er det tilstræbt at undgå unødvendige gentagelser fra instituttets tidligere rapporter om vinduers lydisolation [3] og [4]. Der er i stedet lagt vægt på at supplere på områder, som ligger uden for tidligere projekter, eller på områder, hvor nyere viden foreligger.

Vindues- og rudeproducenter samt brancheorganisationer har vist stor interesse for projektet. Denne interesse er udmøntet i, at prøveemner er leveret vederlagsfrit, og at spørgsmål vedrørende produktionsteknik mv. er blevet besvaret velvilligt. En tak herfor skal specielt rettes til A/S Vip-let vinduer og døre, Dansk Plastplade Værk A/S, Glasalstrup-Thorvald Pedersen A/S, Panolook Glas A/S og Scanglas A/S samt til Vinduesproducenternes Samarbejdsorganisation.



Figur 1.1 Reduktionstal for en lamineret 2-lags termorude 4/4-15-4 indbygget i fast karm. Hulrumsfyldning hhv. luft og gas.



Figur 1.2 Reduktionstal for en lamineret 2-lags termorude 4/4-15-5 indbygget i et tæt, oplukkeligt vindue. Hulrumsfyldning hhv. luft og gas.

2. VINDUERS YDEEVNE

2.1 Funktionskrav

Et vindue udgør en del af en facadekonstruktion og skal udover de krav, der stilles til facaden som klimaskærm, også opfylde behovet for tilstrækkeligt lys indendørs og udsyn til omgivelserne.

Et vindue skal altså på én gang beskytte mod omgivelserne og give kontakt til omgivelserne.

De vigtigste funktionskrav er nævnt herunder. Vinduet skal

GIVE	• Dagslys • Solvarme • Udsyn • Ventilationsmulighed • Flugtmulighed ved brand
BESKYTTE MOD	• Kulde (varme) • Vind • Regn og fugt • Støj fra trafik mv.

For hvert af disse funktionskrav skal der tages hensyn til en række forhold, som har betydning for vinduets udformning. Et færdigt produkt repræsenterer derfor ofte mange års erfaring og udvikling.

Vinduet skal være holdbart, så de nævnte krav også opfyldes, når vinduet ikke længere er nyt. D.v.s. at rude, karm, ramme, hængsler og tætningslister skal fungere efter hensigten også efter nogle års brug.

Producent, bygherre og bruger kan have hver sine interesser, der på nogle punkter kan være modstridende.

I de senere år har produktionskapaciteten hos vindues- og rude-producenter været større end efterspørgslen. Det har medført, at producenterne af konkurrencemæssige grunde søger at undgå selv relativt små meromkostninger, der ikke er strengt nødvendige.

Det er derfor af betydning at kunne optimere en vindueskonstruktion, så meromkostninger, der ikke forbedrer vinduets egenskaber, spares eller anvendes på en måde, der øger ydeevnen.

De tidligere nævnte funktionskrav udmøntes i krav til bl.a.:

- Vinduesareal
- Lysgennemgang
- Varmeisolation
- Vindtæthed
- Regntæthed
- Lydisolation

Herudover er der en række individuelle brugerkrav, som har betydning ved valg af vindueskonstruktion:

- Betjening
- Udseende
- Holdbarhed
- Vedligeholdelse

Ved valget af en rude til en vindueskonstruktion er de afgørende faktorer oftest:

- Totalvægt
- Totaltykkelse
- Pris

2.2 Produktdata

Nogle egenskaber er direkte målelige, og det er meget almindeligt at finde data vedrørende sådanne egenskaber i producenternes kataloger.

Egenskaber som varmeisolation har generel interesse og er et forholdsvis gennemdyrket område, mens interessen for lydisolation er nyere. Som følge heraf findes der ikke så mange erfaringer, og det har ofte været vanskeligt at vurdere konsekvenserne af tilsyneladende små ændringer af en vindueskonstruktion. Ændringerne gennemføres ofte af økonomiske grunde, f.eks. når en rudes tykkelse mindskes, fordi der skal spares på rammetræet. Ændringer kan modsat også medføre meromkostninger og

være indført med den hensigt at forbedre ydeevnen, f.eks. mht. varmeisolation. Et eksempel herpå er gasfyldning af rudens hulrum.

Interessen for at producere lydisolerende vinduer er stor hos såvel vindues- som rudeproducenter, men det er forståeligt, at rudeproducenterne ikke har økonomisk baggrund for at måle lydisolation på blot tilnærmelsesvis alle typer ruder, og at de enkelte vinduesproducenter har brug for en basisviden om ruders lydisolation. En systematisk undersøgelse dækker derfor et generelt behov og muliggør, at rude- og vinduesproducenter ved udvikling af vinduestyper kan vælge en fornuftig kombination af vindue og rude. Udvikling af nye vindueskonstruktioner er krævende både tidsmæssigt og økonomisk. Derfor skal vinduesproducenter ofte vælge den lydmæssigt set bedste løsning, der kan opnås inden for standardprodukternes begrænsninger.

Standardprodukter vil ofte med små indgreb kunne få en noget forbedret lydisolation, mens krav herudover er vanskeligere eller umulige at opfylde. For enhver vindueskonstruktion vil der være en øvre grænse for ydeevne, således at højere krav kun kan opfyldes med mere komplicerede, evt. dobbelte konstruktioner (forsatsvinduer).

Ved udvikling af lydisolerende vinduer er det for de fleste vinduesproducenter ideelt at benytte et standardprodukt som udgangspunkt, da det indebærer store produktionstekniske, økonomiske og tidsmæssige fordele. Også set fra brugerens synspunkt er dette fordelagtigt, da der herved fås et produkt, som på andre områder er vel-gennemprøvet. Det indebærer endvidere, at man i et byggeri kan benytte vinduer, der har forskellig lydisolation men mht. udseende er ens, idet blot de nødvendige detaljer er ændret for at opnå en bedre lydisolation.

2.3 Myndighedskrav

For visse af vinduets egenskaber stilles der direkte eller indirekte krav i bygningsreglementet. Der har således i mange år været krav til størrelsen af brandredningsåbninger og til facaders varmeisolation, mens der først i BR-82 [1] er ind-

ført krav til lydisolationen for facader i trafikstøjbelastede områder ved veje og jernbaner. I enkelte større byer har lokalplanerne dog indeholdt krav til facaders lydisolation.

Det ny-indførte krav i BR-82 er angivet som krav til det indendørs støjniveau, hvilket i princippet er en god metode, da genevirkningen afhænger af støjniveauet. Det er imidlertid vanskeligt at kontrollere, om kravet er overholdt, da en kontrolmåling er tidskrævende og bl.a. forudsætter "normal" trafikintensitet i måletidsrummet. I vejledningen til BR-82 er bygningsreglementets krav derfor omregnet til den nødvendige lydisolationsklasse for vinduer og ydervæg ved forskellige støjniveauer udendørs.

Omregningen til lydisolation er baseret på nogle forudsætninger om vinduesarealet og på generelle erfaringer vedrørende vejtrafikstøj og lydisolation. Når der benyttes vinduer med den angivne, nødvendige lydisolationsklasse, anses kravet til det indendørs niveau for overholdt, og der kræves ikke yderligere dokumentation af lydisolationen.

Vinduers lydisolationsklasse bestemmes i henhold til DS 1084: "Vinduer. Lydisolation. Klassifikation" [5]. Som grundlag for klassificering af vinduet benyttes en laboratoriemåling af vinduets lydisolation. Laboratoriemålingens resultat angives ved vurderingsværdien R_W, som er bestemmende for klassebetegnelsen. R_W-værdien beregnes efter vurderingsmetoden i DS 2186.3-1982 [6].

Da R_W-værdien er afgørende for vinduets danske klassebetegnelse, benyttes denne værdi som et mål for vinduets ydeevne mht. lydisolation.

En nøjere beskrivelse af vurderingsmetoden i DS 2186.3 samt tidligere anvendte metoder findes i afsnit 3, hvor også de mest anvendte udenlandske vurderingsmetoder er omtalt.

3. MÅLING OG VURDERING AF VINDUERS LYDISOLATION

3.1 Trafikstøj - udendørs og indendørs

Høje støjniveauer udendørs kan blandt andet forekomme i nærheden af:

- veje
- jernbaner
- lufthavne

Støjens styrke og frekvenssammensætning afhænger af støjkildens art. Støjens niveau kan variere i løbet af døgnet (f.eks. vejstøj) eller inden for kortere tidsrum (f.eks. flystøj). Ved angivelse af støjniveau må det derfor angives, om niveauet er et "middelniveau" eller et "maksimumniveau" for et kort tidsrum.

Til bygninger beliggende i støjbelastede områder er der brug for lydisolerende facadekonstruktioner.

Støjen i et rum består af støjbidrag transmitteret gennem de enkelte bygningsdele, der afgrænser rummet:

- vinduer og døre
- ydervægge
- tage/lofter
- ventilationsåbninger

Ved en detaljeret bedømmelse af en bygningsdels evne til at reducere støj i et aktuelt tilfælde er det nødvendigt både at have kendskab til støjens frekvensmæssige sammensætning og til bygningsdelens lydisolation som funktion af frekvensen. På grundlag af disse oplysninger kan den aktuelle lydisolation beregnes, når der desuden tages hensyn til bygningsdelens areal og modtagerummets absorberende egenskaber.

Kendskab til de enkelte bygningskomponenters lydisolerende egenskaber kan f.eks. opnås ved en laboratoriemåling af reduktionstallet R som funktion af frekvensen (pr. 1/3 oktav). Reduktionstallet er et mål for bygningsdelens evne til at "reducere" den indfaldende lydeffekt.

Lydisolationen for bygningsdele afhænger af frekvensen og af lydens indfaldsvinkel. Denne afhængighed er forskellig for forskellige typer bygningsdele. Støjen indendørs kan således i forskellige frekvensområder være bestemt af forskellige bygningsdele.

Reduktionstallet er en materialeegenskab (egentlig konstruktionsegenskab), men den faktiske lydtransmission og dermed støjen indendørs afhænger af facadens aktuelle areal. Reduktionstallet kan derfor ikke umiddelbart benyttes som et mål for den subjektivt oplevede lydisolation, der i stedet må beskrives ved forskellen mellem to "niveauer", der repræsenterer støjens genevirkning ude og inde.

Som mål for støjs genevirkning benyttes normalt energiækvivalente, A-vægtede lydtrykniveauer, jvf. f.eks. [1], [7] og [8].

For vejtrafikstøj foreligger en beregningsmodel [9], som kan benyttes til beregning af A-vægtede niveauer på døgnbasis ($L_{Aeq,24h}$ udendørs) eller på timebasis, når der foreligger data vedrørende trafikforholdene. Der findes endnu ikke en tilsvarende beregningsmetode for jernbaner.*

Ved bedømmelse af støjbelastning fra flytrafik har man i Danmark siden 1976 anvendt DENL metoden. DENL er den amerikanske forkortelse for Day-Evening-Night Level. Den beregnede støjbelastning udtrykt ved bogstavsymbolet L_{DEN} er et 24 timers energiækvivalent A-vægtet lydtrykniveau med en vægtning af støjen afhængig af tidspunktet på døgnet (støjniveau for flyoperationer om aftenen og natten korrigeres med hhv. +5 dB og +10 dB). En detaljeret beskrivelse af beregningsmetoden findes i [10].

Bygninger i støjbelastede områder skal projekteres således, at der fås tilfredsstillende forhold indendørs. Såfremt der foreligger oplysninger om niveau og frekvenssammensætning for støjen udendørs samt om facadens reduktionstal, kan der foretages en beregning af støjniveauet indendørs. Reduktionstallet for en sammensat konstruktion kan beregnes ud fra kendskabet til hver konstruktionsdel, se afsnit 3.4. I mange tilfælde er vinduernes reduktionstal og areal afgørende for støjniveauet indendørs.

*En beregningsmetode forventes publiceret af Miljøstyrelsen ultimo 1984.

3.2 Måling af vinduers reduktionstal

Reduktionstallet defineres som forholdet i decibel mellem den indfaldende lydeffekt, der rammer prøveemnet, og den transmitterede lydeffekt, der udstråles fra prøveemnets anden side.

Ved laboratoriemåling af reduktionstallet efter den internationalt standardiserede metode [11] placeres prøveemnet mellem et senderum og et modtagerum, og reduktionstallet bestemmes efter nedenstående formeludtryk, der forudsætter, at lydfelterne i rummene er diffuse.

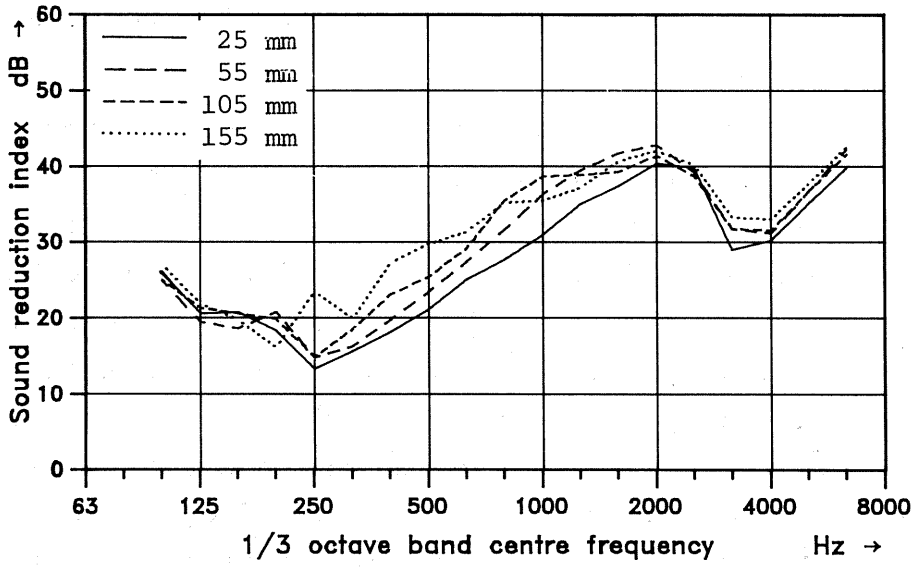
$$R = L_S - L_M + 10 \log_{10}(S/A_M) \qquad (3.1)$$

hvor R = Prøveemnets reduktionstal
L_S = Lydtrykniveau i senderum
L_M = Lydtrykniveau i modtagerum
S = Prøveemnets areal
A_M = Ækvivalent absorptionsareal i modtagerum

Laboratoriemåling af reduktionstal er nøjere beskrevet i afsnit 5.9. Ved beregning af reduktionstallet for en vindueskonstruktion benyttes arealet af den frie vinduesåbning. Dette skyldes, at fugen omkring vinduet kan have betydning for reduktionstallet. Ved montagen i laboratoriet skal producentens monteringsforskrift følges.

Prøvning af vindueskonstruktioner giver således ikke anledning til principielle problemer. Ved prøvning af ruder alene savnes derimod en standardiseret monteringsform. I de nordiske lande benyttes en fast karm til en "neutral" måling af en rude. Det har den fordel, at montagen af ruden kan udføres med almindeligt anvendte monteringsmaterialer. Måling af ruders reduktionstal behandles p.t. i en international arbejdsgruppe. Fra visse sider ønskes det, at ruder ikke skal monteres i karm, men udfylde hele måleåbningen. Umiddelbart vurderet kan det også lyde som den mest neutrale montage. Ingen monteringsform er imidlertid neutral. På figur 3.1 er vist reduktionstalskurver for samme

rudetype monteret uden karm samt i "karm" med 3 forskellige bredder [4]. Der ses en markant forskel på resultaterne, og det laveste måleresultat fås for en rude med samme dimensioner som måleåbningen, hvilket ikke anvendes i praksis.



Figur 3.1 Reduktionstal for en 4-12-4 rude med varierende karmbredde. Efter [4].

Ønsket må være en standardiseret metode, hvor måleresultaterne ikke er signifikant lavere eller højere end resultaterne for samme rudetype monteret i almindelige vindueskonstruktioner. I afsnit 4.10 og 6.10 er problemet omtalt nærmere.

3.3 Lydisolation - vurderingsmetoder

Når en bygningsdels lydisolerende evne ønskes karakteriseret ved et enkelt tal, benyttes almindeligvis R_w-værdien, der beregnes på grundlag af reduktionstallet målt pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz. R_w betegnes "vægtet reduktionstal" og bestemmes for facadedele efter metoden i DS 2186.3-1982 [6]. Denne vurderingsmetode er identisk med metoden i ISO 717/3-1982(E) [12].

Tidligere anvendtes I_a-værdien bestemt efter ISO/R 717-1968(E) [13] (dog svarende til det aktuelle prøveareal, uanset at det-

te er mindre end 10 m^2). Da vurderingsværdien R_w endnu er relativt ny, ses I_a-værdien stadig i megen litteratur.

R_w-værdien er for de fleste bygningskonstruktioner identisk med I_a-værdien, men kan dog være større. Forskellene er normalt højst 2-3 dB, men for visse rudetyper fås noget større forskelle.

Ved bestemmelse af vurderingsværdierne I_a og R_w sammenlignes de målte værdier af reduktionstallet pr. 1/3 oktav fra 100 Hz til 3150 Hz med en vurderingskurve, der fra 100 Hz til 400 Hz stiger med 3 dB pr. 1/3 oktav og fra 400 Hz til 1250 Hz med 1 dB pr. 1/3 oktav, hvorefter den antager en konstant værdi. Vurderingskurvens værdier ved 1/3 oktav centerfrekvenserne er hele tal. En ugunstig afvigelse indtræffer ved en bestemt frekvens, når måleresultatet er mindre end vurderingskurvens værdi. Gennemsnittet af de ugunstige afvigelser udregnes ved at dividere summen af disse afvigelser med antallet af målefrekvenser. Ved forskydning af vurderingskurven efter nedenstående retningslinier findes vurderingsværdien, der aflæses på den forskudte vurderingskurve som værdien i dB ved 500 Hz.

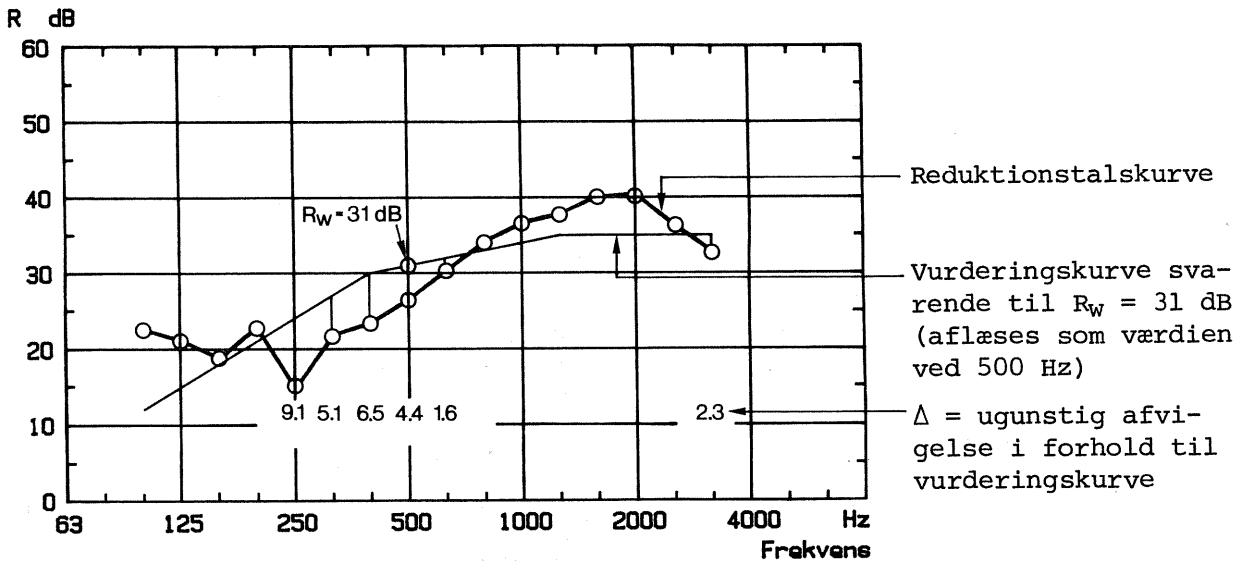
I_a-værdien findes ved at forskyde vurderingskurven trinvis 1 dB til den højeste placering, der tilfredsstiller det strengeste af følgende krav:

a) Gennemsnittet af de ugunstige afvigelser er så stort som muligt, men ikke større end 2,0 dB.

b) Gennemsnittet af de ugunstige afvigelser er mindre end 2,0 dB samtidigt med, at ingen enkeltafvigelser er større end 8,0 dB.

Ved bestemmelse af R_w-værdien forskydes vurderingskurven trinvis 1 dB, indtil kravet a) er opfyldt. Den maksimale ugunstige afvigelse skal anføres, såfremt den overstiger 8,0 dB.

Et eksempel på beregning af R_w- og I_a-værdi er vist på figur 3.2.



Figur 3.2 Bestemmelse af R_w- og I_a-værdi på grundlag af en laboratoriemåling af reduktionstal pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz.
R_w = 31 dB, Δ_{max} = 9,1 dB ($\bar{\Delta} = \frac{29}{16}$ dB = 1,8 dB)
$I_{a,lab}$ = 29 dB

For tydeligt at indikere, at I_a-værdien er bestemt på grundlag af en måling i et laboratorium, benyttes skrivemåden $I_{a,lab}$. Årsagen hertil er, at den i [13] beskrevne metode til bestemmelse af I_a-værdien forudsætter, at målingerne er udført i bygninger, hvor lydtransmission ad andre veje end gennem prøveemnet må påregnes.

I Tyskland benyttes også begrebet R_w, men vurderingsmetoden er ikke helt identisk med metoden i DS 2186.3-1982. Eventuelle ugunstige afvigelser ved 100 Hz og 3150 Hz medregnes kun med den halve værdi, og ved beregningen af middelafvigelsen divideres til gengæld kun med 15. Middelværdien af de ugunstige afvigelser må højst blive 2,0 dB. Der er ingen krav til de enkelte afvigelsers størrelse. Det tyske R_w kaldes "Bewertetes Schalldämm - Mass" og bestemmes efter DIN 52210 Teil 04 1975 [14].

Enkelte lande har også vurderingsmetoder, hvor der som grundlag for vurderingen af vinduer og andre facadedele benyttes et standardiseret spektrum for vejtrafikstøj. Sådanne metoder findes blandt andet i Frankrig [15] og Norge [16].

Som klassificeringsgrundlag for vinduer benyttes i Danmark R_w-værdien bestemt efter [6]. Klassebetegnelsen findes i DS 1084-1982 [5]. I tabel 3.1 findes en oversigt over de danske klassebetegnelser.

Luftlydisolation R_w	Klassebetegnelse
$R_w \geqslant 27$ dB	25 dB-vindue
$R_w \geqslant 33$ dB	30 dB-vindue
$R_w \geqslant 38$ dB	35 dB-vindue
$R_w \geqslant 43$ dB	40 dB-vindue
$R_w \geqslant 48$ dB	45 dB-vindue
$R_w \geqslant 53$ dB	50 dB-vindue

Tabel 3.1 Klassebetegnelse for vinduer i henhold til DS 1084-1982.

I Norge findes de samme klassebetegnelser og minimumskrav, men der benyttes i stedet I_a-værdier bestemt efter [12] som klassificeringsgrundlag [17]. Klassebetegnelsen for en vindueskonstruktion er således ikke nødvendigvis ens i Danmark og Norge. I Sverige findes endnu ikke standarder vedrørende klassificering af vinduer.

3.4 Principper for valg af vindueskonstruktioner

Når kravet til en facades lydisolation eller til støjniveau indendørs er fastlagt, må der foretages en detailprojektering af facadevæg og vindue.

I bygningsreglementet BR-82 er der krav om, at $L_{Aeq,24h}$ indendørs ikke må overstige 30 dB i boliger belastet af trafikstøj fra veje og jernbaner. Svarende til forskellige udendørs støjniveauer er der i en tabel i BR-82 angivet den nødvendige lydisolationsklasse for vinduer og ydervægge. Forudsætningerne for, at tabelværdierne kan anvendes, er nøjere beskrevet i [18], hvor der også er angivet vejledende værdier for tilfredsstillende indendørs niveauer i sygehuse, skoler og kontorer.

Anvisningerne i BR-82 er baseret på nedenstående tilnærmede sammenhæng mellem en facades R_W-værdi og støjniveauet (fra vejtrafik) ude og inde. Der er forudsat "typiske" rum i boliger, skoler eller kontorer:

$$R_W \text{ (facade)} \geqq L_{Aeq,ude} - L_{Aeq,inde} + 4 \text{ dB} \qquad (3.2)$$

Uden forudsætningen om "typiske" rum fås i stedet følgende tilnærmede udtryk:

$$R_W \text{ (facade)} \geqq L_{Aeq,ude} - L_{Aeq,inde} + 10 \log \frac{S}{A_M} + 5 \text{ dB} \qquad (3.3)$$

hvor $L_{Aeq,ude}$ = energiækvivalent, A-vægtet lydtrykniveau målt 2 m foran facaden

$L_{Aeq,inde}$ = energiækvivalent, A-vægtet lydtrykniveau målt i modtagerum

S = facadens areal

A_M = modtagerummets ækvivalente absorptionsareal

I formlerne (3.2) og (3.3) indgår facadens R_W-værdi, men i øvrigt ikke mere specificerede oplysninger vedrørende facadens lydisolation og spektret for vejtrafikstøjen. I [19] er beskrevet en beregningsmetode, hvor der benyttes korrektioner for formen af facadens reduktionstalskurve og af vejtrafikstøjens spektrum.

Reduktionstal for en sammensat facadekonstruktion (n konstruktionsdele) kan beregnes ud fra kendskabet til de enkelte konstruktionsdele:

$$R_{facade} = 10 \log \frac{\sum_{j=1}^{n} S_j}{\sum_{j=1}^{n} S_j \cdot 10^{-R_j/10}} \qquad (3.4)$$

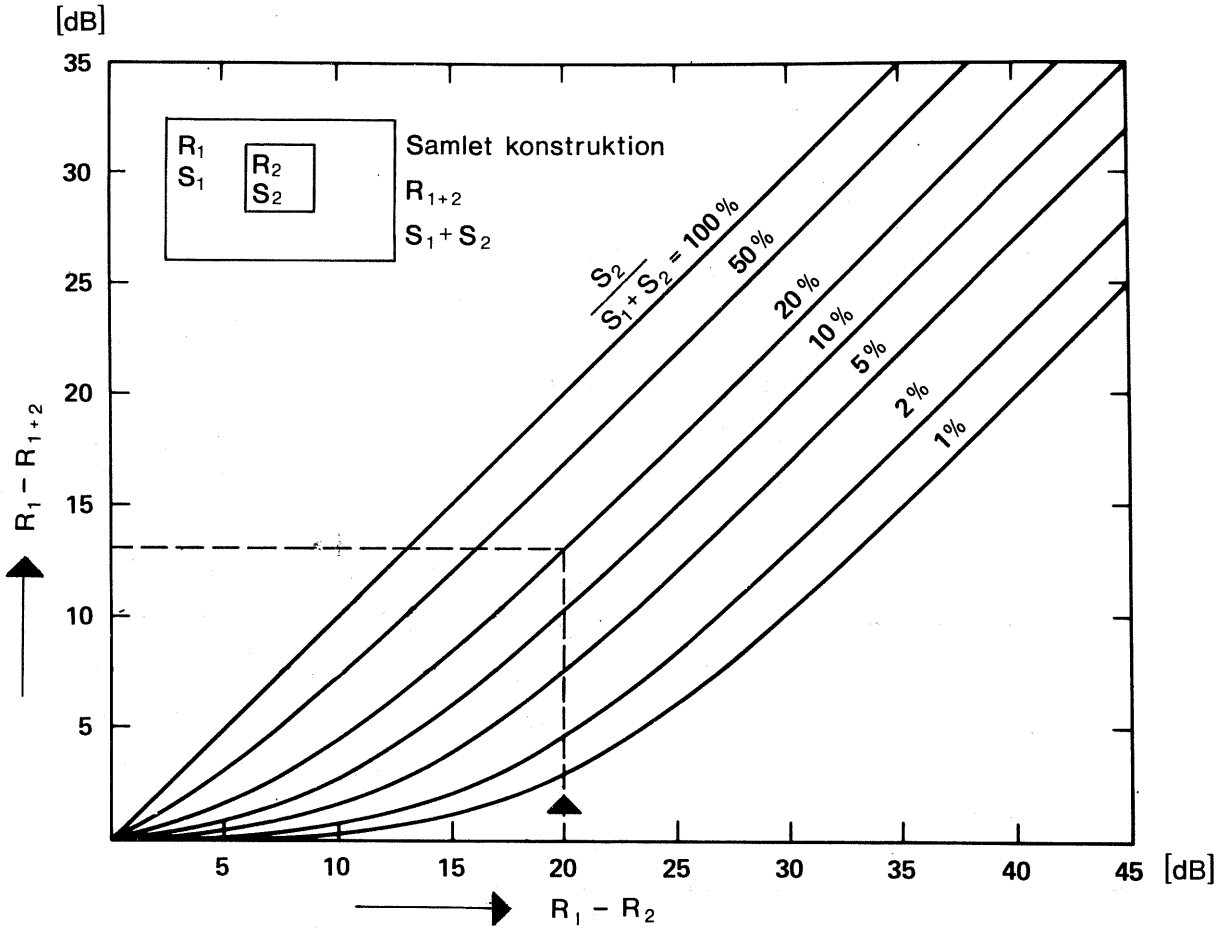
R_{facade} = resulterende reduktionstal for den sammensatte konstruktion [dB]

R_j = reduktionstal for konstruktionstal nr. j [dB]

S_j = areal af konstruktionsdel nr. j [m^2]

For en konstruktion sammensat af to dele kan reduktionstallet R_{1+2} findes ved hjælp af et nomogram, se figur 3.3. Det højeste

reduktionstal betegnes R_1 og det laveste R_2. På grundlag af forskellen $R_1 - R_2$ og arealforholdet $\frac{S_2}{S_1 + S_2}$ bestemmes $R_1 - R_{1+2}$, hvorefter R_{1+2} kan findes. $R_1 - R_{1+2}$ angiver, hvor meget den dårligste konstruktionsdel forringer reduktionstallet.



Figur 3.3 Nomogram til bestemmelse af reduktionstal for en sammensat konstruktion. For en facade med R_1 = 50 dB og $S_1 + S_2$ = 10 m^2 vil et vindue med R_2 = 30 dB og S_2 = 2 m^2 eksempelvis reducere facadens lydisolation med 13 dB, dvs. til R_{1+2} = 50 - 13 = 37 dB.

Formel (3.4) og nomogrammet kan også anvendes ved en tilnærmet beregning af R_w-værdien (defineret i afsnit 3.3) for en sammensat konstruktion, når R_w-værdien for de enkelte bygningskomponenter kendes.

4. VINDUESKONSTRUKTIONERS LYDISOLATION

4.1 Lydtransmission gennem vindueskonstruktioner

Lydisolationen for en vindueskonstruktion afhænger af lydisolationen for de enkelte konstruktionsdele:

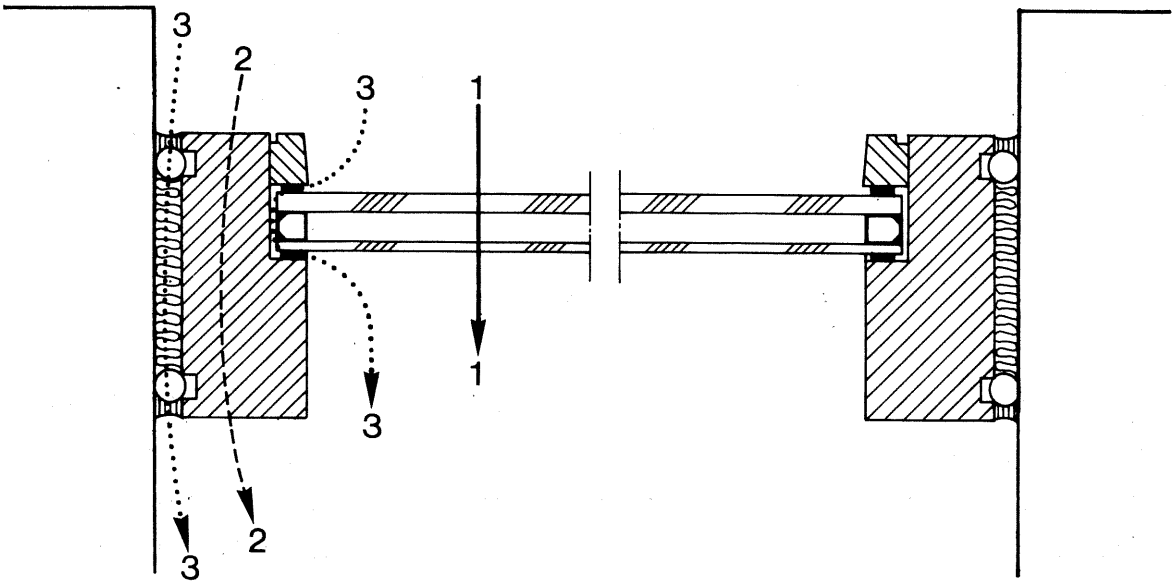
- RUDE
- KARM/RAMME
- FUGER

Set fra et brugersynspunkt er det naturligvis lydisolationen for den samlede konstruktion, der har betydning. Den resulterende lydisolation er ofte bestemt af en enkelt af ovennævnte konstruktionsdele. Det medfører, at en forbedring af vinduet kun kan opnås ved foranstaltninger, der mindsker lydtransmissionen via den pågældende konstruktionsdel, mens andre foranstaltninger ikke ændrer lydisolationen nævneværdigt.

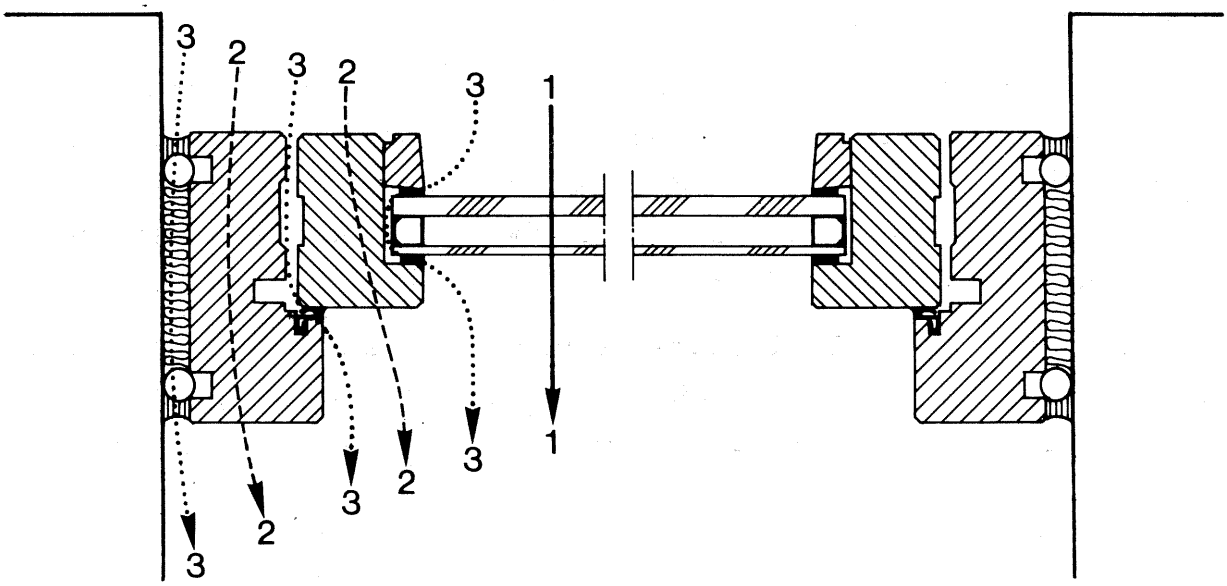
På figur 4.1 og 4.2 er illustreret lydtransmissionsveje gennem vindueskonstruktioner.

Det skal tilføjes, at en eventuelt dominerende lydtransmissionsvej som regel ikke er den samme ved alle frekvenser. En forbedring af et vindues lydisolation sker ofte gradvist ved, at først én konstruktionsdel (eksempelvis rude) og siden en anden konstruktionsdel (f.eks. karm/ramme-fuge) forbedres osv.

Projektering af en lydisolerende vindueskonstruktion forudsætter et vist kendskab til betydningen af de enkelte konstruktionsdele. Jo højere lydisolation, der ønskes, jo mere nødvendig er denne viden.



Figur 4.1 Termorude monteret i en fast karm. Lydtransmissionsveje.



Figur 4.2 Termorude monteret i et oplukkeligt vindue. Lydtransmissionsveje.

Signaturer for lydtransmissionsveje:

1 ——→ 1 Rude

2 - - - → 2 Karm/ramme

3 ·····→ 3 Fuger

Et vindues lydisolation afhænger hovedsageligt af følgende konstruktionsdetaljer:

- RUDE
  - Glastykkelser
  - Glasafstand (hulrumsdybde)
  - Gasfyldning
  - Laminering
  - Randforbindelse (via afstandsprofil)
  - Rudens bredde og højde
  - Rudedimensioner i forhold til total vinduesåbning
- KARM/RAMME
  - Materiale og udformning
  - Tykkelse
  - Bredde
- FUGER
  - Dybde og geometri
  - Antal tætningsplaner, placering og effektivitet

I de efterfølgende afsnit er de nævnte konstruktionsparametre og deres betydning beskrevet mere udførligt. Hovedvægten vil blive lagt på forhold, der har vist sig praktisk anvendelige. Redegørelser for teoretiske modeller vil blive udeladt, da de eksisterende modeller ikke er tilstrækkeligt brugbare for vinduer.

Det ville naturligvis være ideelt med en beregningsmodel, som kunne benyttes til beregning af et vindues lydisolation ud fra kendskabet til konstruktionsdetaljer. En brugbar model eksisterer imidlertid ikke og er heller ikke fuldt ud realiserbar. Et stort behov vil dog kunne dækkes af en model, hvor data for termorude indgår og evt. også data for karm/ramme. Indflydelse fra fugerne vil være sværere at indregne. Tætte fuger har for de fleste vinduestyper ringe betydning for lydisolationen, og utætte fuger er utilsigtede og derfor ikke særlig veldefinerede.

4.2 Reduktionstalskurve for 2-lags termorude

En 2-lags termorude er i princippet forholdsvis simpel i sin opbygning. Konstruktivt kan dobbeltruder betragtes som dobbeltvægge, for hvilke der findes adskillige beregningsmodeller beskrevet i litteratur og artikler.

De teoretiske modeller for dobbeltkonstruktioners reduktionstal er imidlertid ikke i særlig høj grad anvendelige for beregning af termoruders reduktionstal. Det skyldes dels nogle konstruktive forhold, dels de specielle størrelsesforhold sammenlignet med andre bygningskonstruktioner, f.eks. vægge.

Ud fra en akustisk betragtning er vinduer "små" prøveemner, fordi vinduets bredde og højde er sammenlignelige med lydbølgelængden i en meget betydningsfuld del af frekvensområdet 100-3150 Hz. Dette forhold er mere udpræget for vinduer end for de fleste andre bygningsdele. Ved 100 Hz er lydbølgelængden større end vinduets dimensioner, ved 3150 Hz mindre. Specielt for termoruder er også, at hulrummet (glasafstanden) er lille (typisk 6-16 mm), og at det ikke er udfyldt med mineraluld.

Af de nævnte grunde er det karakteristisk for termoruder, at flere former for resonanser falder inden for det betragtede frekvensområde.

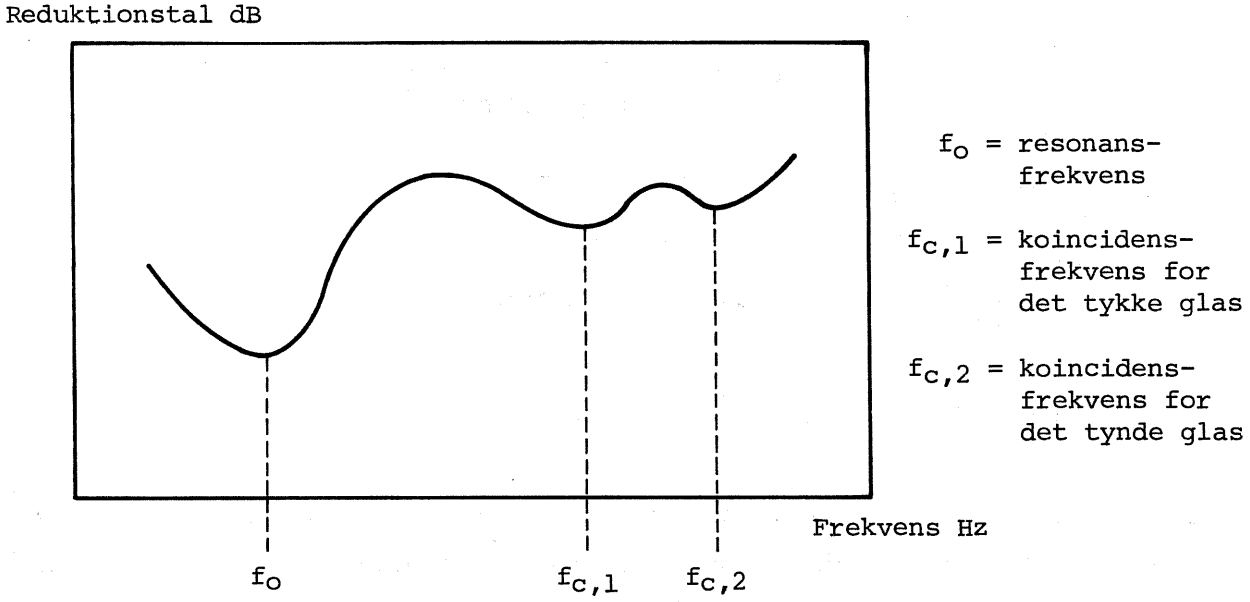
For typiske lydruder er der dominerende resonanser i følgende frekvensområder:

1)	Rudens resonansfrekvens	160- 315 Hz
2)	Egensvingninger i rudens hulrum (parallelt med glassene)	200- 800 Hz
3)	Koincidens i det tykke glas	1250-2000 Hz
4)	Koincidens i det tynde glas	2500-4000 Hz

Disse resonanser viser sig i den målte reduktionstalskurve som dyk, dvs. "svage områder" i forhold til en jævn kurve.

Netop i resonansområder er det vanskeligt at opstille tilstrækkeligt gode teoretiske modeller. Som det ses af ovenstående oversigt, er det alt i alt problematisk for termoruder, når lydisolationen oven i købet afhænger af rudens og vinduesåbningens dimensioner.

Det principielle forløb af en reduktionskurve er vist på figur 4.3. Det viste forløb af kurven mellem frekvenserne f_o og $f_{c,1}$ gælder for gasfyldte ruder. Luftfyldte ruder har et noget fladere forløb, se f.eks. figur 6.16.



Figur 4.3 Principielt forløb af reduktionstalskurve for 2-lags termorude med forskellige glastykkelser

4.3 Beskrivelse af 2-lags termorude

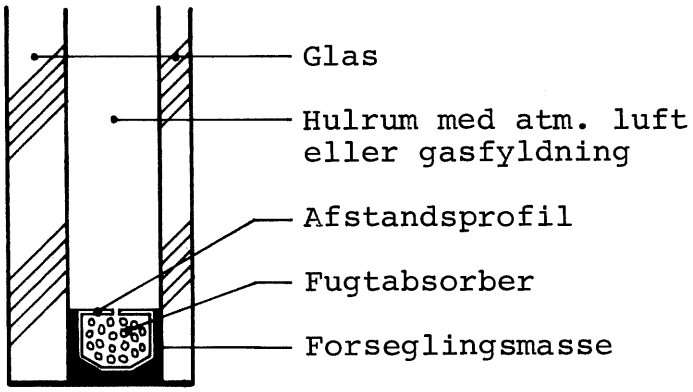
En 2-lags termorude består af 2 lag glas adskilt af et forseglet hulrum.

Termoruder blev fremstillet første gang for ca. 40 år siden. Der findes 3 forskellige typer termoruder: loddede, helsvejsede og klæbede ruder.

Helsvejsede ruder består udelukkende af glas. Langs rudens kanter er glaskanterne bøjet ind og sammensmeltet. I loddede ruder er glaslagene adskilt af et tinprofil, der er fastloddet på glassene.

Langt den største andel af termorudeproduktionen er klæbede ruder. En principskitse af en klæbet rude er vist på figur 4.4.

Glaslagene er adskilt af et afstandsprofil af aluminium eller galvaniseret stål. Afstandsprofilet er forsænket 2-4 mm fra rudekanten og dækket af forseglingsmasse (thiokol eller lign.).



Figur 4.4 Termorudes opbygning

Dobbeltforseglede ruder har tillige et tyndt lag forseglingsmasse (som regel butyl) mellem afstandsprofil og glas. Afstandsprofilet er fyldt med fugtabsorberende materiale, som dels skal optage den fugtighed, der i luften under produktionen af ruden, dels den fugt, der senere trænger ind i hulrummet på grund af klimaets påvirkninger.

En eventuel gasfyldning af termoruden sker først efter, at alle øvrige arbejdsprocesser er udført. Hvis en rude skal gasfyldes, er afstandsprofilet forsynet med små huller foroven og forneden. Ruden gasfyldes langsomt fra bunden og luften undslipper foroven. Med en velegnet fyldningsprocedure er fyldningsgraden ca. 95%. Efter påfyldningen lukkes påfyldnings- og udluftningshullerne med forseglingsmasse.

Termoruder blev oprindelig produceret for at erstatte enkeltglas samt dobbelte glaslag monteret i koblede rammer. Termoruder har en væsentligt højere varmeisolation end enkeltglas. Sammenlignet med dobbelte glaslag har almindelige termoruder ikke højere varmeisolation. Fordelen er her billigere rammekonstruktion og lettere pudsning.

Termoruder er ikke lagervarer hos rudeproducenterne, men fremstilles efter en ordre, hvori rudens opbygning specificeres. Nedenstående er angivet valgmuligheder for glastykkelser, glasafstand (hulrumsdybde) og fyldning. Hvis der anvendes laminater, kan andre glastykkelser end de nævnte forekomme. Lamineringsmaterialer og -tykkelser er omtalt i afsnit 4.6.

Glastykkelser:	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 mm
Glasafstand:	(4), 6, 9, 12, 16, 20 og (24) mm
Fyldning:	Atm.luft, Argon, SF_6 samt blandinger

Hulrumsdybder på 4 og 24 mm er ikke almindelige af bl.a. produktionstekniske grunde. Termoruder med en glasafstand på mere end ca. 20 mm kan have en lidt ringere holdbarhed end ruder med en mindre glasafstand. Dette skyldes, at temperatursvingninger medfører skiftende over- og undertryk i hulrummet, og at de efterfølgende vinkelbevægelser af glaskanterne er størst for store hulrum, hvorved ruden ældes hurtigere.

I den foreliggende rapport er der ved angivelse af en termorudes opbygning benyttet følgende terminologi (mål i mm):

glastykkelse - glasafstand - glastykkelse

Eksempelvis består en 8-12-4 rude af 8 mm og 4 mm glas, og afstanden mellem glassene er 12 mm.

Ved beskrivelse af laminater angives tykkelserne af de glaslag og lamineringsmaterialer, laminatet består af (mål i mm):

glastykkelse/lam. mat. tykkelse/glastykkelse

4.4 Resonansfrekvens for 2-lagsrude

Anvendelse af en termorude i stedet for et eller to enkeltglas medfører ikke automatisk en bedre lydisolation. Tværtimod fås der i nogle tilfælde en forringet lydisolation. Dette skyldes, at termorudens hulrum virker som en fjeder. Som følge heraf vil der optræde resonans og dermed forringet lydisolation i et vist frekvensområde.

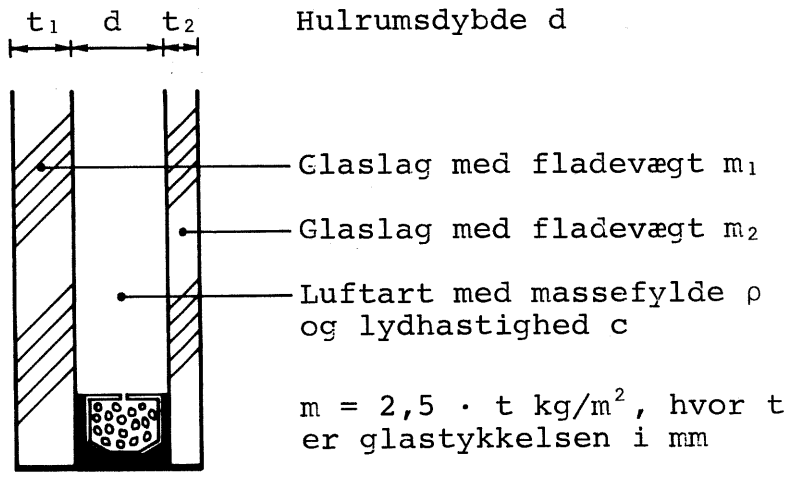
Rudens resonansfrekvens afhænger af glassenes vægt pr. m^2 og af hulrummets stivhed. Jo tykkere glas og større hulrum, der anvendes, jo lavere ligger resonansfrekvensen.

Resonansfrekvensen for en 2-lagsrude er ved vinkelret lydindfald:

$$f_o \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{\rho c^2}{d}} \qquad (4.1)$$

hvor f_o = resonansfrekvens for 2-lagsrude [Hz]
m_1 = masse pr. arealenhed af det ene glas [kg/m^2]
m_2 = masse pr. arealenhed af det andet glas [kg/m^2]
d = hulrumsdybde [m]
ρ = massefylde for luftarten i hulrummet [kg/m^3]
c = lydhastighed for luftarten i hulrummet [m/s]

Størrelsen af ρ og c afhænger meget af luftarten i hulrummet. Produktet $\rho \cdot c^2$, som indgår i formlen for resonansfrekvensen, varierer imidlertid kun lidt. I afsnit 4.9, hvor gasfyldninger er omtalt, findes ρ, c, ρc^2 m.m. i tabelform.



Figur 4.5 Illustration af glastykkelser og hulrumsdybde (glasafstand) for 2-lags termorude

Med talværdier for atm. luft indsat kan formel 4.1 omskrives til:

$$f_o \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{1}{d}} \qquad (4.2)$$

hvor f_o = resonansfrekvens for 2-lagsrude med atm. luft i hulrum [Hz]

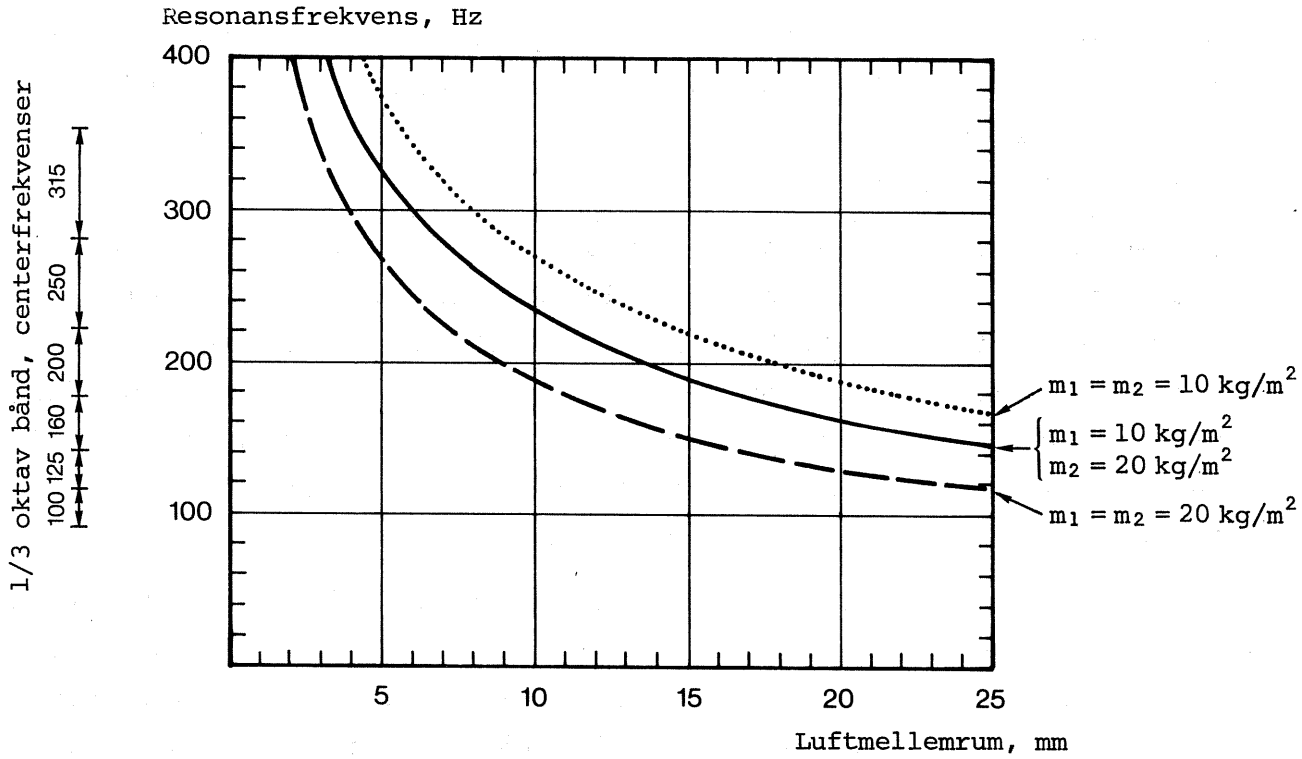
m_1 = masse pr. arealenhed af det ene glaslag [kg/m²]

m_2 = masse pr. arealenhed af det andet glaslag [kg/m²]

d = hulrumsdybde [m]

Massefylden for glas er 2500 kg/m³. Eksempelvis er fladevægten for 4 mm glas 10 kg/m² og for 8 mm glas 20 kg/m².

Nogle eksempler på resonansfrekvensens afhængighed af glasmasser og hulrumsdybder er vist på figur 4.6. Kurverne gælder termoruder med atm. luft, men kan også benyttes for gasfyldte ruder, da afvigelserne normalt højst er 15% (jvf. formel (4.1) og tabel 4.1).



Figur 4.6 Resonansfrekvens for 2-lags rude som funktion af luftmellemrummets størrelse

Inden for bygningsakustikken tilstræbes det næsten altid at anvende konstruktioner med en resonansfrekvens, der er noget lavere end 100 Hz og helst under 50 Hz. For væg- og gulvkonstruktioner er det ofte muligt. Sammenlignet med disse konstruktioner har termoruder imidlertid små hulrum. Resonansfrekvensen for termoruder ligger normalt i frekvensområdet 160-315 Hz. Det er dog vigtigt at bemærke sig, at lydisolationen for en rude ikke nødvendigvis bliver bedre jo lavere resonansfrekvensen ligger i frekvensområdet. Resonansdykkets dybde i reduktionstalskurven har også stor betydning for lydisolationen. Dybden af dette dyk afhænger bl.a. af glasmasser, hulrumsdybde, luftart i hulrum og vinduets størrelse. Nogle af disse forhold vil blive behandlet senere i rapporten.

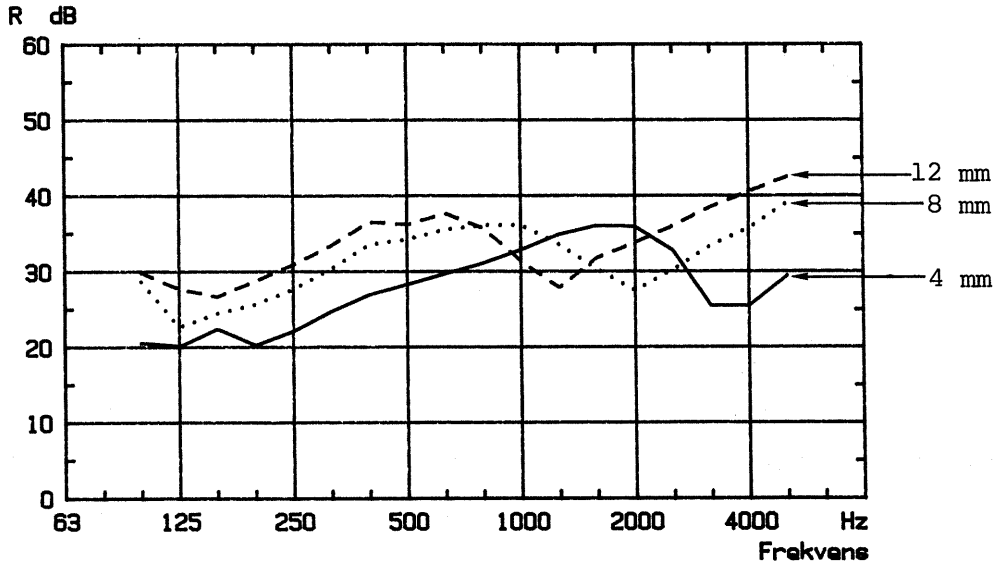
4.5 Glastykkelser og koincidens

Reduktionstallet for et massivt glas vokser med massen, dvs. med glastykkelsen. En fordobling af massen giver ca. 6 dB højere reduktionstal. Dette gælder dog kun i frekvensområdet op til ca. 1000 Hz. I en del af frekvensområdet over ca. 1000 Hz fås en forringelse af reduktionstallet som følge af et fænomen, der kaldes koincidens.

Når en lydbølge rammer glasset, påtrykkes glasset en tvungen bølgebevægelse med en bølgelængde, der afhænger af lydbølgens frekvens og indfaldsvinkel. Hvis bølgelængden for den tvungne bøjningsbølge er den samme som bølgelængden for en såkaldt "fri" bøjningsbølge ved samme frekvens, er der koincidens (sammenfald). Det betyder, at glasset særlig nemt sættes i svingninger af lydbølgen, og at der er stor lydgennemgang.

Den laveste frekvens, hvor der er koincidens, hedder den kritiske frekvens eller grænsefrekvensen for koincidens, men kaldes blot koincidensfrekvensen. Forringelsen af glassets reduktionstal sker i et frekvensområde på 1-2 oktaver omkring koincidensfrekvensen, der betegnes f_c.

Reduktionstalskurvers principielle forløb for massive glas er illustreret på figur 4.7, hvor nogle måleresultater for 4 mm, 8 mm og 12 mm glas er vist. Glassene var monteret i en fast karm (monteringsmaterialer beskrevet i afsnit 5.8).



Figur 4.7 Målt reduktionstal for 4, 8 og 12 mm glas

Koincidensfrekvensen for et bygningsmateriale afhænger af lydhastigheden i den omgivende luft og af forholdet mellem bygningsmaterialets masse (fladevægt) og bøjningsstivhed.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{B}} \qquad (4.3)$$

hvor f_c = koincidensfrekvens
c = lydhastighed i luft
m = masse pr. arealenhed
B = bøjningsstivhed pr. breddeenhed

For et homogent materiale kan denne formel omskrives, så der kun indgår en materialekonstant samt materialetykkelsen.

I formel 4.3 indsættes:

$$m = \rho \cdot t \text{ og } B = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\mu^2)}$$

hvor ρ = rumvægt af materiale
t = materialetykkelse
E = elasticitetsmodul
μ = Poisson's forhold

Koincidensfrekvensen for et homogent materiale er følgelig:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E \cdot t^2}} \qquad (4.4)$$

Ved indsættelse af materialekonstanterne ρ, μ og E for almindeligt glas fås koincidensfrekvensen for massivt glas:

$$f_c \approx \frac{12000}{t} \text{ [Hz]} \qquad (4.5)$$

hvor t er glastykkelsen i mm.

4.6 Laminering

Reduktionstalskurvens dyk omkring koincidensfrekvensen kan modvirkes ved at anvende lamineret glas i stedet for almindeligt massivt glas. Laminering medfører højere reduktionstal både omkring og over koincidensfrekvensen.

Lamineret glas består af to (evt. flere) glaslag med mellemlæg af et viskoelastisk (plastisk) materiale, der dæmper bøjningssvingninger i glasset. Dæmpningen sker som følge af viskoelastiske tab i det plastiske materiale, når en bøjningsbølge udbreder sig i det laminerede glas.

Som lamineringsmateriale anvendes enten plastfolie (polyvinylbutyral) eller en acrylmasse (blød polymethacrylat). PVB-folien findes i tykkelser på 0,38 mm, 0,76 mm eller 1,14 mm. Laminering med acrylmasse sker ved udstøbning og kan udføres i vilkårlig tykkelse fra ca. 2 mm til ca. 6 mm. Jo tykkere lamineringsmateriale, der anvendes, jo mere effektiv dæmpes glasset.

Lamineret glas har mindre bøjningsstivhed end massivt glas, og koincidensfrekvensen er derfor højere.

4.7 Glastykkelser

En almindelig 2-lags termorude består af 2 glaslag i samme tykkelse, normalt 3 eller 4 mm. Det giver en dårlig lydisolation, fordi ruden er let. En bedre lydisolation opnås traditionelt ved at benytte en tungere konstruktion.

Produktionsteknisk er det fordelagtigt med ens glastykkelser. Ens glas anvendes derfor normalt, også når tykkere glas er nødvendigt pga. rudeformat, vindbelastning mv.

På grund af koincidenseffekten anbefales det at benytte glas af forskellig tykkelse. Herved opnås en højere lydisolation, fordi forskellige glastykkelser giver forskellige "resonanser" i de to glaslag og altså ikke "svaghed" i begge glaslag ved samme frekvens. Ved glastykkelser over 10 mm dominerer koincidenseffekten i for stor en del af frekvensområdet. Det tilrådes derfor at anvende glas, der er tyndere end ca. 10 mm, eller evt. lamineret glas.

I lydruder benyttes ofte 4 mm glas + 8 mm glas, således at koincidensfrekvenserne er forskudt 1/1 oktav.

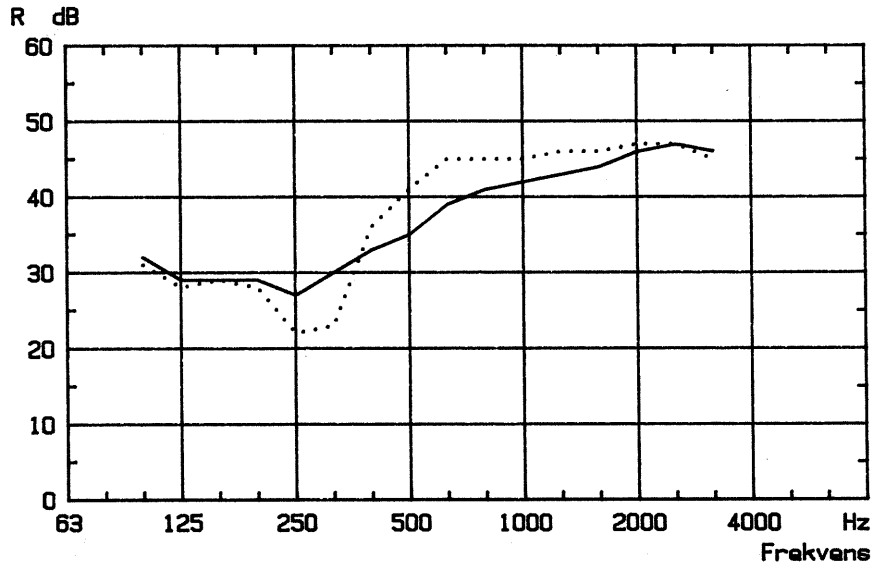
4.8 Glasafstand (hulrumsdybde)

Glasafstanden kaldes også hulrumsdybde, hulrum, luftmellemrum mv. i diverse litteratur og kataloger.

Termoruder har almindeligvis glasafstande på 6-20 mm. I vindueskonstruktioner med koblede rammer, forsatsrammer eller forsatsvinduer er flere glaslag separat monteret, og glasafstanden kan derfor være væsentligt større. Det er karakteristisk for en del litteratur om vinduers lydisolation, at især "store" glasafstande på 30-300 mm er omtalt, mens betydningen af glasafstanden i termoruder ikke er belyst. Ofte er glasafstandens indflydelse på termoruders lydisolation kun omtalt indirekte. Det nævnes, at en lille glasafstand giver anledning til resonans i et uheldigt frekvensområde, og at resonansfrekvensen skal være så lav som muligt.

Foreliggende teoretisk-eksperimentelle modeller for lydisolation er ikke generelt anvendelige til "projektering" af termoruder, bl.a. fordi betydningen af luftarten i rudens hulrum ikke kan forudsiges tilstrækkeligt nøjagtigt. Et eksempel på et uventet forløb af en reduktionstalskurve er vist på figur 4.8, hvor måleresultater for en gasfyldt termorude er afbildet. Termoruden

bestod af et 12 mm tykt, lamineret glas og 4 mm alm. glas. Glasafstanden var 6 mm. Efter målingen blev termoruden punkteret, udluftet (1 time), forseglet, monteret igen og målt pany. Ved denne måling opnåedes et kurveforløb svarende til tidligere måleresultater for ruder med 6 mm luftfyldt hulrum.



Figur 4.8 Reduktionstal for lamineret 2-lags termorude med hhv. atm. luft og gas i hulrum.

..... Gasfyldning: R_W = 40 dB, $I_{a,lab}$ = 35 dB

———— Atm. luft : R_W = 40 dB, $I_{a,lab}$ = 40 dB

En beregningsmetode for dobbeltkonstruktioners reduktionstal er angivet i [20], men hulrumsdybder under 10 mm er ikke omtalt. Ifølge metoden, der er refereret i [3], skulle en ændring af glasafstanden fra 10 mm til 20 mm give en forøgelse af reduktionstallet på 4-5 dB i mellemfrekvensområdet (mellem f_o og f_c).

Når hulrummet i dobbeltkonstruktioner er lille, ændres hulrummets akustiske funktionsområde. Viskose grænselag langs glasoverfladerne i hulrummet er efter almindelige teorier meget små, også i relation til alle forekommende hulrumsdybder i termoruder.

Glasafstanden i en rude er den eneste parameter, der kan ændres gratis - ihvertfald så længe, der er plads i vinduets glasfals. Der er således særlig grund til at undersøge betydningen af hulrumsdybden.

Termoruder har normalt en hulrumsdybde på 6-16 mm, men nogle producenter kan dog levere ruder med glasafstande 4-24 mm (jvf. afsnit 4.3).

4.9 Gasfyldning

Gasfyldning i termoruder er oprindelig blevet "opfundet" under bestræbelserne på at forbedre rudernes varmeisolation. Det har imidlertid vist sig, at gasfyldning også har indflydelse på lydisolationen.

For såvel varme- som lydisolation gælder, at gasfyldningens betydning afhænger af den anvendte gasart eller gasblanding. En redegørelse for de fysiske forhold vedrørende termoruders varme- og lydisolation samt en del beregnings- og måleresultater er publiceret i nogle artikler [21], [22], [23] og [24]. Det fremgår heraf, at der er udført mange forsøg med henblik på at klarlægge, hvilke gasfyldninger (luftarter) der er mest velegnede, hvad angår varme- og/eller lydisolation.

Fyldningen i en termorude skal naturligvis være rimeligt billig, men skal herudover opfylde en række funktionskrav [23]:

- Den må ikke være giftig
- Den skal være UV- og temperaturbestandig
- Den skal være kemisk inaktiv over for glas, forseglingsmaterialer, afstandsprofil og fugtabsorber
- Den må ikke diffundere ud gennem forseglingen
- Dugpunktet skal være under ÷20°C

For tiden kan disse krav kun opfyldes af atm. luft, Argon og SF_6 samt blandinger heraf.

I nedenstående tabel findes materialekonstanter for en række af de luftarter, der har været undersøgt med henblik på anvendelse i termoruder eller afklaring af de fysiske årsager til forskelle i egenskaber.

Luftart	M molekyle vægt g/mol	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ varme-fylde forhold tal	20° C (293° K) og 1 atmosfære (101.3 kPa)			
			ρ kg/m^3	c m/sec	ρc kg/m^2·sec	ρc^2 kg/m·sec^2
Atmosfærisk luft	28.9	1.4	1.205	344	414	$1.42 \cdot 10^5$
Kvælstof, N_2	28	1.4	1.168	349	408	$1.42 \cdot 10^5$
Ilt, O_2	32	1.4	1.335	327	436	$1.42 \cdot 10^5$
Argon, Ar	39.9	1.67	1.664	319	531	$1.70 \cdot 10^5$
Kulilte, CO	28	1.4	1.168	349	408	$1.42 \cdot 10^5$
Kultveilte, CO_2	44	1.28	1.835	266	489	$1.30 \cdot 10^5$
Brint, H_2	2	1.4	0.083	1306	109	$1.42 \cdot 10^5$
Helium, He	4	1.67	0.167	1009	168	$1.70 \cdot 10^5$
Svovlfluorid, SF_6	146	(1.26)	(6.07)	(133)	(808)	$(1.07 \cdot 10^5)$
Krypton, Kr	84	1.67	3.503	220	771	$1.69 \cdot 10^5$

$\rho = B \cdot \frac{M}{R \cdot T}$ *)

$c = \sqrt{\gamma \frac{R \cdot T}{M}}$

$\rho c = B \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{M}{R \cdot T}}$

$\rho c^2 = B \cdot \gamma$

ρ = luftartens densitet (massefylde) [kg/m^3]
B = atmosfæretrykket [kPa]
c = lydhastigheden [m/sec]
M = molekylevægt [g/mol]
R = gaskonstant = 8,314 [kg·m^2/sec^2·^{o}K·mol]
T = absolut temperatur [^{o}K]

Tabel 4.1 Karakteristiske størrelser for en række luftarter

*) Gaslovene gælder ikke i den simple form for SF_6, der nærmest har karakter af en fordampet væske (sammenlign med vanddamp). γ og c er opgivet på grundlag af målte værdier.

Af tabellen ses, at Argon har næsten samme lydhastighed som atm. luft, mens lydhastigheden i SF_6 er væsentligt mindre.

Det har i mange år været velkendt, at en dobbeltkonstruktions hulrumsdybde har stor betydning for varmeisolationen. I den nævnte litteratur er der også nøje redegjort for, at en gasfyldnings indflydelse på en termorudes varmeisolation afhænger af hulrumsdybden. Denne afhængighed er principielt forskellig for forskellige gasfyldninger, se figur 4.9. Det medfører omvendt, at en rudeproducent, der ønsker at opnå højest mulig

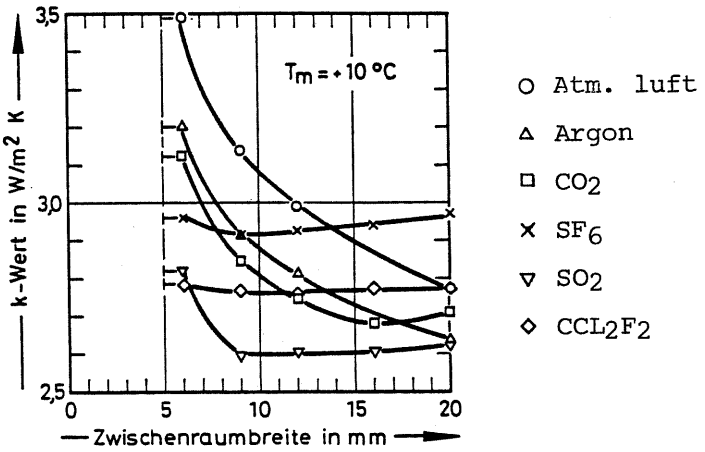
varmeisolation for samtlige rudetyper, må benytte forskellige gasblandinger afpasset efter de aktuelle hulrumsdybder, se figur 4.10. Det ses eksempelvis, at den laveste k-værdi for en rude med 6 mm glasafstand opnås ved fyldning med ren SF_6, hvorimod den laveste k-værdi for en rude med 16 mm glasafstand opnås ved fyldning med ren Argon.

Varmeisolationen og -økonomien for termoruder kan yderligere forbedres ved anvendelse af glas med metalbelægninger.

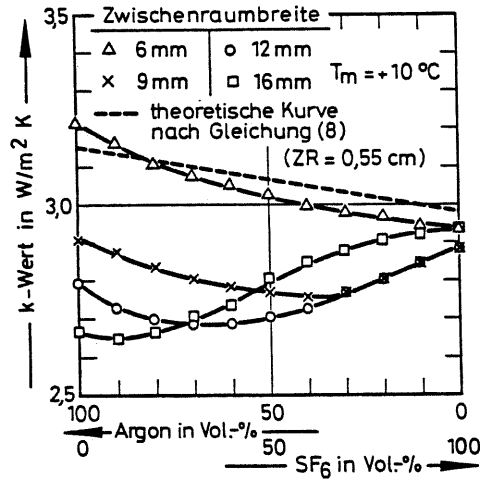
Der har ikke tilsvarende været rettet opmærksomhed mod, at gasfyldningers principielle betydning for lydisolationen også kunne afhænge af hulrumsdybden. I både dansk og udenlandsk litteratur er omtalen af gasfyldning ofte begrænset til en konstatering af, at gasfyldning forbedrer lydisolationen i frekvensområdet over rudens resonansfrekvens. Et eksempel på den forbedring, der kan opnås ved gasfyldning af et 15 mm hulrum er vist på figur 1.1.

Gasfyldning af termoruder anvendes imidlertid mest ved små hulrum, hvor en forbedring af varmeisolationen er mest påkrævet. Den eksperimentelle undersøgelse, der er beskrevet senere, viser, at der netop ved små hulrum opnås en forringelse af lydisolationen ved fyldning med SF_6.

Gasfyldte termoruder er dyrere end ruder med atm. luft. Køberen har ingen muligheder for at kontrollere fyldningen i hulrummet. Fra nogle sider har det været påpeget, at gasfyldningen kan forsvinde med tiden. Ved en undersøgelse af gasfyldte ruders levetid [25] kunne en ringere holdbarhed imidlertid ikke konstateres. Derimod fremgår det af den nævnte rapport, at fyldningsgrad og blandingsforhold kan variere en del. Det har betydning for både varmeisolationen og lydisolationen. I rapporten er nævnt at der er brug for en kontrolordning og et krav om en fyldningsgrad på over 90%. Med en egnet påfyldningsmetode og omhu i produktionen kan dette krav opfyldes.



Figur 4.9 k-værdier for almindelige 2-lags termoruder som funktion af hulrumsdybden ved forskellige gasfyldninger. Efter [23].



Figur 4.10 k-værdier for almindelige 2-lags termoruder med Argon-SF_6-blandinger ved forskellige hulrumsdybder. Efter [23].

4.10 Egensvingninger i termorudens hulrum

En termorudes hulrum har en fast afgrænsning ved afstandsprofilet, og når ruden påvirkes af lydbølger, vil der i hulrummet opstå egensvingninger parallelt med glassene. Egensvingningerne er 2-dimensionale, stående bølger. For en rektangulær rude med hulrumsbredde og -højde l_x og l_y kan egensvingningsfrekvenserne bestemmes af følgende formel:

$$f_{n_x,n_y} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2} \qquad (4.6)$$

f_{n_x,n_y} = egensvingningsfrekvens
c = lydhastighed i gassen/luften
l_x, l_y = hulrummets bredde og højde
n_x = 0, 1, 2, 3 .....
n_y = 0, 1, 2, 3 .....

Frekvenser for egensvingninger i vinduesåbningen kan beregnes efter samme formel. Ved frekvenser over den laveste egensvingningsfrekvens for hhv. vinduesåbning og rude øges lydtransmissionen på grund af stående bølger, og reduktionstallet mindskes.

For luftfyldte ruder bliver forringelsen af lydisolationen størst når vinduesåbningen og rudens hulrum har samme dimensioner, således at lydbølgerne er "på bølgelængde". Omvendt fås den bedste lydisolation, når rudens og vinduesåbningens størrelse er meget forskellige, se figur 3.1. Indbygning af en rude i et oplukkeligt, tæt vindue kan således forøge lydisolationen væsentligt i et frekvensområde over rudens resonansfrekvens.

De laveste egensvingningsfrekvenser for en 12M × 12M vinduesåbning (niche) og for den tilsvarende luftfyldte rude i en fast karm og i et oplukkeligt vindue er angivet i tabel 4.2. Rudedimensioner fra den eksperimentelle undersøgelse (afsnit 5) er benyttet. Sammenfaldet af egensvingningsfrekvenser skyldes, at vinduet er kvadratisk.

Egensvingningsfrekvens [Hz]		Vinduesniche 1,21 m × 1,21 m	Rude i fast karm 1,10 m × 1,10 m	Rude i oplukkeligt vindue 1,00 m × 1,00 m
1-dimensionale egensvingninger	$f_{1,0}$	140	155	170
	$f_{0,1}$	140	155	170
	$f_{2,0}$	280	310	340
	$f_{0,2}$	280	310	340
2-dimensionale egensvingninger	$f_{1,1}$	200	220	240
	$f_{2,1}$	315	345	380
	$f_{1,2}$	315	345	380
	$f_{2,2}$	400	440	480

Tabel 4.2 12M × 12 M vindue. Tabel over de laveste 1- og 2-dimensionale egensvingningsfrekvenser

Lydhastigheden i SF_6 er væsentligt lavere end i luft (se tabel 4.1), men gasfyldte hulrum virker ud fra en akustisk betragtning som dæmpede hulrum [3], hvor egensvingninger ikke har helt samme betydning.

4.11 Karm/ramme-konstruktioner

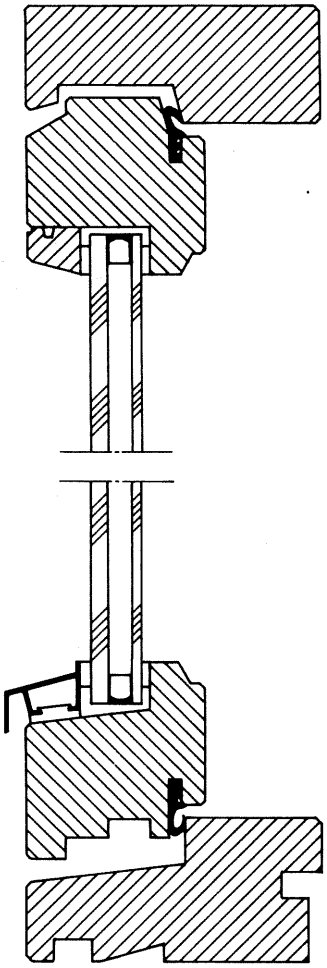
Selv om lydisolationen for en termorude kendes fra en måling af ruden i fast karm, kan det ikke påregnes, at måleresultaterne gælder for den samme type termorude monteret i en karm/ramme-konstruktion. Indbygning af en rude i et oplukkeligt vindue kan have både en negativ og positiv indflydelse på lydisolationen.

En forringet lydisolation kan skyldes, at der er utætheder i fuger eller at karm/ramme-materialet ikke er tungt nok. En forbedret lydisolation kan opnås som følge af, at rudens dimensioner mindskes i forhold til vinduesåbningen, se afsnit 3.2. Ved ændring af vinduesformatet kan optræde forskellige arealeffekter, positive eller negative, se bl.a [3].

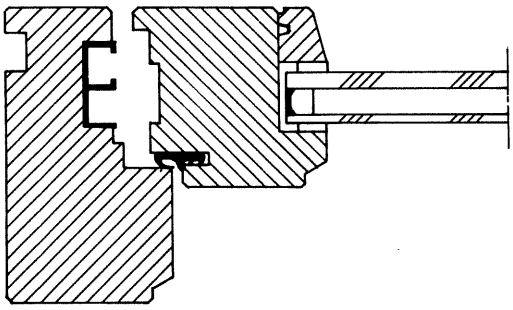
De almindeligste karm/ramme-materialer er træ og kunststof (plast). Vinduer af metalprofiler er væsentligt dyrere og anvendes normalt ikke i boligbyggeri.

Udformningen af karm og ramme afhænger af vinduets funktion. Vendevinduer, topstyrede vinduer, sidehængte vinduer (incl. flagvinduer) har udadgående rammer, Sidebundhængte vinduer har indadgående rammer. På figur 4.11 og 4.12 er vist eksempler på udformningen af karm/ramme-profiler for vinduer med henholdsvis udadgående og indadgående rammer.

Udadgående rammer har ofte kun et anslag mod karmen, og lyden har via fugerne næsten fri adgang til de indre konstruktionsdele. I modsætning hertil har sidebundhængte vinduer som regel 2-3 anslag, hvilket har betydning ikke alene for tætningsmulighederne, men også for karm/ramme-konstruktionens lydisolation.

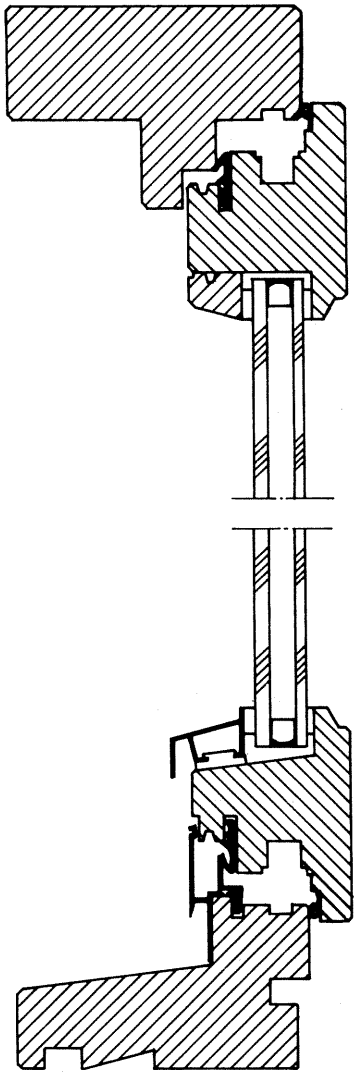


Lodret snit

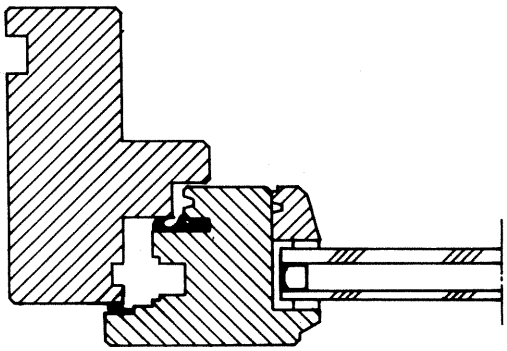


Vandret snit (set indefra)

Figur 4.11 Eksempel på udformning af karm/ramme-profiler for vindue med udadgående ramme



Lodret snit



Vandret snit (set indefra)

Figur 4.12 Eksempel på udformning af karm/ramme-profiler for vindue med indadgående ramme

4.12 Fugetætninger

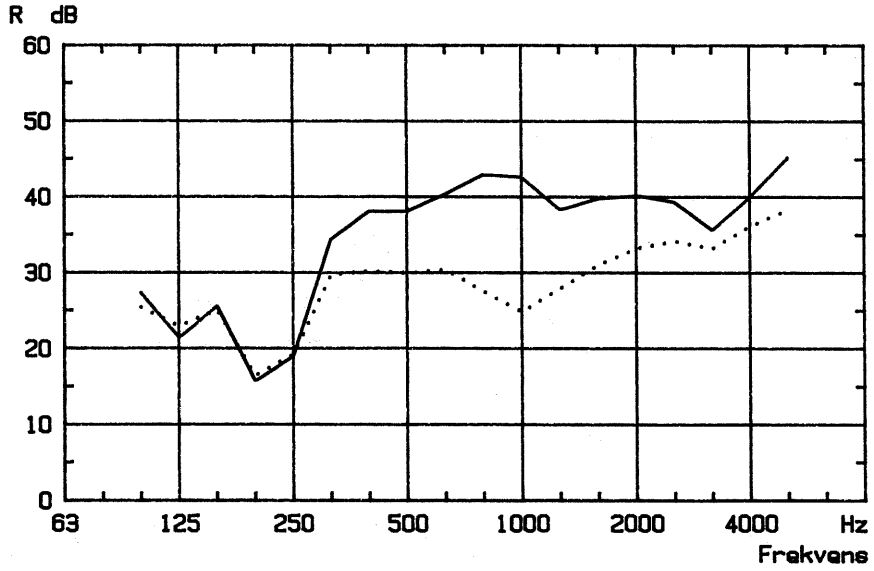
Gode lydisolerende egenskaber for et vindue kan kun opnås med effektive tætninger i fugerne. For oplukkelige vinduer drejer det sig om følgende fuger:

- fuge mellem rude og ramme (glasfuge)
- fuge mellem ramme og karm (ramme/karm-fuge)
- fuge mellem karm og væg (karmfuge)

Tæthed af karmfuger og glasfuger er principielt ikke vanskelig at opnå, men tætte fuger opnås naturligvis kun ved en omhyggelig arbejdsudførelse. Principper og fremgangsmåde er beskrevet i bl.a. SBI-anvisning 112 [18] samt i kataloger fra rude- og vinduesproducenter.

En effektiv tætning af et vindues ramme/karm-fuge opnås ikke alene ved omhu under produktionen af vinduet. En effektiv tætning opnås kun, hvis der anvendes tætningslister af en type, der er velegnet til den pågældende vinduestype. Det vil sige, at tætningslisterne aktiveres (deformeres) langs alle rammekanter ved lukningen af vinduet.

Utætheder har specielt indflydelse på reduktionstallet ved de høje frekvenser - typisk 1000-3000 Hz - men kan være afgørende for reduktionstallet også ved frekvenser under 1000 Hz. På figur 4.13 er vist et eksempel på betydningen af fugetæthed.



Figur 4.13 Eksempel på utætheders indflydelse på reduktionstal for vindueskonstruktion

——————— $R_W = 36$ dB, $I_{a,lab} = 33$ dB, tape over karm/ramme-fuge

..... $R_W = 30$ dB, $I_{a,lab} = 29$ dB, uden tape-tætning

Ved valg af fugeudformning, tætningslister og vinduesbeslag skal det bemærkes, at den bedste tætning opnås ved at anvende:

- tætningslister med en udformning svarende til fugetolerancerne
- to tætningsplaner med størst mulig afstand
- labyrintagtig fuge
- vinduesbeslag med effektiv tilspænding af rammen, gerne i mere end to lukkepunkter

Ved anvendelse af to tætningsplaner er det vigtigt, at udformning og placering af tætningslisterne vælges, så begge tætningslister kan aktiveres samtidigt. I modsat fald kan en ekstra tætningsliste være virkningsløs eller i værste fald medføre en forringet lydisolation. Vinduet fra figur 4.13 havde 2 anslag med tætningslister, men størrelsen og placeringen af tætningslisterne var forkert.

En tilstrækkelig vindtæthed kan opnås med ét tætningsplan, men 2 tætningsplaner kan være nødvendigt, hvis der skal opnås en høj lydisolation.

5. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE

5.1 Hovedformål

Formålet med den eksperimentelle undersøgelse er først og fremmest at klarlægge, hvorledes lydisolationen for to-lags termoruder afhænger af glastykkelser, laminering, glasafstand og gasfyldning. Gennem en systematisk opbygget undersøgelse, hvor hver parameter ændres uafhængigt af de andre, er det muligt at få data, der giver vinduesproducenter mulighed for at vurdere, om en ønsket forbedring i lydisolation kan forventes opnået ved en ændring af ruden eller om den øvrige del af vindueskonstruktionen skal ændres.

Erfaringer fra rekvirerede målinger og forskningsprojekter viser, at en rudes lydisolation afhænger af indbygningsbetingelserne, dvs. af om ruden er indbygget i en fast karm eller i et oplukkeligt vindue. Derfor er en del målinger på ruder i fast karm dubleret med målinger på samme rudetype monteret i et oplukkeligt vindue.

Ved hjælp af undersøgelsesresultaterne vil det også blive forsøgt at be- eller afkræfte nogle af de oftest forekommende påstande om ruders lydisolation.

Den eksperimentelle undersøgelse omfatter laboratoriemålinger af reduktionstal pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-5000 Hz samt beregning af vurderingsværdierne $I_{a,lab}$ og R_w, der begge beregnes på basis af måleresultater for frekvensområdet 100-3150 Hz.

5.2 Påstande om ruders lydisolation

Omtale af lydruder findes i talrige rapporter, vejledninger og pjecer, i de fleste tilfælde som en lille del af en større sammenhæng. Det medfører naturligvis, at anvisningerne er kortfattede og meget generelle og desværre hermed, at der ofte ikke er megen hjælp at hente for en rude- eller vinduesproducent, der ønsker at finde den bedst mulige lydrude inden for de afstukne rammer for vægt, tykkelse, pris.

De almindeligste påstande om, hvad der forbedrer og ikke forbedrer en rudes lydisolation er nævnt herunder.

Det påstås, at forøgelse af lydisolationen opnås ved at anvende:

- tungere glas
- forskellige glastykkelser
- laminering
- større glasafstand
- gasfyldning

Det påstås endvidere, at:

- ruder i oplukkelige vinduer har dårligere lydisolation end i faste vinduer (karme)
- gasfyldning giver dybe dyk på reduktionstalskurver
- termoruder (2- og 3-lags) med almindelige glastykkelser har dybe resonansdyk og er derfor ikke bedre end massivt glas med samme vægt

Vedrørende den sidstnævnte påstand er der ofte den modsatte opfattelse hos ikke-akustikere: at 2-lags termoruder er bedre end enkeltglas og at 3-lags er endnu bedre.

Nogle af de nævnte påstande kan umiddelbart bekræftes, men en stor del må besvares med et "måske", fordi svaret afhænger af, hvordan ruden i øvrigt er opbygget. Sidstnævnte situation er naturligvis særligt uheldig, når lydisolationen for en rude forringes som følge af en konstruktionsændring, der netop er valgt, fordi den i andre tilfælde har givet en forbedret lydisolation.

Svaret på, om en eller anden ændring forbedrer lydsiolationen, afhænger naturligvis også af, hvilken vurderingsmetode der anvendes. Et vindue kan have en god lydisolation i et frekvensområde og en dårlig i et andet, og der er ikke præcis samme behov i alle tilfælde. Som regel anvendes en vurdering udtrykt ved et enkelt tal, der beregnes efter en standardiseret metode.

Den aktuelle undersøgelse er udført med et vinduesformat på 12M × 12M. Dette format bør ifølge DS 1084 foretrækkes ved laboratoriemålinger af facadevinduer.

5.3 Principper for forsøgsplanlægning

For at kunne vurdere troværdigheden af undersøgelsesresultaterne er det nødvendigt at have kendskab til, hvor "veldefineret" et produkt en rude er. Det vil sige, at forskelle i forsøgsresultater for forsøgsresultater for forskelligt opbyggede prøveemner skal sammenlignes med de forskelle, der kan fremkomme ved måling på flere eksemplarer af samme type prøveemne.

Forskelle i måleresultater for samme type prøveemne kan skyldes måleusikkerhed og utilsigtede forskelle i prøveemner eller forsøgsbetingelser i øvrigt. En eksperimentel undersøgelse skal naturligvis tilrettelægges, så usikkerhed fra målemetode og forsøgsbetingelser bliver små i forhold til de forskelle, der skyldes variation i de undersøgte parametre.

Forsøgsteknisk kan denne vurdering foretages ud fra resultaterne af målinger på flere eksemplarer af samme type prøveemne. Alternativt kan der benyttes mindre "spring" i de undersøgte parametre. Sidstnævnte fremgangsmåde er benyttet, da der herved opnås flest informationer om den pågældende parameters indflydelse på lydisolationen. Valget af denne forsøgsmetodik skal ses i lyset af, at ruder erfaringsmæssigt er veldefinerede produkter.

Produktforskelle mellem forskellige rudefabrikater kan naturligvis forekomme, når produktionsmetode eller materialer er forskellige. Det indebærer, at forskellige rudefabrikater ikke nødvendigvis har fuldstændig ens lydisolation, og at den enkelte rudeproducent må være opmærksom på betydningen af produktionsændringer.

I en forseglet termorude indgår glas, afstandsprofil, forseglingsmasse(r) og eventuelt gasfyldning. Almindeligt glas er et meget veldefineret produkt. Materialer til afstandsprofiler og forseglinger kan variere, men foreliggende erfaringer giver ikke grundlag for at tillægge dette nogen særlig betydning.

Valget af fyldning i termorudens hulrum har derimod ofte afgørende indflydelse på reduktionstalskurvens forløb. Det indebærer, at en eventuel afvigelse fra den tilsigtede fyldning i hulrummet kan medføre ændringer af lydisolationen (og af varmeisolationen). Et veldefineret produkt opnås kun, hvis producenten

har mulighed for at styre såvel fyldningsgrad som blandingsforhold for de anvendte luftarter, jvf. afsnit 4.9.

Til den eksperimentelle undersøgelse vælges fortrinsvis "rene" luftarter som hulrumsfyldninger, nemlig SF_6 og atm. luft. Dette valg fortages af 2 grunde. Dels repræsenterer disse luftarter yderpunkter mht. lydhastighed, dels opnås den størst mulige sikkerhed for, at hulrumsfyldningen har de tilstræbte egenskaber. Ved valg af gasblandinger må der påregnes en usikkerhed, hvis størrelse ikke er kendt, og undersøgelsen ville derfor blive mere omfattende.

5.4 Forsøgsplan

Forsøgsplanen blev søgt tilrettelagt således, at betydningen af glastykkelse, laminering, glasafstand og gasfyldning blev belyst bedst muligt inden for projektets økonomiske rammer.

For hver af de nævnte parametre er det tilstræbt, at alle normale variationer forekommer i undersøgelsen. Hvor dette er umuligt, er der valgt typiske variationer eller yderpunkter.

Ved undersøgelsen er der benyttet ruder med følgende materialeparametre (vedr. terminologi, se afsnit 4.3):

GLAS	: 4 mm, 6 mm, 8 mm. 4/0,4/4 mm laminat med 0,38 mm PVB-folie. 4/2/4 mm laminat med blød acryl (2 mm).
HULRUM:	4,6,9,12,16,20,24 mm med hovedvægten lagt på 6-16 mm hulrum.
FYLDNING:	Atm. luft, SF_6, Argon, blandinger af SF_6 + Argon.

Desuden blev der udført en enkelt måling på en rude med Krypton som hulrumsfyldning. Krypton anvendes normalt ikke i termorudeproduktionen, da prisen er meget høj.

En oversigt over samtlige prøveemner findes i tabel 5.2. Der er benyttet to rudefabrikater, der betegnes hhv. I og II (se afsnit 5.5). Hovedparten af målingerne er udført på termoruder af fabrikat I. Formålet med at udføre nogle målinger på et andet fabrikat

var dels at gennemføre en mindre undersøgelse af gasblandinger, dels at efterprøve nogle af resultaterne for rudefabrikat I. Denne efterprøvning blev dog ikke helt gennemført, da de fleste rudetyper - pga. uklar bestilling fra instituttet - ikke blev leveret med gasfyldning (SF_6). I tabel 5.3 findes en oversigt over prøveemner af fabrikat II.

Til undersøgelsen blev benyttet karm/ramme-konstruktioner af træ. En detailbeskrivelse af prøveemnerne findes i afsnit 5.5-5.8. Vinduernes mål fremgår af tabel 5.1.

12M × 12M vindue	Fast karm [mm × mm]	Oplukkeligt vindue [mm × mm]
Vinduesåbning	1210 × 1210	1210 × 1210
Udv. karmmål	1188 × 1188	1188 × 1188
Glasfalsmål	1132 × 1132	1036 × 1023
Glasmål	1124 × 1124	1028 × 1015

Tabel 5.1 Oversigt over dimensioner for prøveemner

Den største del af undersøgelsen er gennemført med ruder monteret i en fast karm. Baggrunden herfor er først og fremmest, at nogle parametres indflydelse på lydisolationen er tydeligere end ved montage i et oplukkeligt vindue. I Danmark har det endvidere i mange år været praksis at benytte en fast karm som en neutral monteringsform ved prøvning af ruder.

I kontor- og institutionsbyggeri er faste vinduer forholdsvis udbredt. I boligbyggeri anvendes - af traditionelle og funktionelle grunde - mest oplukkelige vinduer. Det har derfor været naturligt at gentage målinger på nogle udvalgte rudetyper monteret i et oplukkeligt vindue. Til disse målinger blev valgt et vendevindue, se beskrivelse i afsnit 5.7. Vendevinduer er meget anvendt og har endvidere en karm/ramme-udformning, der er repræsentativ for bl.a. sidehængte vinduer med udadgående rammer.

Rude [mm]	Hulrumsfyldning			Vægt [kg/m^2]	Tykkelse [mm]	Bemærkninger
	Atm. luft	SF_6	Ar			
4-6-4	f			20	14	
4-12-4	fF + O	F + O	F	-	20	
6-6-4	F	F		25	16	
6-9-4	F	F		-	19	
6-12-4	F + O	F + O		-	22	
6-16-4	F	F		-	26	
6-20-4	F	F		-	30	
6-12-6	F	F		30	24	
8-4-4	F	F		30	16	
8-6-4	fF + O	F + O	F	-	18	
8-9-4	F	F		-	21	f tillige målt med 3 SF_6/Ar-blandinger samt Krypton.
8-12-4	fF + O	fF + O	fF	-	24	
8-16-4	F	F		-	28	
8-20-4	F + O	F + O		-	32	
8-24-4	F	F	F	-	36	
8-12-8	F	F		40	28	
4/0,4/4-6-4	f			30	18	
4/0,4/4-12-4	f			-	24	
4/2/4-6-4	F	F		32	20	
4/2/4-9-4	F	(F)		-	23	Gasfyldning mangler
4/2/4-12-4	F	F		-	26	
4/2/4-16-4	F	F		-	30	

F: fast karm med rude af fabrikat I

O: oplukkeligt vindue med rude af fabrikat I

f: fast karm med rude af fabrikat II (se også tabel 5.3)

Tabel 5.2 Oversigt over prøveemner

Rude [mm]	Hulrumsfyldn. SF_6/Ar [%/%]	Hulrumsfyldn. Andet	Vægt [kg/m²]	Tykkelse [mm]
8-12-4	100/0		30	24
	75/25		-	-
	50/50		-	-
	25/75		-	-
	0/100		-	-
		Krypton	-	-
4-6-4		Luft	20	14
4-12-4		Luft	20	20
8-6-4		Luft	30	18
8-12-4		Luft	30	24
4/0,4/4-6-4		Luft	30	18
4/0,4/4-12-4		Luft	30	24

Tabel 5.3 Oversigt over prøveemner, rudefabrikat II. Luft = atm. luft.

Som det fremgår af tegningen på figur 5.4 har vendevinduet kun ét anslag, og lyden har via fugerne næsten fri adgang til de indre konstruktionsdele. I modsætning hertil har sidebundhængte vinduer som regel 2-3 anslag (se afsnit 4.11), hvilket har betydning ikke alene for tætningsmulighederne, men også for karm/ramme-konstruktionens lydisolation. Med henblik på en vurdering af disse forhold blev der udført supplerende målinger på det vendevindue, der er anvendt som oplukkeligt vindue ved den eksperimentelle undersøgelse.

Af oversigten i tabel 5.2 fremgår hvilke rudetyper, der er målt i det oplukkelige vindue. For hver rude er der udført 3 målinger:

(A) Vindue uden supplerende tætning

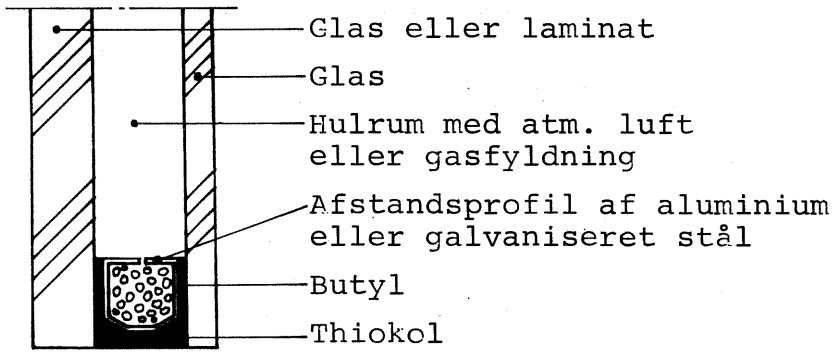
(B) Vindue med tape-tætning af karm/rammefugen indvendigt

(C) Vindue med tape-tætning af karm/rammefuge indvendigt og udvendigt

Måling B er udført for at kontrollere effektiviteten af vinduets tætning. Resultaterne af måling C sammenlignet med måling A og B viser, om der kan opnås bedre lydisolation med 2 tætningsplaner, dvs. med en mindre åben spalte mellem karm og ramme.

5.5 Beskrivelse af termoruder

En generel beskrivelse af termoruders opbygning findes i afsnit 4.3. Til undersøgelsen blev benyttet termoruder som vist på figur 5.1.

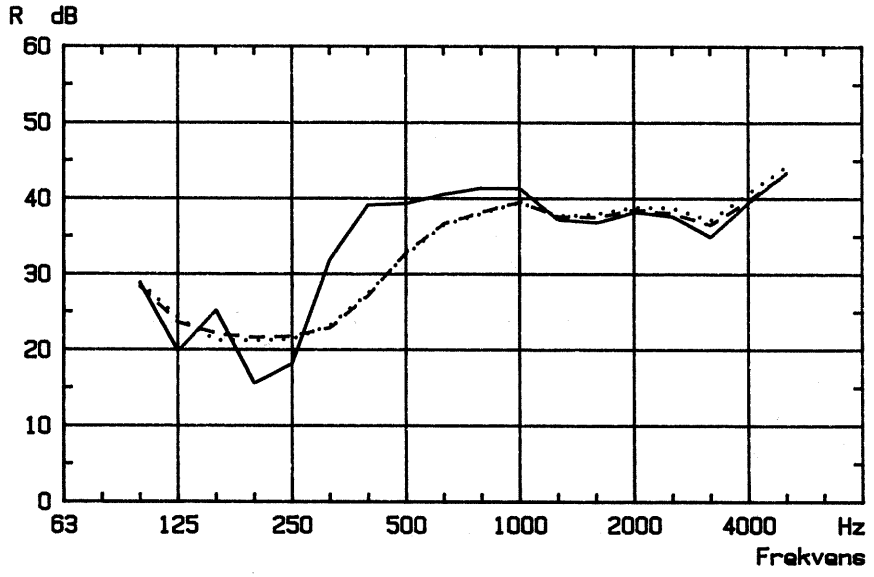


Figur 5.1 Snit i termorude

Til to af måleserierne (F og O i tabel 5.2) blev benyttet termoruder med afstandsprofiler af aluminium. Disse ruder var produceret af Panolook Glas A/S og benævnes i tabeller mv. rudefabrikat I. De øvrige termoruder havde afstandsprofiler af galvaniseret stål og var produceret af Glasalstrup-Thorvald Pedersen A/S. Disse ruder benævnes fabrikat II.

Alle ruder af fabrikat I blev målt med 2 forskellige luftarter i hulrum: SF_6 og atm. luft. Der blev benyttet samme rude til begge målinger, idet alle ruder blev leveret med SF_6. Efter målingen af en rude med gasfyldning blev ruden "udluftet". Der blev boret et ø3 mm hul, først foroven og dernæst forneden (de samme steder, som oprindelig var blevet benyttet ved rudens gasfyldning). Dernæst stod ruden urørt (mindst 10 cm o. gulv) ca. ½ døgn, således at gassen kunne sive ud. Derefter blev ruden udluftet med trykluft, og efter yderligere ca. 1 time blev den forseglet igen.

Et check af denne procedure blev udført med 2 ruder af fabrikat II. Ved leveringen havde den ene rude atm. luft i hulrummet og den anden SF_6. Efter måling af reduktionstal for ruderne blev den gasfyldte rude udluftet og målt igen. På figur 5.2 er vist resultaterne af de 3 målinger. Reduktionstalskurverne for de to ruder med luft er sammenfaldende, og udluftningsproceduren må derfor anses for at være effektiv.



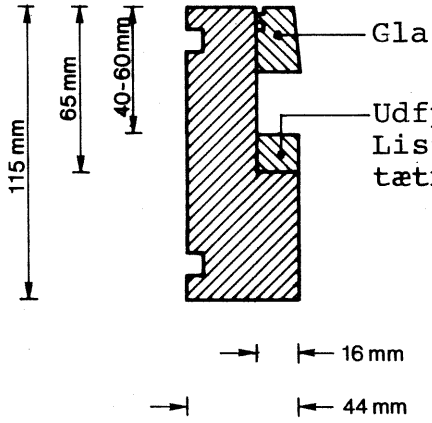
Figur 5.2 Termoruder i fast karm. Sammenligning af resultater for:
a) luftfyldt rude
b) udluftet rude (oprindelig med gasfyldning af SF_6)

——————— Gasfyldt rude: R_W = 35 dB
..... Luftfyldt rude: R_W = 34 dB
- - - - - - - - Udluftet (tidl. gasfyldt) rude: R_W = 34 dB

Enkelte af ruderne (se tabel 5.2) blev tillige målt med en fyldning af Argon. Efter at målingerne på ruderne med SF_6 og atm. luft var udført, blev de aktuelle ruder returneret til producenten, som derefter foretog fyldning med Argon.

5.6 Beskrivelse af fast karm

Som fast karm blev benyttet en trækarm med en udformning, der er repræsentativ for de fleste trækarme. Karmen blev produceret af A/S Vip-let, men havde af praktiske grunde nogle få modifikationer i forhold til standardproduktet. På figur 5.3 er vist et snit i karmen. Glasfalsens dybde kan varieres fra 40 til 65 mm. Ruderne fastholdes i karmen af et fast anslag indvendigt og af en glasliste udvendigt.



Figur 5.3 Fast karm med variabel falsdybde.
snit i side-, over- og underkarm.
Målestok 1:3.

Vedrørende terminologi for vinduer (bredde, højde, dybde mv.) henvises til [26] og [27].

I forsøgsplanen indgik ruder med tykkelser på 14-36 mm. Med henblik på forsøgsresultaternes praktiske anvendelighed ønskedes forsøgsbetingelser, hvor vinduets geometri (rudens placering i forhold til karmens yderside) og rudens randbetingelser (dvs. monteringsmaterialer) var i overensstemmelse med almindelig praksis.

Af de nævnte grunde blev der anvendt "typiske" fugebånd og glaslister. For at muliggøre en hurtig udskiftning af termoruderne var det dog nødvendigt at afvige fra almindelig praksis på et par områder. Karmens glasfals var ikke ventileret, og der blev ikke topforseglet i fugen mellem rude og karm, men i

stedet tætnet med tape. Oprindeligt var det planlagt at ventilere glasfalsen ved at benytte en bundglasliste med udskæringer (3 mm × 20 mm pr. ca. 20 cm) og at topforsegle med silicone fugemasse.

Ved nogle indledende forsøg (uden topforsegling) blev det konstateret, at der kunne forekomme utætheder i fugen mellem rude og ramme, hvis fugebåndene ikke var effektivt komprimeret langs hele rudekanten, og at virkningen af utætheder kunne forstærkes kraftigt, hvis glasfalsen var ventileret.

Når fugebåndene var effektivt komprimeret, blev lydisolationen ikke forringet af en ventileret glasfals, men heller ikke forbedret af en topforsegling.

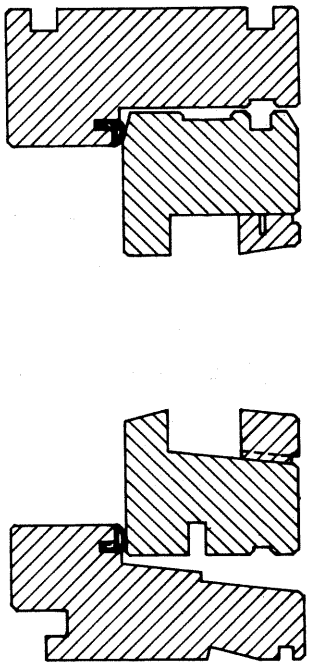
Da formålet med den eksperimentelle undersøgelse var at undersøge virkningen af forskellige rudeparametre, valgtes der på baggrund af erfaringerne fra de indledende forsøg at undlade ventilation af glasfals og at erstatte topforseglingen med en kraftig tape. Ved anvendelse af tapetætning opnåedes der flere fordele: 1) monteringstiden for ruderne mindskedes, 2) måling og udskiftning af rude skulle ikke afvente hærdning af silicone og 3) karmen kunne benyttes til mange målinger, da den ikke blev ødelagt ved gentagne afrensninger af forseglingsmassen.

I afsnit 5.8 er montagen af karm og rude nøjere beskrevet.

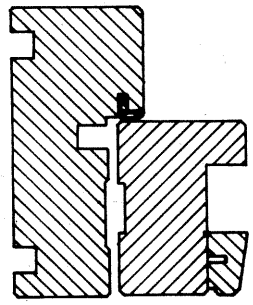
5.7 Beskrivelse af oplukkeligt vindue

Det oplukkelige vindue var et vendevindue (standardprodukt) fra A/S Vip-let. Et vendevindue har en topstyret, udadgående ramme, der kan drejes 180° rundt uden for facaden. Vinduet er étgrebsbetjent. På figur 5.4 er vist et lodret og vandret snit i vindueskonstruktionen.

Vindueskarm- og ramme er fremstillet af træ. Karmen er enkeltfalset, og rammen har ét anslag mod karmen. Til tætning af fugen mellem ramme og karm er der i karmfalsen monteret en PVC-



Lodret snit



Vandret snit

Figur 5.4 Lodret og vandret snit i oplukkeligt vindue. Målestok 1:3.

tætningsliste (type VB 826). Rammen er ophængt i to vendebeslag (et i hver side) og låses i karmen ved hjælp af en paskvillås med to tilholdere (endelukke).

Ruden fastholdes i rammen af et fast anslag indvendigt og af en glasliste udvendigt. Mod det faste anslag og mod glaslisten monteres tætningslister. Underrammens glasfals drænes via 3 mm × 20 mm udskæringer pr. ca. 20 cm i bundglaslisten.

Vinduesrammens glasfals er 50 mm dyb, hvilket muliggør rudetykkelser på op til ca. 30 mm. Der anvendes 15, 20 eller 25 mm glaslister, afhængigt af rudetykkelsen.

Montagen af vindue og ruder er beskrevet i afsnit 5.8.

5.8 Montage af prøveemner

Vinduerne blev monteret i en 35 cm tyk dobbeltvæg, der var opført i en åbning mellem to lydhårde rum. Prøveåbningens størrelse var 1210 × 1210 mm.

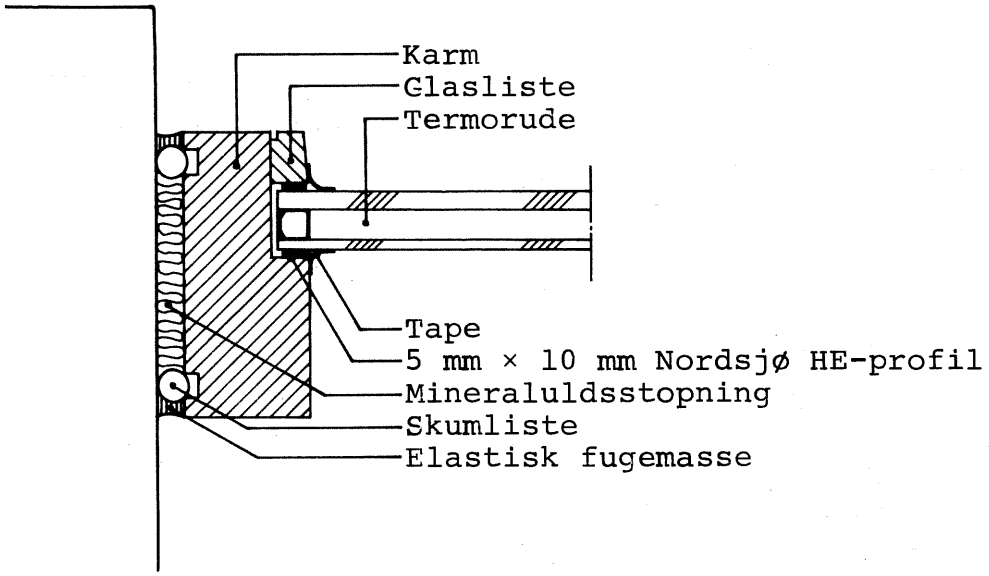
Vinduerne blev monteret med en udvendig nichedybde på ca. 5 cm og fastgjort med 2-3 skruer i hver side. Fugen omkring karmen blev stoppet med mineraluld, hvorefter den indvendigt og udvendigt blev afspærret med en skumliste og forseglet med elastisk fugemasse.

Ved montagen af ruderne blev benyttet 5 mm × 10 mm Nordsjø HE-profil mod det faste anslag og mod glaslisten, og der blev tætnet med tape indvendigt og udvendigt. Glasfalsen i det oplukkelige vindue var ventileret.

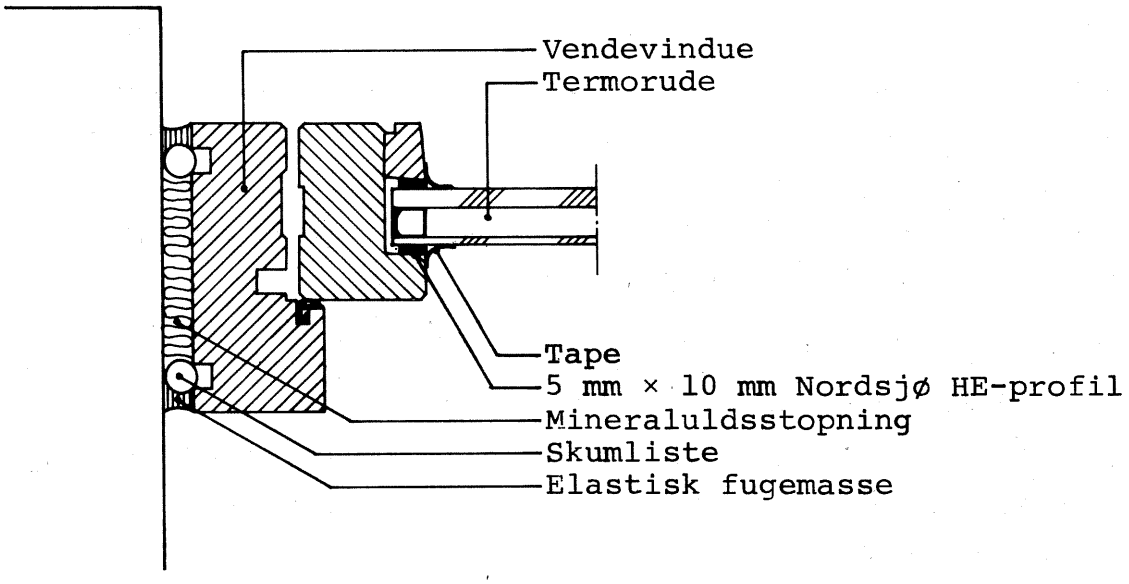
Montagen af vinduerne er vist på figur 5.5 og 5.6.

5.9 Målemetode

Målingerne af reduktionstal blev udført efter bestemmelserne i DS/ISO 140/3-1978: Måling af bygningselementers luftlydisolation i laboratorium.



Figur 5.5 Fast vindue. Montage i laboratoriet. Målestok 1:3.



Figur 5.6 Oplukkeligt vindue. Montage i laboratoriet. Målestok 1:3.

Måling A: uden tape over karm/ramme-fuge

Måling B: tape over karm/ramme-fuge indv.

Måling C: tape over karm/ramme-fuge indv. + udv.

Ved måling af reduktionstallet efter DS/ISO 140/3-1978 placeres prøveemnet mellem et senderum og et modtagerum, der opfylder kravene i DS/ISO 140/1-1978, og reduktionstallet bestemmes efter nedenstående formeludtryk, der forudsætter, at lydfelterne i rummene er diffuse:

$$R = L_S - L_M + 10 \log_{10}(S/A_M) \quad \text{og} \quad A_M = \frac{0{,}163 \cdot V_M}{T_M} \qquad (5.1)$$

R = Prøveemnets reduktionstal [dB]
L_S = Lydtrykniveau i senderum [dB/20μPa]
L_M = Lydtrykniveau i modtagerum [dB/20μPa]
S = Prøveemnets areal [m^2]
A_M = Ækvivalent absorptionsareal i modtagerum [m^2]
V_M = Modtagerummets volumen [m^3]
T_M = Efterklangstid i modtagerum [s]

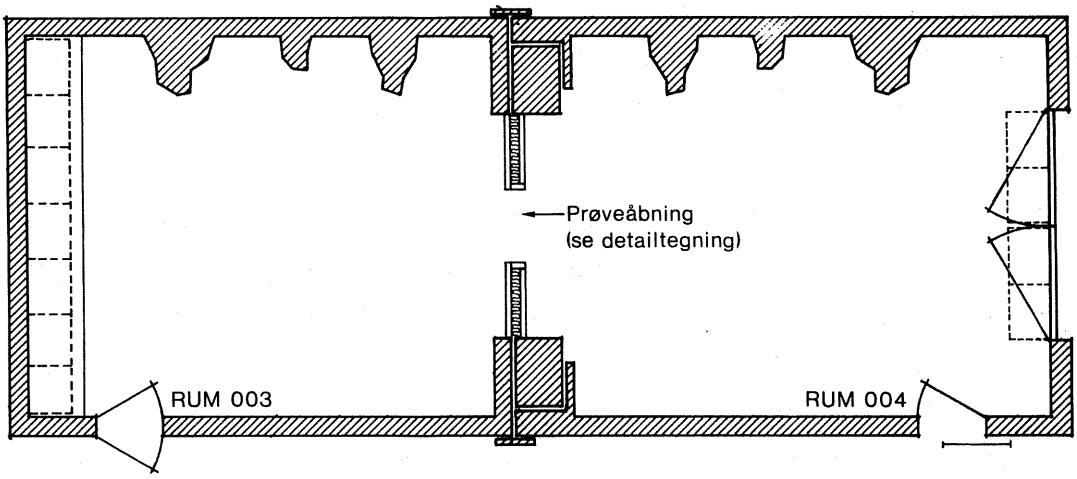
Ved beregning af reduktionstallet for et vindue benyttes der i korrektionsleddet til lydtrykniveaudifferensen arealet af den prøveåbning, som vinduet var monteret i. Reduktionstallet korrigeres for lydtransmission uden om prøveemnet, såfremt denne er større end 1/50 af lydtransmissionen gennem prøveemnet. Største anvendte korrektion - svarende til et transmissionsforhold på 1:3 - er 1,3 dB. Korrektionen beregnes efter Nordtest-metode NT ACOU 013-1979 [28].

Den anvendte måleprocedure er beskrevet i afsnit 5.11.

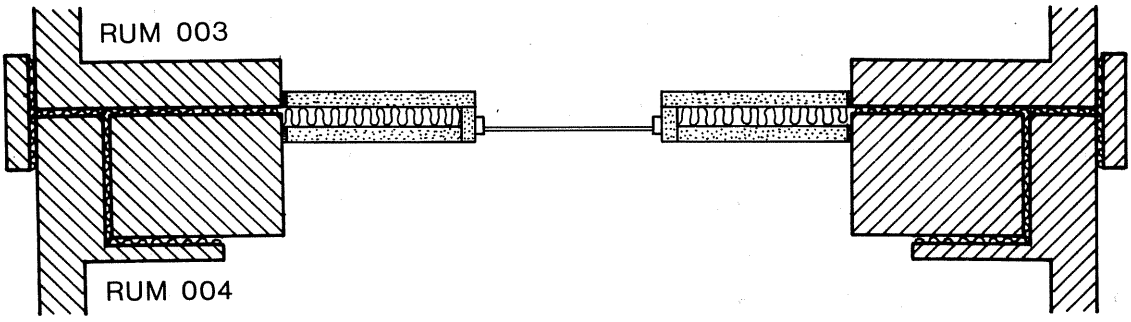
Målingerne er udført i rum 003 og 004 i bygning 355 på Danmarks tekniske Højskole. De to rum er opført med henblik på måling af reduktionstal for vægstore bygningsdele, men benyttes ofte til undersøgelse af mindre bygningskomponenter såsom døre og vinduer. I prøveåbningen opføres i så fald en væg med meget høj lydisolation, og i denne væg afsættes en ny, mindre prøveåbning bestemt af det aktuelle prøveemne. Beskrivelse af målerum og væg findes i afsnit 5.10. Væggens I_a- og R_w-værdi var 67 dB. Ved referencemålingen af væggen var prøveåbningen etableret, men udfyldt med elementer som den øvrige del af væggen.

5.10 Beskrivelse af målerum

Målingerne er udført i to lydhårde rum (004 og 003), der er opført ved siden af hinanden. Rummenes bredde er 6,25 m, og højden er 4,95 m. Rum 004 har en længde på 7,85 m, mens længden af rum 003 er 7,65 m. Mellem rummenes endevægge, hvis tykkelse er 10 cm henholdsvis 30 cm, findes en 80 cm tyk betonramme med en åbning, der måler 2,69 m i højden og 3,70 m i bredden. Rummenes øvrige vægge, loft og gulv er udført af 30 cm beton. Begge rummene og betonrammen er opført på separate fundamenter. På to af væggene og på loftet er der anbragt lyddiffuserende elementer af beton og af dæmpet stålplade, hvorefter rummenes volumener er henholdsvis ca. 230 m^3 (rum 004) og ca. 215 m^3 (rum 003). Et vandret snit i målerummene findes på figur 5.7. På figur 5.8 findes et lodret snit i rummene.



Vandret snit i målerum. Målestok 1:125.



Vandret snit i prøveåbning for vinduer. Målestok 1:50.

Figur 5.7 Tegning af målerum.

Vinduerne blev monteret i en prøveåbning i en væg, der var opført i åbningen i betonrammen. Væggen var udført som en 35 cm tyk dobbeltkonstruktion med mineraluld i hulrummet. Hver væghalvdel var opbygget af 10 cm tykke, 50 cm brede Gasbeton vægelementer sammenlimet med Plus lydlim og understøbt med cementmørtel. Mod betonrammens sider og top var fugerne elastiske. I prøveåbningen var der overfladebehandlet med spartelmasse, og fugen mellem de to væghalvdele var afspærret med elastisk fugemasse. Prøveåbningens afstand til betonrammens bund var 60 cm. Et vandret snit i væggen findes på figur 5.7.

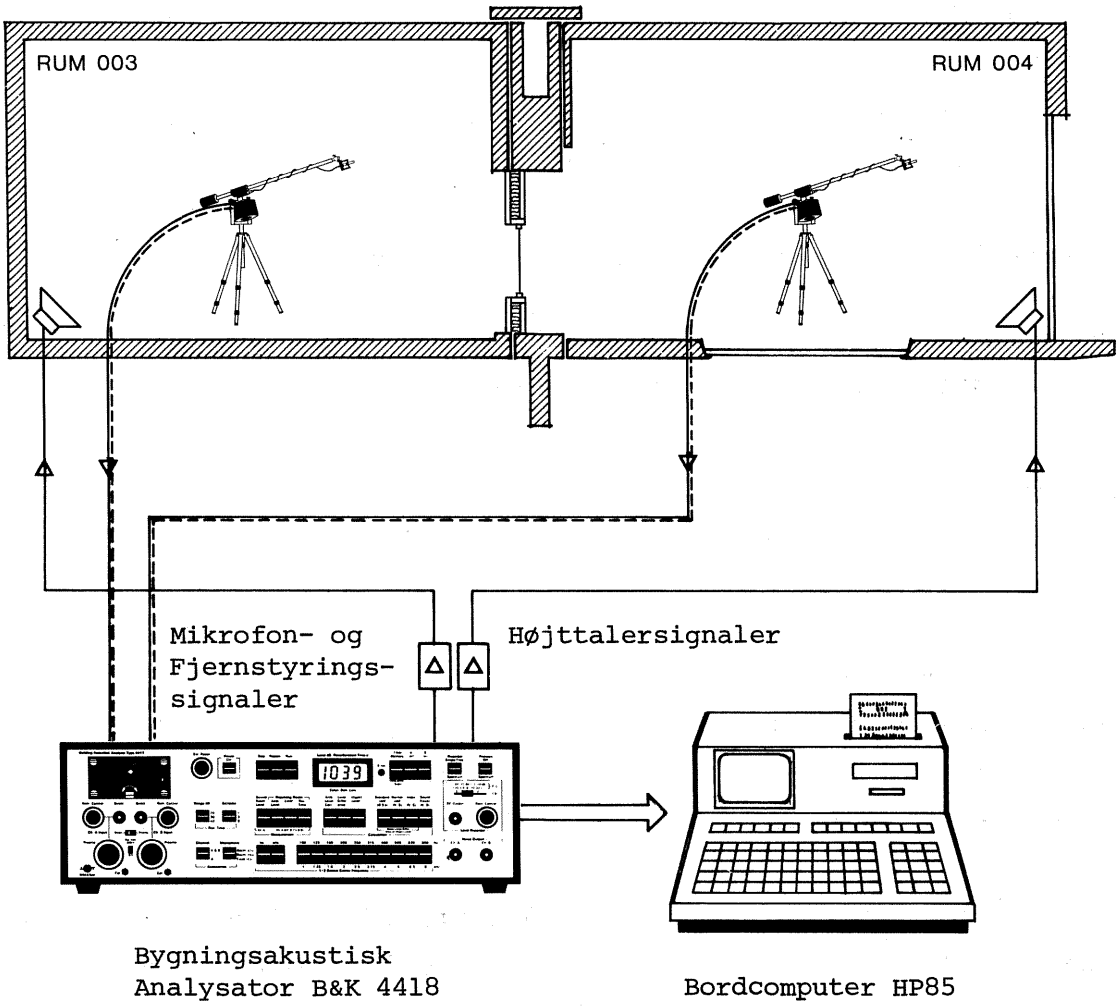
5.11 Måleprocedure

Ved målingerne af reduktionstal blev benyttet en måleopstilling som vist på figur 5.8.

Målingen blev udført sekventielt i 1/3 oktavbånd fra 100 Hz til 5000 Hz. Der blev benyttet to mikrofonsvingarme med skrå bane. Baneradius var ca. 1,25 m.

Målingen blev foretaget med 1/3 oktav båndbegrænset lyserød støj, der blev udsendt gennem et højttalersystem anbragt i et hjørne i senderummet. Lydtrykniveauet i henholdsvis sende- og modtagerum blev bestemt inden for en måletid på 16 sekunder svarende til ét omløb for de roterende mikrofoner. Ved målingerne blev benyttet filtre med en båndbredde på 1/3 oktav både på højttalersignalet og på mikrofonsignalet.

Modtagerummets ækvivalente absorptionsareal blev bestemt ved hjælp af Sabines formel ud fra måling af rummets efterklangstid. Målingen af efterklangstiden blev foretaget med 1/3 oktav båndbegrænset lyserød støj, der blev udsendt gennem et højttalersystem anbragt i et hjørne i modtagerummet. Efterklangstiden blev målt i 3 positioner på mikrofonbanen. Det 1/3 oktav filtrerede mikrofonsignal blev registreret under efterklangsprocessen og vurderet i området ca. 5 dB til ca. 25 dB under det stationære støjsignal.



Figur 5.8 Principtegning af måleopstilling

Reduktionstallet blev bestemt - som middel af to komplette målinger med de samme mikrofonbaner, men med forskellige måleretninger - inden for frekvensbåndbredder på 1/3 oktav med følgende standardiserede centerfrekvenser: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 og 5000 Hz (i DS/ISO 140/3-1978 er kun foreskrevet måling ved frekvenser op til 3150 Hz).

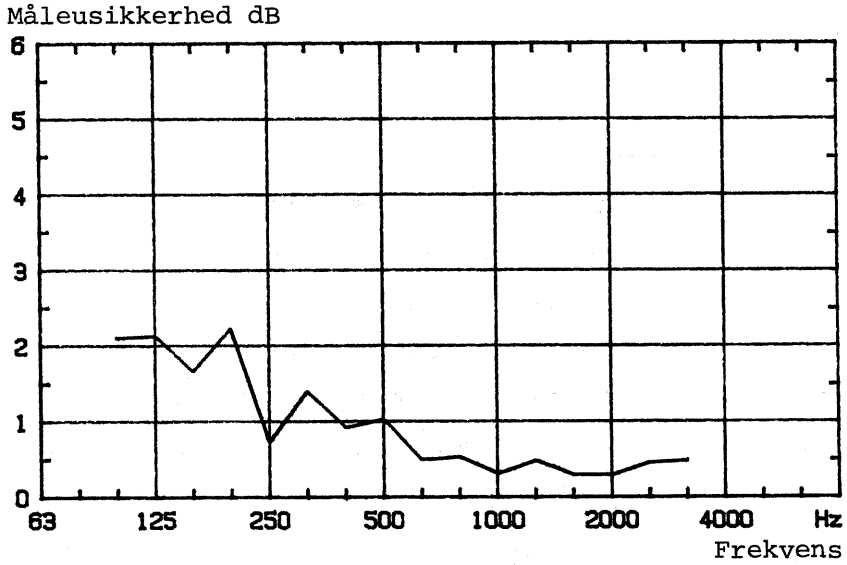
Måleproceduren opfylder DS/ISO 140/2's krav til målenøjagtighed. Måling af reduktionstal i begge retninger er udført for at få en god målenøjagtighed. Reduktionstallet er principielt uafhængigt af måleretningen. Ved at vende måleretningen opnås - med mindre tidsforbrug - samme måletekniske fordele som ved flytning af mikrofonbane og højttaler.

Følgende instrumenter blev anvendt ved målingerne:

Instrument	Type	LI nr.
Bygningsakustisk analysator	B&K 4418	757
Målemikrofon	B&K 4144	717
Målemikrofon	B&K 4144	730
Mikrofonforforstærker	B&K 2619	621
Mikrofonforforstærker	B&K 2619	719
Mikrofonsvingarm	B&K 3923	665
Mikrofonsvingarm	B&K 3923	715
Mikrofonspændingsforsyning	B&K 2804/5217	620
Mikrofonspændingsforsyning	B&K 2804/WH1051	721
Akustisk kalibrator	B&K 4230	646

De målte lydtrykniveauer og efterklangstider blev transmitteret fra B&K 4418 til en bordcomputer type HP85. Beregningerne af reduktionstal og vurderingsværdier blev udført ved hjælp af HP85'eren.

Ved en sammenligning af måleresultaterne indbyrdes er det naturligvis relevant at kende måleusikkerheden ("repeterbarheden") ved målingerne, dvs. de forskelle i måleresultater, der kan opstå ved en ny måling på samme prøveemne [29]. Denne måleusikkerhed afhænger af prøveemne og måleprocedure og er ikke beregnet i forbindelse med de aktuelle målinger. Fra en anden undersøgelse, hvor der er benyttet samme måleprocedure og lignende prøveemner, findes imidlertid nogle beregninger, se figur 5.9. Forskellen mellem to måleresultater fra gentagne målinger (med kort tidsinterval) på samme prøveemne kunne med 95%'s sandsynlighed forventes at ligge under de angivne værdier.



Figur 5.9 Måleusikkerhed (skønnet) ved målingerne af reduktionstal.

Den afbildede måleusikkerhed kan ikke benyttes som et mål for, hvor godt måleresultater kan reproduceres for andre prøveemner og/eller i et andet laboratorium.

6. MÅLERESULTATER

6.1 Generelle bemærkninger

I afsnit 6.3-6.11 er præsenteret hovedresultater fra den eksperimentelle undersøgelse. I diagrammer med grafiske afbildninger er vist måleresultater, der illustrerer betydningen af glastykkelser, laminering, glasafstand og hulrumsfyldning samt af indbygningen i en fast karm eller et oplukkeligt vindue. I afbildningerne er vist reduktionstal pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-5000 Hz.

Til afbildningerne er så vidt muligt valgt måleresultater, der viser typiske resultater eller tendenser. Generelt skal der ikke lægges for megen vægt på forskelle ved enkelte frekvenser, men mere ses på kurvernes principielle forløb. I enkelte tilfælde ville en kontrol på flere prøveemner være ønskelig (f.eks. ved undersøgelsen af gasblandinger), men det har ikke været muligt inden for undersøgelsens rammer.

I figurtekster mv. benyttes betegnelsen "gas" eller "gasfyldning" ofte som synonym for luftarten SF_6, og atm. luft betegnes blot som "luft".

I afbildningerne er der i mange tilfælde som udgangspunkt (reference) vist resultaterne for en termorude af 8 + 4 mm glas, da disse glastykkelser i en årrække har været typiske for en "termolydrude".

Målingerne på det oplukkelige vindue er udført på A) vinduet uden ekstra tætninger, B) vindue med tape-tætning indvendigt og C) vindue med tape-tætning både indvendigt og udvendigt. I afbildningerne af måleresultater er hovedsageligt benyttet C svarende til, hvad der kan opnås for et oplukkeligt vindue med 2 effektive tætningsplaner.

Alle målinger er udført på vinduer i størrelsen 12M × 12M, som anbefales i DS 1084 ved udførelse af laboratoriemålinger på facadevinduer, der ønskes klassificeret. Andre størrelser og kantforhold giver ikke nødvendigvis samme resultater [3].

Ikke alle måleresultater er afbildet i diagrammer, men i tabellerne i afsnit 6.2 findes oversigter over R_w-værdier mv. for samtlige målinger. I den foreliggende rapport benyttes R_w-værdien som et mål for vinduets ydeevne m.h.t. lydisolation, jvf. afsnit 2.

6.2 Oversigter over resultater

På de efterfølgende sider findes oversigter over resultater i form af forskellige vurderingsværdier. Som angivet i bl.a. afsnit 3.3 anvendes det vægtede reduktionstal R_w som grundlag for klassifikation af vinduer efter DS 1084-1982. For at lette eventuelle sammenligninger med ældre målinger er der tillige angivet index for luftlydisolation $I_{a,lab}$.

$I_{a,lab}$ beregnes efter metoden i ISO/R 717-1968 [13]. R_w beregnes efter DS 2186.3-1982 [6]. Sammen med R_w er angivet den maksimale ugunstige afvigelse i forhold til vurderingskurven. Vurderingsmetoderne er beskrevet i afsnit 3. Vurderingsværdier beregnes på basis af reduktionstallet pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz. I_a og R_w er pr. definition hele tal. R_w-værdier er dog også angivet med 1 decimal for at muliggøre bedre sammenligninger af resultater for forskellige konstruktioner.

Måleresultaterne for de bedst lydisolerende termoruder er i nogen grad influeret af lydtransmission gennem karmen/rammen. Af hensyn til undersøgelsens helhed er alle ruder alligevel monteret i de samme vinduestyper, idet forringelsen af reduktionstallet fandt sted i mellemfrekvensområdet, der ikke er afgørende for hovedresultaterne af undersøgelsen. Det vurderedes, at forringelsen af R_w-værdien ikke oversteg ca. 1 dB.

Vinduernes størrelse er 12M × 12M svarende til, at den frie vinduesåbning måler 1210 mm × 1210 mm.

I tabel 6.1 og 6.2 findes resultater for ruder monteret i fast karm. Termorudens størrelse er 1124 mm × 1124 mm. Resultaterne

i tabel 6.1 (rudefabrikat II) viser primært betydningen af forskellige gasblandinger. Resultaterne i tabel 6.2 (rudefabrikat I) repræsenterer størstedelen af den eksperimentelle undersøgelse.

Resultater for nogle udvalgte rudetyper (fabrikat I) monteret i et oplukkeligt vindue findes i tabel 6.3. Rudestørrelsen er 1028 mm × 1015 mm.

Der er anvendt følgende terminologi ved angivelse af en rudes opbygning (mål i rum):

glastykkelse - glasafstand - glastykkelse

Ved beskrivelse af laminater angives tykkelserne af de glaslag og lamineringsmaterialer, laminatet består af (mål i rum):

glastykkelse/lam. mat. tykkelse/glastykkelse

En detaljeret beskrivelse af prøveemnerne findes i afsnit 5.

2-lags termorude [mm]	Hulrums-fyldning		Vægt	Tyk-kelse	$I_{a,lab}$	R_w / Δ_{max}	R_w (1 dec.)
	SF_6/Ar	Andet	[kg/m^2]	[mm]	[dB]	[dB / dB]	[dB]
8-12-4	100/0		30	24	33	35 / 9,7	35,6
8-12-4	75/25		-	-	34	35 / 8,4	35,6
8-12-4	50/50		-	-	34	35 / 8,8	35,1
8-12-4	25/75		-	-	34	34 / 6,8	34,7
8-12-4	0/100		-	-	34	34 / 7,6	34,5
8-12-4		Krypton	-	-	32	34 / 9,3	34,3
4-6-4		Luft	20	14	30	30 / 8,0	30,2
4-12-4		Luft	20	20	28	29 / 8,3	29,5
8-6-4		Luft	30	18	34	34 / 7,2	34,4
8-12-4		Luft	30	24	34	34 / 6,7	34,9
4/0,4/4-6-4		Luft	30	18	35	35 / 7,3	35,4
4/0,4/4-12-4		Luft	30	24	35	35 / 8,0	35,3

Tabel 6.1 Oversigt over målt $I_{a,lab}$ og R_w for supplerende målinger på 2-lags termoruder i fast karm. Rudefabrikat II.

2-lags termorude	Hul-rums-fyld-ning	Vægt [kg/m²]	Tyk-kelse [mm]	$I_{a,lab}$ [dB]	R_w / Δ_{max} [dB]	R_w (1 dec.) [dB]	Bemærkninger
4-12-4	Luft	20	20	29	31 / 9,1	31,5	1) 2)
	SF_6			28	32 / 11,7	32,9	2)
6-6-4	Luft	25	16	35	35 / 5,9	35,0	
	SF_6			26	33 / 14,2	33,4	
6-9-4	Luft	25	19	35	35 / 6,9	35,1	
	SF_6			31	34 / 10,7	34,7	
6-12-4	Luft	25	22	35	35 / 5,4	35,4	2)
	SF_6			33	35 / 9,5	35,7	2)
6-16-4	Luft	25	26	35	35 / 6,2	35,6	
	SF_6			35	36 / 8,6	36,7	
6-20-4	Luft	25	30	35	36 / 8,1	36,2	
	SF_6			37	37 / 6,6	37,7	
6-12-6	Luft	30	24	32	32 / 6,0	32,8	
	SF_6			32	33 / 9,0	33,1	
8-4-4	Luft	30	16	35	35 / 7,8	35,3	
	SF_6			28	34 / 13,8	34,7	
8-6-4	Luft	30	18	35	35 / 6,4	35,6	1) 2)
	SF_6			29	34 / 12,1	34,5	2)
8-9-4	Luft	30	21	34	35 / 8,8	35,5	
	SF_6			32	35 / 10,3	35,2	
8-12-4	Luft	30	24	35	35 / 6,1	35,9	1) 2)
	SF_6			33	36 / 10,5	36,0	2)
8-16-4	Luft	30	28	36	36 / 6,0	36,6	
	SF_6			37	37 / 7,8	37,6	
8-20-4	Luft	30	32	37	37 / 5,7	37,5	1) 2)
	SF_6			38	38 / 4,6	38,6	2)
8-24-4	Luft	30	36	38	38 / 6,1	38,5	
	SF_6			40	40 / 5,2	40,4	
8-12-8	Luft	40	28	34	34 / 6,3	34,2	
	SF_6			32	32 / 6,1	32,9	
4/2/4-6-4	Luft	32	20	37	37 / 6,4	37,5	
	SF_6			32	38 / 13,4	38,5	
4/2/4-9-4	Luft (SF_6)	32	23	35	37 / 9,4	37,3	Gasfyldning mangler
4/2/4-12-4	Luft	32	26	36	38 / 9,1	38,1	
	SF_6			34	39 / 12,5	39,2	
4/2/4-16-4	Luft	32	30	38	38 / 6,2	38,0	
	SF_6			38	40 / 9,4	40,5	
4-12-4	Argon	20	20	30	30 / 6,6	30,6	
8-6-4	Argon	30	18	34	34 / 7,2	34,6	
8-12-4	Argon	30	24	35	35 / 7,9	35,4	
8-24-4	Argon	30	36	38	38 / 6,6	38,3	

1) Ruden er også målt med Argon som hulrumsfyldning. Se nederst i tabellen.

2) Samme rudetype er også målt i oplukkeligt vindue, se tabel 6.3.

Tabel 6.2 Oversigt over målt $I_{a,lab}$ og R_w for 2-lags termoruder i fast karm. Rudefabrikat I.

2-lags termorude [mm]	Hulrums-fyldning	Vægt [kg/m²]	Tyk-kelse [mm]	Karm/ ramme-fuge	$I_{a,lab}$ [dB]	R_w / Δ_{max} [dB / dB]	R_w (1 dec.) [dB]
4-12-4	Luft	20	20	A	33	33 / 6,3	33,7
	-			B	33	33 / 6,6	33,9
	-			C	33	33 / 6,4	33,8
	SF_6			A	30	33 / 10,5	33,3
	-			B	30	33 / 10,6	33,6
	-			C	30	33 / 10,7	33,5
6-12-4	Luft	25	22	A	36	36 / 4,8	36,9
	-			B	37	37 / 5,7	37,0
	-			C	38	38 / 6,6	38,0
	SF_6			A	37	37 / 7,3	37,2
	-			B	37	37 / 6,9	37,4
	-			C	38	38 / 7,9	38,1
8-6-4	Luft	30	18	A	37	37 / 6,5	37,0
	-			B	37	37 / 6,2	37,1
	-			C	38	38 / 7,3	38,0
	SF_6			A	33	35 / 9,7	35,9
	-			B	32	36 / 11,3	36,0
	-			C	32	36 / 11,5	36,5
8-12-4	Luft	30	24	A	37	37 / 5,8	37,7
	-			B	37	37 / 5,5	37,9
	-			C	38	38 / 5,6	38,8
	SF_6			A	37	37 / 5,8	37,6
	-			B	37	37 / 5,9	37,9
	-			C	38	38 / 6,7	38,9
8-20-4	Luft	30	32	A	38	38 / 7,4	38,0
	-			B	38	38 / 8,0	38,2
	-			C	39	39 / 7,8	39,2
	SF_6			A	39	39 / 4,4	39,4
	-			B	39	39 / 4,4	39,4
	-			C	40	40 / 5,4	40,8

A = Uden tape over karm/ramme-fuge.
B = Tape over karm/ramme-fuge indvendig.
C = Tape over karm/ramme-fuge indvendig + udvendig.

Tabel 6.3 Oversigt over målt $I_{a,lab}$ og R_w for 2-lags termoruder i oplukkeligt vindue (vendevindue med 1 tætningsliste). Rudefabrikat I.

6.3 Glastykkelser, symmetriske ruder

En almindelig 2-lags termorude består af 2 glaslag i samme tykkelse, normalt 3 eller 4 mm. Det giver en dårlig lydisolation, fordi ruden er let. En bedre lydisolation opnås traditionelt ved at benytte en tungere konstruktion.

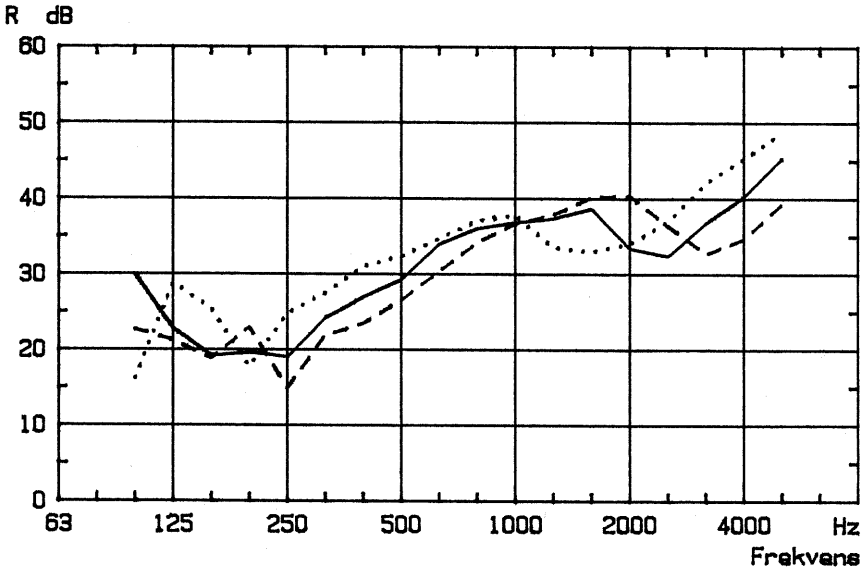
Produktionsteknisk er det fordelagtigt med ens glastykkelser. Ens glas anvendes derfor normalt, når tykkere glas er nødvendigt på grund af rudeformat, vindbelastning mv.

På figur 6.1 er vist reduktionstalskurver for luftfyldte, symmetriske ruder med glastykkelserne 4, 6 og 8 mm. De tilsvarende resultater for ruder med SF_6 er vist på figur 6.2.

Ved de lave frekvenser er kurveforløbene præget af blandt andet rudernes resonansdyk. Ved de høje frekvenser er der tydelige dyk omkring koincidensfrekvenserne 1500, 2000 og 3000 Hz for henholdsvis 8, 6 og 4 mm glas. I mellemfrekvensområdet afhænger kurvernes hældning af hulrumsfyldningen, og der fås som forventet en kurvehældning på 7-8 dB/oktav for luftfyldte ruder og væsentligt mere for gasfyldte ruder.

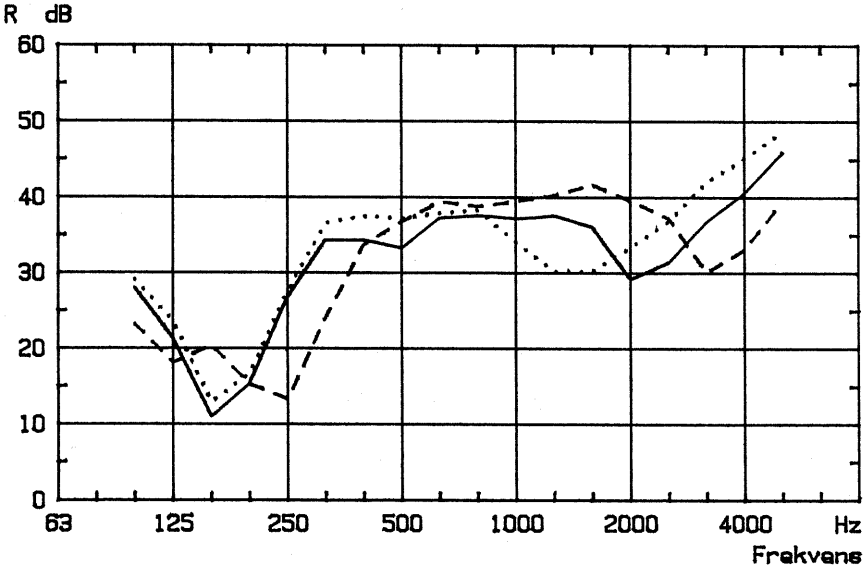
I mellemfrekvensområdet var det forventet, at reduktionstallet ville stige med 6-7 dB ved ændring af glastykkelserne fra 4 til 6 mm (svarende til en faktor 1,5 på massen) og med 10-12 dB ved ændring fra 4 til 8 mm (svarende til en massefordobling). For de luftfyldte ruder vokser reduktionstallet systematisk med glastykkelsen, men mindre end forventet, kun 7-8 dB ved massefordobling. Reduktionstalskurverne for de gasfyldte ruder viser ikke samme systematik. Ved massefordobling fås som ventet ca. 12 dB forøgelse i et vist frekvensområde over resonansfrekvensen. Næsten samme vækst opnås imidlertid uventet - og uforklarligt - med en faktor 1,5 på massen, og dette resultat bør derfor eftervises, inden det tillægges for megen vægt.

En sammenligning af R_w-værdierne for de symmetriske ruder viser, at de luftfyldte ruders lydisolation vokser lidt med glastykkelserne, mens der opnås ens R_w-værdier for de gasfyldte ruder.



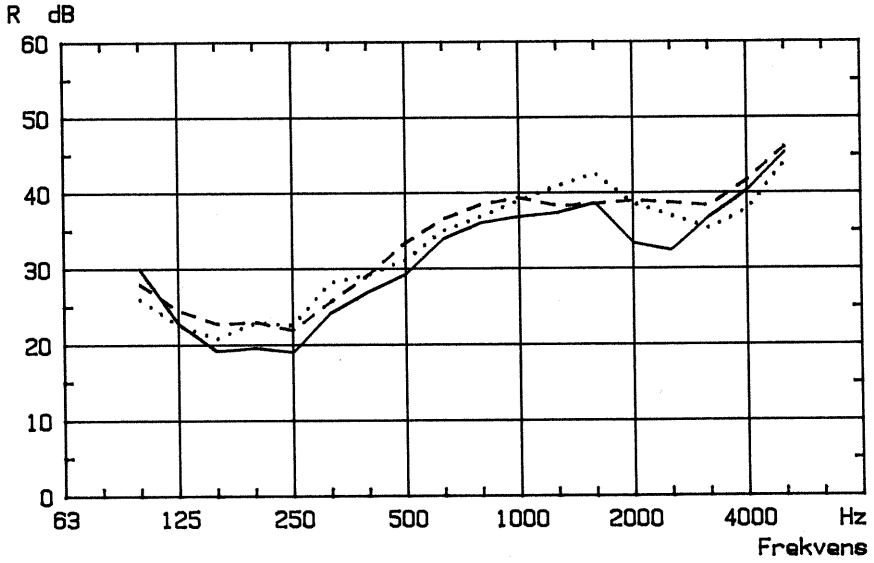
Figur 6.1 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for symmetriske, 2-lags termoruder af hhv. 4, 6 og 8 mm glas. Atm. luft i hulrum.

- - - - - - -	F 4-12-4 Luft	R_w = 31 dB	Δ_{max} = 9,1 dB ;	R_w(dec) = 31,5 dB
————	F 6-12-6 Luft	R_w = 32 dB	Δ_{max} = 6,0 dB ;	R_w(dec) = 32,8 dB
.....	F 8-12-8 Luft	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 6,3 dB ;	R_w(dec) = 34,2 dB



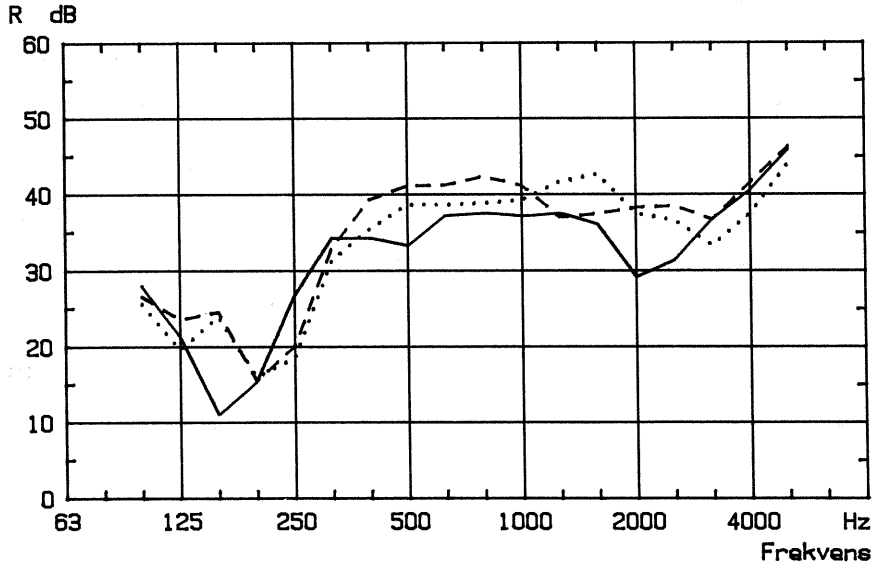
Figur 6.2 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for symmetriske, 2-lags termoruder af hhv. 4, 6 og 8 mm glas. SF_6 i hulrum.

- - - - - - -	F 4-12-4 SF_6	R_w = 32 dB	Δ_{max} = 11,7 dB ;	R_w(dec) = 32,9 dB
————	F 6-12-6 SF_6	R_w = 33 dB	Δ_{max} = 9,0 dB ;	R_w(dec) = 33,1 dB
.....	F 8-12-8 SF_6	R_w = 32 dB	Δ_{max} = 6,1 dB ;	R_w(dec) = 32,9 dB



Figur 6.3 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termoruder med 3 forskellige glaskombinationer og atm. luft i hulrum:
2 asymmetriske ruder, vægt hhv. 25 og 30 kg/m^2
1 symmetrisk rude, vægt 30 kg/m^2

.....	F 6-12-4 Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 5,4 dB ;	R_w(dec) = 35,4 dB
- - - - - - -	F 8-12-4 Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 6,1 dB ;	R_w(dec) = 35,9 dB
————	F 6-12-6 Luft	R_w = 32 dB	Δ_{max} = 6,0 dB ;	R_w(dec) = 32,8 dB



Figur 6.4 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termoruder med 3 forskellige glaskombinationer og SF_6 i hulrum:
2 asymmetriske ruder, vægt hhv. 25 og 30 kg/m^2
1 symmetrisk rude, vægt 30 kg/m^2

.....	F 6-12-4 SF_6	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 9,5 dB ;	R_w(dec) = 35,7 dB
- - - - - - -	F 8-12-4 SF_6	R_w = 36 dB	Δ_{max} = 10,5 dB ;	R_w(dec) = 36,0 dB
————	F 6-12-6 SF_6	R_w = 33 dB	Δ_{max} = 9,0 dB ;	R_w(dec) = 33,1 dB

6.4 Glastykkelser, asymmetriske ruder

En forøget glastykkelse medfører en lavere koincidensfrekvens (se afsnit 4.5), hvilket er uheldigt for lydisolationen. Når begge glaslag i en termorude har samme tykkelse, bliver koincidensdykket særligt udpræget på grund af symmetrien. Dette kan undgås ved at anvende glas med forskellige tykkelser.

På figur 6.3 og 6.4 er vist reduktionstalskurver for henholdsvis luft- og gasfyldte termoruder af:

6 + 4 mm glas, totalvægt 25 kg/m^2
8 + 4 mm glas, totalvægt 30 kg/m^2
6 + 6 mm glas, totalvægt 30 kg/m^2

Det ses, at de asymmetriske ruder - som tilsigtet - ikke har dybe koincidensdyk. Det er desuden værd at bemærke, at asymmetrien medfører højere reduktionstal ved næsten alle frekvenser - også for ruden af 6 + 4 mm glas, der vejer mindre end den symmetriske rude af 2 lag 6 mm glas.

Måleresultaterne viser, at en forøgelse af en glastykkelse vil kunne medføre bedre, uændret eller ringere lydisolation - afhængigt af rudens opbygning og den påtænkte ændring.

Med ovennævnte ruder som eksempler og udgangspunkt i ruden af 6 + 4 mm glas ses, at en 2 mm forøgelse af det "tykke" glas giver en næsten uændret R_w-værdi, mens en tilsvarende ændring af det "tynde" glas medfører en forringelse på ca. 3 dB!

Omvendt fås en forbedret lydisolation, når en symmetrisk rude ændres, så glastykkelserne bliver forskellige.

6.5 Glastykkelsernes betydning - flere resultater

Måleresultaterne på figur 6.3 og 6.4 viser tydeligt, at der med hensyn til lydisolation kan opnås en stor gevinst ved et "rigtigt" valg af glastykkelser.

Med henblik på anvendelsen af resultaterne i praksis er det hensigtsmæssigt at sammenligne reduktionstal for termoruder med følgende glastykkelser:

- 4 + 4 mm glas
- 6 + 4 mm glas
- 8 + 4 mm glas

På figur 6.5 og 6.6 er vist resultatsammenstillinger for henholdsvis luft- og gasfyldte ruder i fast karm. Resultater for de samme rudetyper monteret i et oplukkeligt, tæt vindue findes på figur 6.7 og 6.8.

Ved sammenligning af R_W-værdierne for de 12 målinger ses, at

- R_W-værdien for en 6-12-4 termorude er 3-4 dB højere end for en 4-12-4 rude,
- R_W-værdien for en 8-12-4 termorude er kun ½-1 dB højere end for en 6-12-4 rude.

Disse konklusioner er bekræftet ved målinger på samme glaskombinationer, men andre hulrumsdybder.

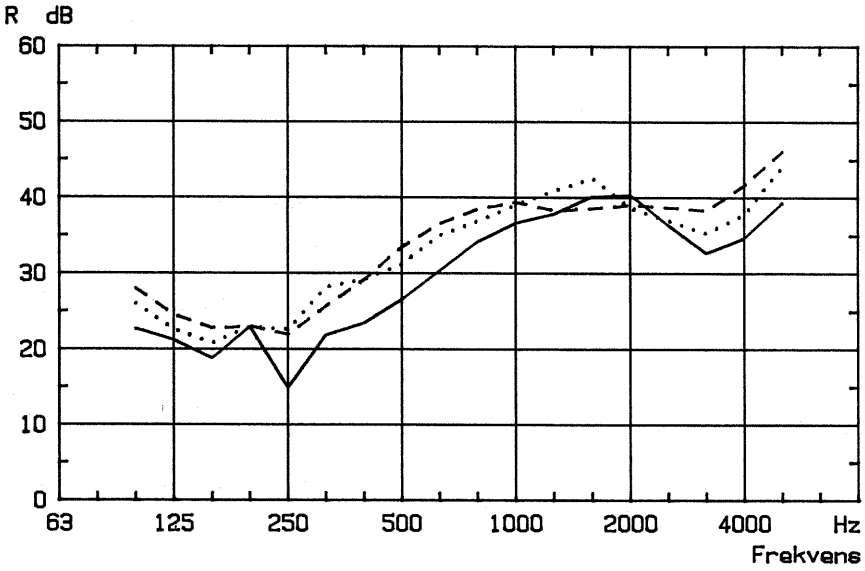
I tilfælde, hvor der ønskes en højere lydisolation, end der kan opnås med en almindelig "varmeisoleringsrude" 4-12-4, kan en afgørende forbedring altså opnås med en 6-12-4 rude. Anvendelse af en 8-12-4 rude giver kun lidt, men dog systematisk højere resultater, hvilket kan være påkrævet, såfremt en bestemt R_W-værdi ønskes opnået.

6.6 Laminering

Undersøgelsen af lamineringens betydning omfatter målinger på termoruder af 8 + 4 mm glas med laminering* af det tykke glas. Der er hovedsageligt undersøgt laminering med blød acryl, som er mest effektivt (og dyrest).

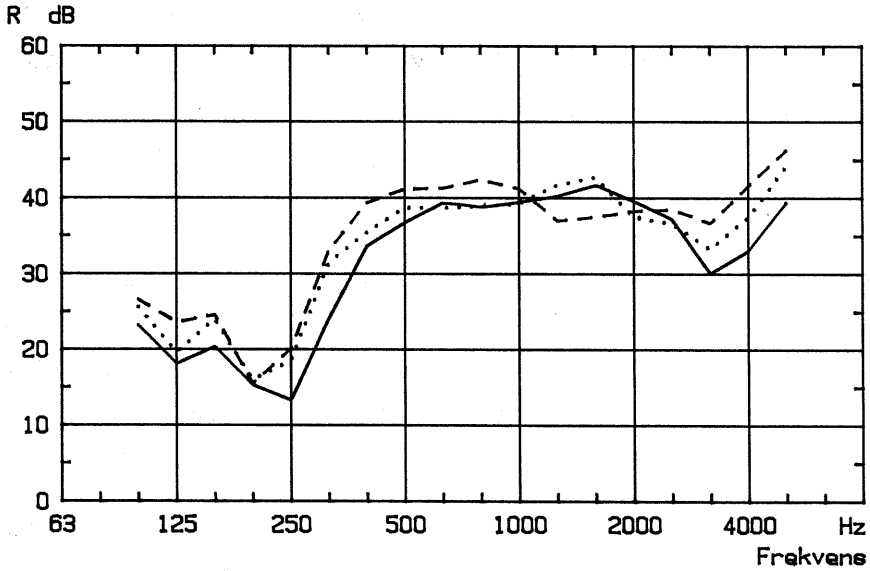
Typiske eksempler på lamineringens indflydelse på lydisolationen er vist på figur 6.9 og 6.10, hvor reduktionstalskurver for en 8-16-4 termorude og en 4/2/4-16-4 termorude er sammenlignet. Der ses - som forventet - en tydelig effekt ved frekvenser over 1250 Hz (koincidensfrekvensen for 8 mm glas er ca. 1500 Hz). Derimod fås der ikke en forøgelse af reduktionstallet ved lavere frekvenser.

*Terminologi vedrørende laminater er beskrevet i afsnit 6.2.



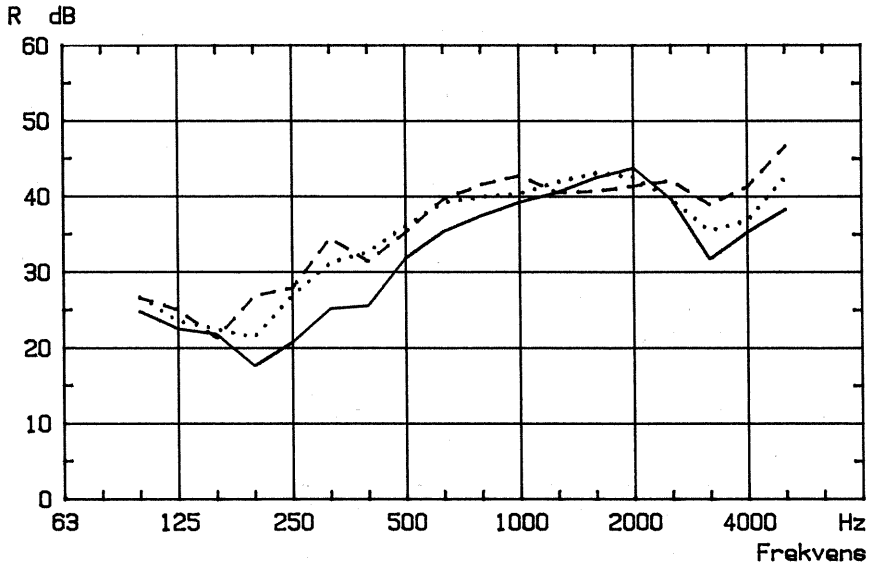
Figur 6.5 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termoruder opbygget af ét lag 4 mm glas og ét lag glas i hhv. 4, 6 og 8 mm's tykkelse. Atm. luft i hulrum.

————	F 4-12-4 Luft	R_w = 31 dB	Δ_{max} = 9,1 dB ;	R_w(dec) = 31,5 dB
·····	F 6-12-4 Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 5,4 dB ;	R_w(dec) = 35,4 dB
– – – – – –	F 8-12-4 Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 6,1 dB ;	R_w(dec) = 35,9 dB



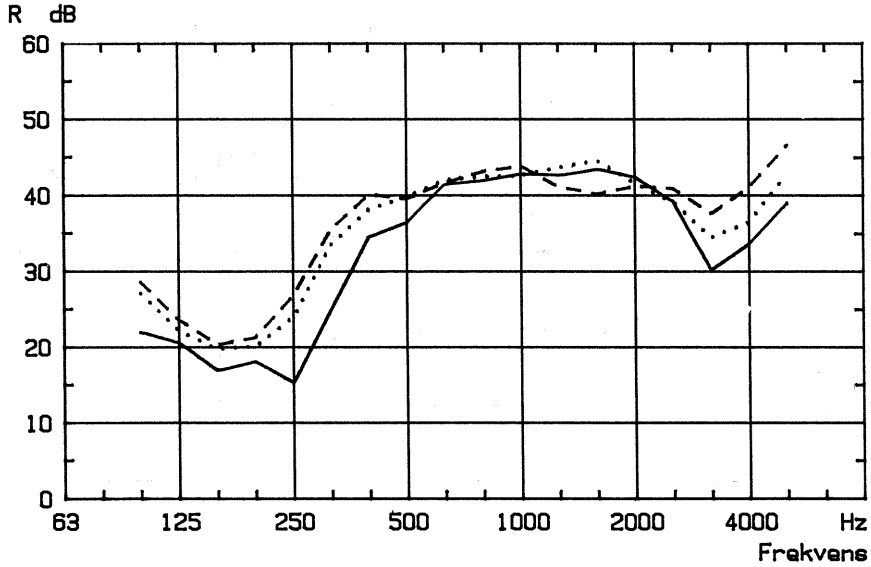
Figur 6.6 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termoruder opbygget af ét lag 4 mm glas og ét lag glas i hhv. 4, 6 og 8 mm's tykkelse. SF_6 i hulrum.

————	F 4-12-4 SF_6	R_w = 32 dB	Δ_{max} = 11,7 dB ;	R_w(dec) = 32,9 dB
·····	F 6-12-4 SF_6	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 9,5 dB ;	R_w(dec) = 35,7 dB
– – – – – –	F 8-12-4 SF_6	R_w = 36 dB	Δ_{max} = 10,5 dB ;	R_w(dec) = 36,0 dB



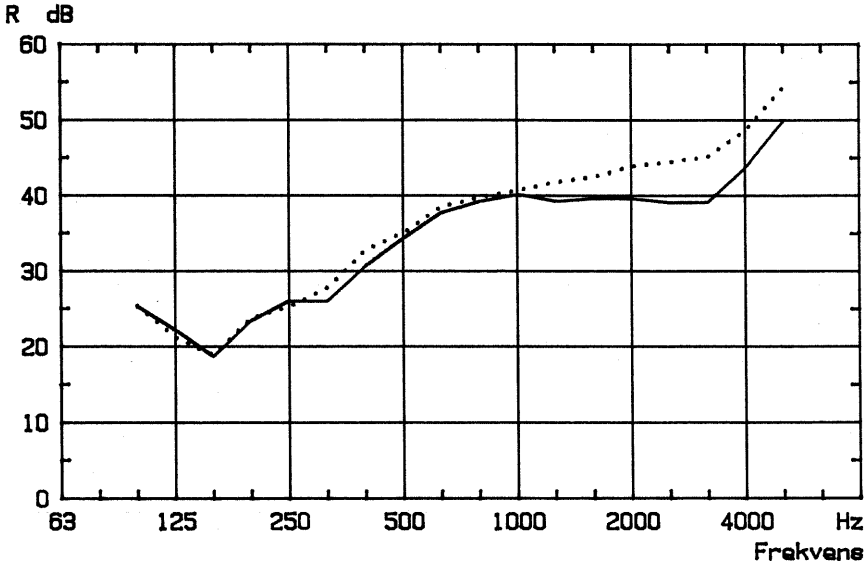
Figur 6.7 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termoruder i oplukkeligt, tæt vindue. Termoruder opbygget af ét lag 4 mm glas og ét lag glas i hhv. 4, 6 og 8 mm's tykkelse. Atm. luft i hulrum.

————	o 4-12-4 Luft	R_w = 33 dB	Δ_{max} = 6,4 dB ;	R_w(dec) = 33,8 dB
.....	o 6-12-4 Luft	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 6,6 dB ;	R_w(dec) = 38,0 dB
- - - - - - -	o 8-12-4 Luft	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 5,6 dB ;	R_w(dec) = 38,8 dB



Figur 6.8 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termoruder i oplukkeligt, tæt vindue. Termoruder opbygget af ét lag 4 mm glas og ét lag glas i hhv. 4, 6 og 8 mm's tykkelse. SF_6 i hulrum.

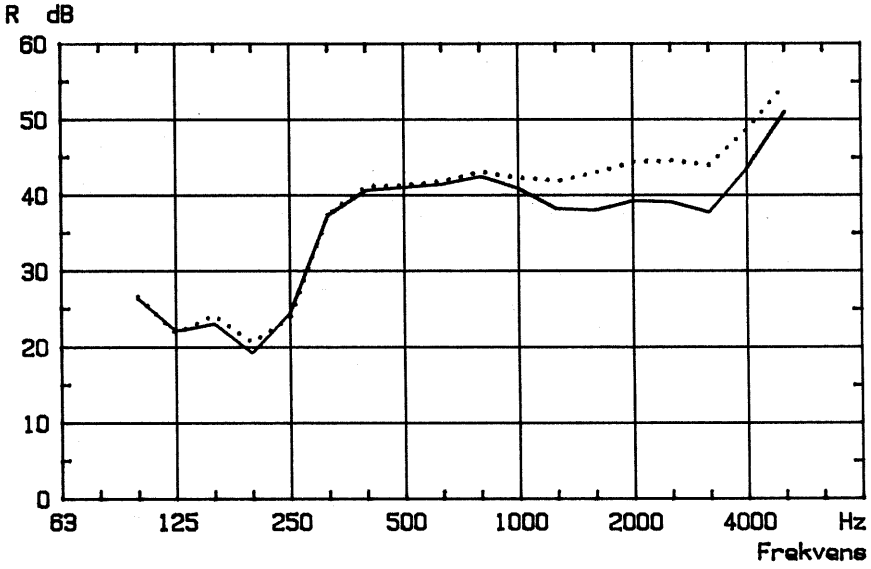
————	o 4-12-4 SF_6	R_w = 33 dB	Δ_{max} = 10,7 dB ;	R_w(dec) = 33,5 dB
.....	o 6-12-4 SF_6	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 7,9 dB ;	R_w(dec) = 38,1 dB
- - - - - - -	o 8-12-4 SF_6	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 6,7 dB ;	R_w(dec) = 38,9 dB



Figur 6.9 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for luftfyldt termorude med og uden laminering af det ene glas.

——————— F 8-16-4 Luft R_w = 36 dB Δ_{max} = 6,0 dB; R_w(dec) = 36,6 dB

..... F 4/2/4-16-4 Luft R_w = 38 dB Δ_{max} = 6,2 dB; R_w(dec) = 38,0 dB



Figur 6.10 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for gasfyldt termorude med og uden laminering af det ene glas.

——————— F 8-16-4 SF_6 R_w = 37 dB Δ_{max} = 7,8 dB; R_w(dec) = 37,6 dB

..... F 4/2/4-16-4 SF_6 R_w = 40 dB Δ_{max} = 9,4 dB; R_w(dec) = 40,5 dB

De tilsvarende målinger på ruder med 6, 9 og 12 mm glasafstand viser samme tendenser. Der kan generelt kun spores en svag tendens til, at laminering forbedrer reduktionstallet ved lave frekvenser. I [3] er der vist en sammenligning af reduktionstal for en 8-12-4 rude og en 4/4-15-4 rude (begge gasfyldte), og lamineringen er fejlagtigt tillagt en effekt, som sandsynligvis skyldes den forøgede glasafstand, jvf. afsnit 6.7 i nærværende rapport.

Lamineringsmaterialer af PVB-folie er noget tyndere og mindre effektive. Virkningen af den tyndeste folie, 0,38 mm PVB-folie, blev undersøgt ved nogle enkelte supplerende forsøg på luftfyldte ruder 4/0,4/4-6-4 og 4/0,4/4-12-4. Ved de høje frekvenser opnåedes ca. 2 dB højere reduktionstal, og R_W-værdierne forøgedes med ½-1 dB.

Lamineringen med 2 mm blød acryl gav ved de høje frekvenser 4-7 dB højere reduktionstal end ikke-laminerede ruder, se f.eks. figur 6.9 og 6.10. R_W-værdierne steg 2-4 dB, mest for de gasfyldte ruder.

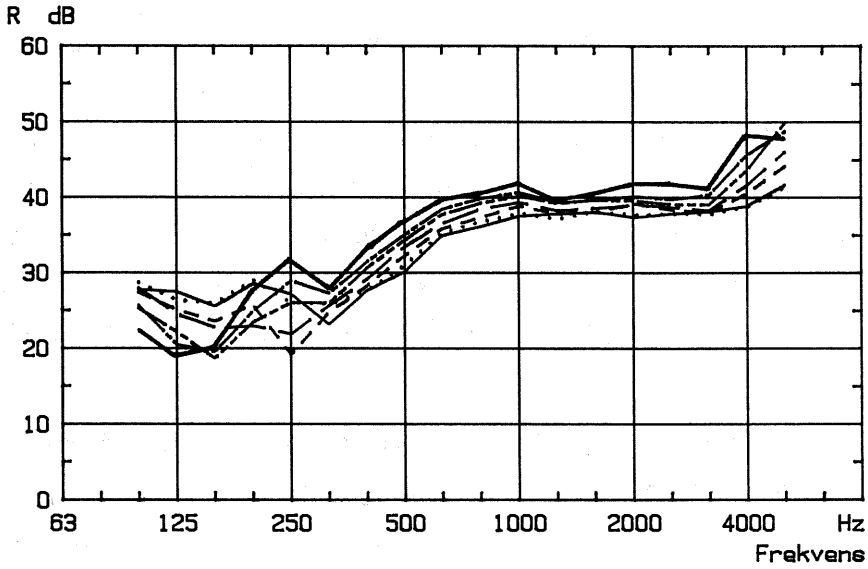
6.7 Glasafstand

Der er udført målinger på termoruder med glasafstande (hulrumsdybder) på 4, 6, 9, 12, 16, 20 og 24 mm. Resultaterne for luft- og gasfyldte ruder af 8 + 4 mm glas er vist på henholdsvis figur 6.11 og 6.12.

Der ses en meget systematisk sammenhæng mellem glasafstand og kurveforløb. Som forventet er denne sammenhæng mest klar i mellemfrekvensområdet.

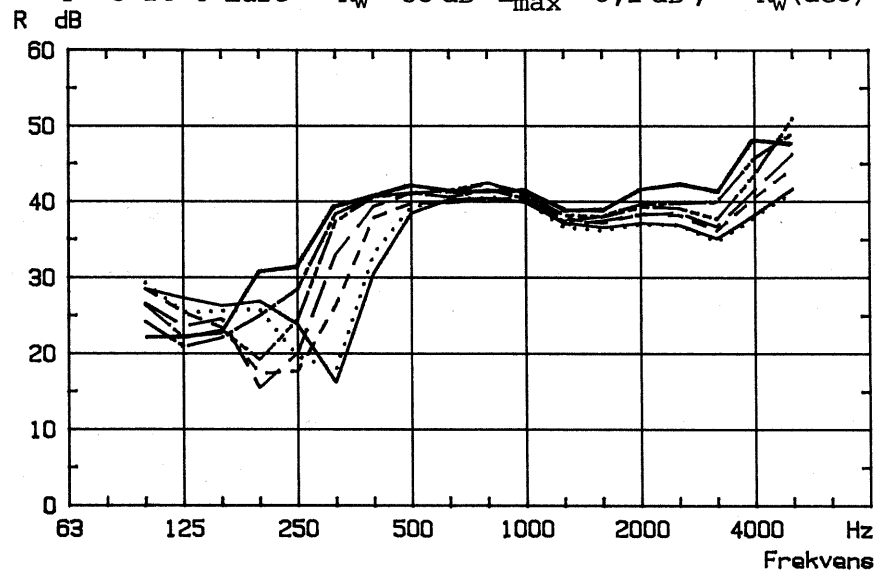
For de luftfyldte ruder er hulrumsdybdens betydning væsentligt mindre end ventet, idet reduktionstallet i mellemfrekvensområdet kun vokser ca. 3 dB ved fordobling af glasafstanden.

For de gasfyldte ruder ses en større afhængighed af glasafstanden. Selv om kurveforløbene er influeret af resonansdyk



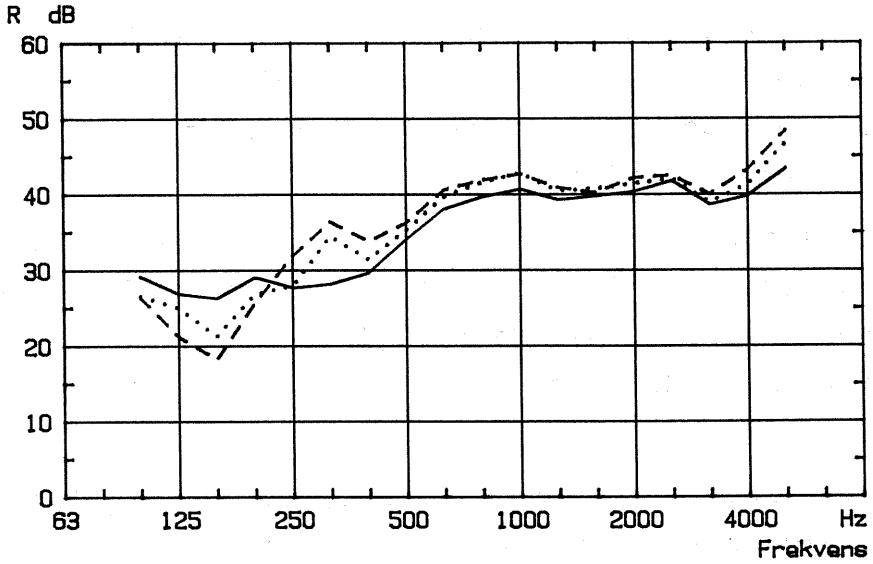
Figur 6.11 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for luftfyldte termoruder af 8 mm og 4 mm glas. Glasafstande 4-24 mm.

———	F	8-4-4	Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 7,8 dB ;	R_w(dec) = 35,3 dB
·····	F	8-6-4	Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 6,4 dB ;	R_w(dec) = 35,6 dB
- - - - -	F	8-9-4	Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 8,8 dB ;	R_w(dec) = 35,5 dB
— — — —	F	8-12-4	Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 6,1 dB ;	R_w(dec) = 35,9 dB
— - — - —	F	8-16-4	Luft	R_w = 36 dB	Δ_{max} = 6,0 dB ;	R_w(dec) = 36,6 dB
— · — · —	F	8-20-4	Luft	R_w = 37 dB	Δ_{max} = 5,7 dB ;	R_w(dec) = 37,5 dB
———	F	8-24-4	Luft	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 6,1 dB ;	R_w(dec) = 38,5 dB



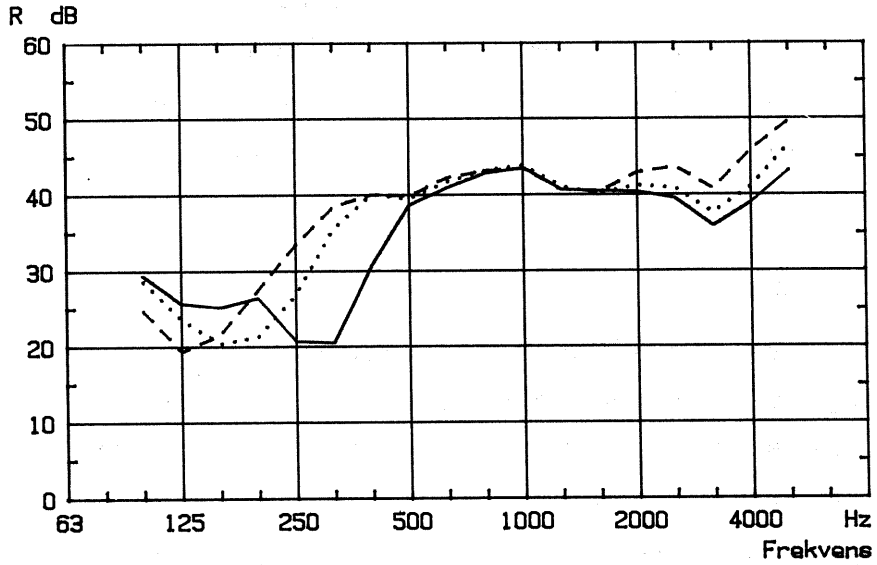
Figur 6.12 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for gasfyldte termoruder af 8 mm og 4 mm glas. Glasafstande 4-24 mm.

———	F	8-4-4	SF_6	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 13,8 dB ;	R_w(dec) = 34,7 dB
·····	F	8-6-4	SF_6	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 12,1 dB ;	R_w(dec) = 34,5 dB
- - - - -	F	8-9-4	SF_6	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 10,3 dB ;	R_w(dec) = 35,2 dB
— — — —	F	8-12-4	SF_6	R_w = 36 dB	Δ_{max} = 10,5 dB ;	R_w(dec) = 36,0 dB
— - — - —	F	8-16-4	SF_6	R_w = 37 dB	Δ_{max} = 7,8 dB ;	R_w(dec) = 37,6 dB
— · — · —	F	8-20-4	SF_6	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 4,6 dB ;	R_w(dec) = 38,6 dB
———	F	8-24-4	SF_6	R_w = 40 dB	Δ_{max} = 5,2 dB ;	R_w(dec) = 40,4 dB



Figur 6.13 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for luftfyldte termoruder af 8 og 4 mm glas i oplukkeligt, tæt vindue. Glasafstand hhv. 6, 12 og 20 mm.

————————	o	8-6-4 Luft	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 7,3 dB ;	R_w(dec) = 38,0 dB
.....	o	8-12-4 Luft	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 5,6 dB ;	R_w(dec) = 38,8 dB
- - - - - - - -	o	8-20-4 Luft	R_w = 39 dB	Δ_{max} = 7,8 dB ;	R_w(dec) = 39,2 dB



Figur 6.14 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for gasfyldte termoruder af 8 og 4 mm glas i oplukkeligt, tæt vindue. Glasafstand hhv. 6, 12 og 20 mm.

————————	o	8-6-4 SF_6	R_w = 36 dB	Δ_{max} = 11,5 dB ;	R_w(dec) = 36,5 dB
.....	o	8-12-4 SF_6	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 6,7 dB ;	R_w(dec) = 38,9 dB
- - - - - - - -	o	8-20-4 SF_6	R_w = 40 dB	Δ_{max} = 5,4 dB ;	R_w(dec) = 40,8 dB

samt flanketransmission via afstandsprofil og karm (fladt forløb mellem 400 og 1000 Hz), kan resultaterne godt tolkes derhen, at der fås de forventede ca. 5 dB stigning ved fordobling af hulrumsdybden.

Resultaterne viser, at glasafstanden har afgørende betydning for gasfyldte ruder, men ikke for luftfyldte ruder. Ved små hulrumsdybder har de gasfyldte ruder specielt dybe resonansdyk, mens de luftfyldte ruder har relativt fladt kurveforløb.

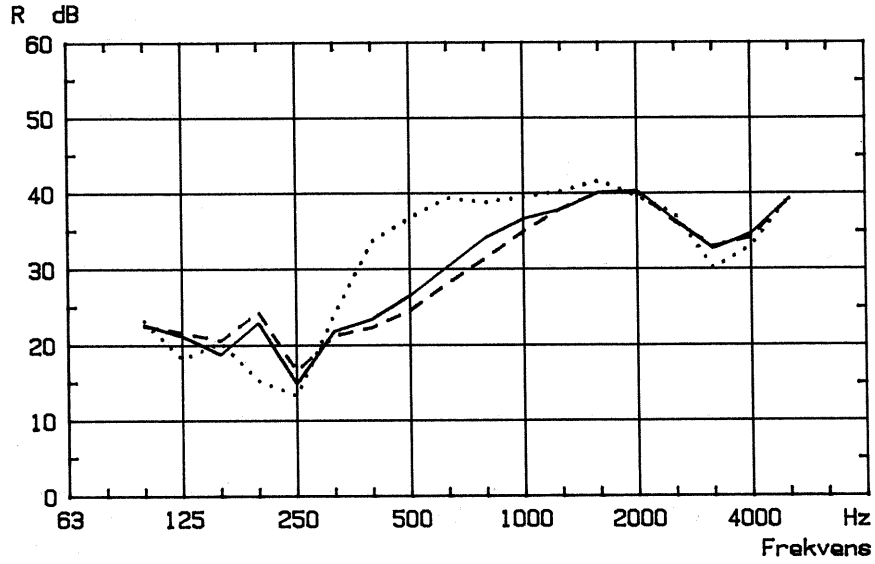
En sammenligning af R_w-værdier viser, at der for luftfyldte ruder fås næsten konstant R_w-værdi ved hulrumsdybder fra 4 mm til ca. 16 mm og voksende R_w-værdi ved større dybder - ca. 1 dB mere pr. 4 mm forøgelse af glasafstanden. For de gasfyldte ruder vokser R_w-værdien derimod ca. 1 dB pr. 4 mm forøgelse af hulrummet ved alle dybder 4-24 mm.

De samme tendenser blev fundet ved målinger på et tæt, oplukkeligt vindue. På figur 6.13 og 6.14 er vist resultater for hulrumsdybderne 6, 12 og 20 mm. De luftfyldte ruder har en R_w-værdi, der er næsten uafhængig af hulrumsdybden. For de gasfyldte ruder vokser R_w-værdien med ca. 1 dB pr. 4 mm hulrumsforøgelse.

6.8 Gasfyldning

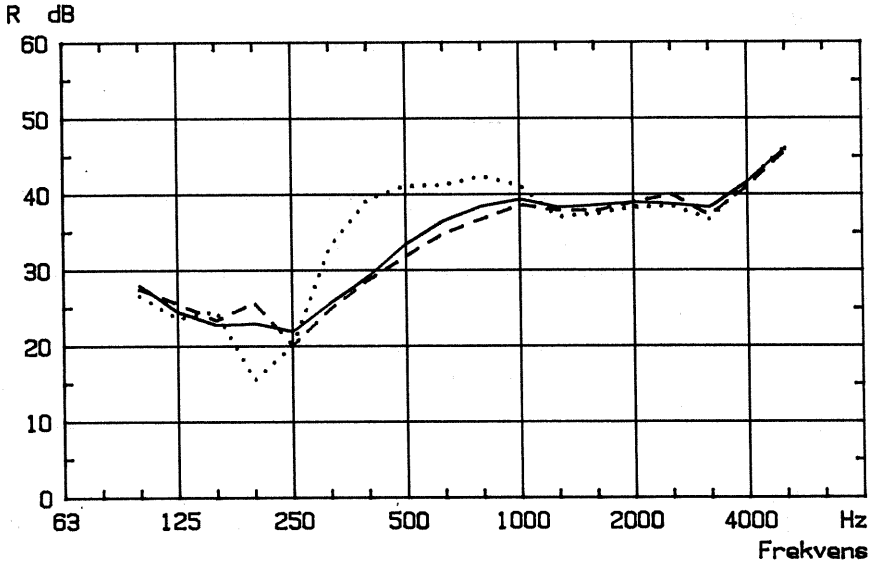
Af de tidligere viste resultater fremgår indirekte noget om gasfyldningers indflydelse på vinduers lydisolation. I det følgende vises nogle resultater, der belyser størrelsesordenen af denne indflydelse.

På figur 6.15 og 6.16 er vist måleresultater for henholdsvis en almindelig "varme-isoleringsrude" 4-12-4 og en typisk "lyd-varme-isoleringsrude" 8-12-4. Der er udført måling på de samme ruder med 3 forskellige hulrumsfyldninger: atm. luft, SF_6 og Argon. De tilsvarende resultater for termoruder af 8 + 4 mm glas med andre hulrumsdybder er vist på figur 6.17 og 6.18.



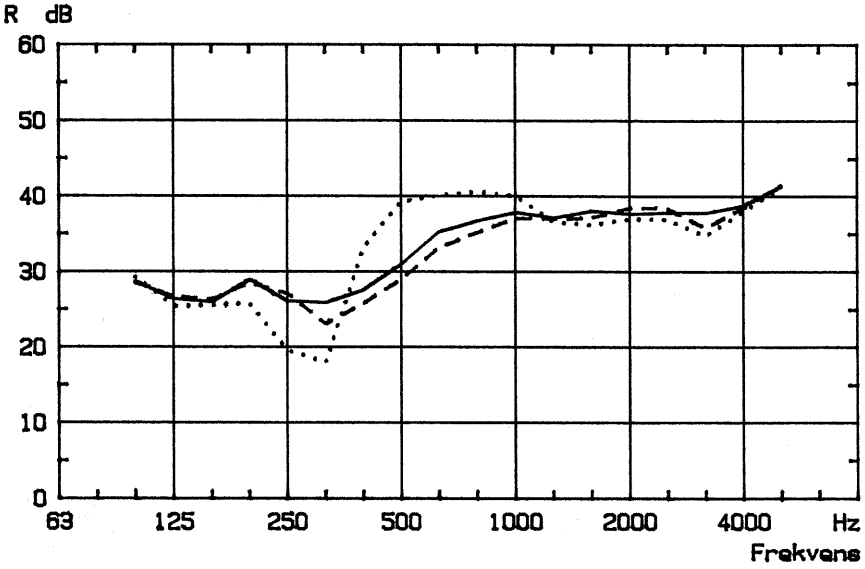
Figur 6.15 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for almindelig, 2-lags termorude 4-12-4 med hulrumsfyldning af hhv. atm. luft, SF_6 og Argon.

————————	F 4-12-4 Luft	R_w = 31 dB	Δ_{max} = 9,1 dB;	R_w(dec) = 31,5 dB
.....	F 4-12-4 SF_6	R_w = 32 dB	Δ_{max} = 11,7 dB;	R_w(dec) = 32,9 dB
- - - - - - - -	F 4-12-4 Argon	R_w = 30 dB	Δ_{max} = 6,6 dB;	R_w(dec) = 30,6 dB



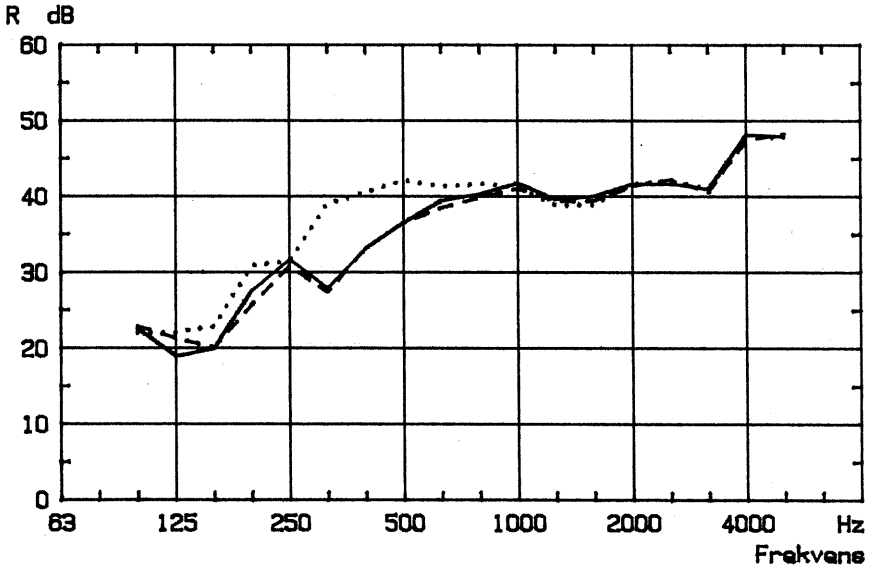
Figur 6.16 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termorude 8-12-4 med hulrumsfyldning af hhv. atm. luft, SF_6 og Argon.

————————	F 8-12-4 Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 6,1 dB;	R_w(dec) = 35,9 dB
.....	F 8-12-4 SF_6	R_w = 36 dB	Δ_{max} = 10,5 dB;	R_w(dec) = 36,0 dB
- - - - - - - -	F 8-12-4 Argon	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 7,9 dB;	R_w(dec) = 35,4 dB



Figur 6.17 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en 2-lags termorude 8-6-4 med hulrumsfyldning af hhv. atm. luft, SF_6 og Argon.

————————	F 8-6-4 Luft	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 6,4 dB;	R_w(dec) = 35,6 dB
.....	F 8-6-4 SF_6	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 12,1 dB;	R_w(dec) = 34,5 dB
- - - - - - - -	F 8-6-4 Argon	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 7,2 dB;	R_w(dec) = 34,6 dB



Figur 6.18 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en 2-lags termorude 8-24-4 med hulrumsfyldning af hhv. atm. luft, SF_6 og Argon.

————————	F 8-24-4 Luft	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 6,1 dB;	R_w(dec) = 38,5 dB
.....	F 8-24-4 SF_6	R_w = 40 dB	Δ_{max} = 5,2 dB;	R_w(dec) = 40,4 dB
- - - - - - - -	F 8-24-4 Argon	R_w = 38 dB	Δ_{max} = 6,6 dB;	R_w(dec) = 38,3 dB

Som det ses på de 4 diagrammer, ændrer fyldning med SF_6 kurveforløbene radikalt, mens fyldning med Argon ikke medfører ændringer af betydning.

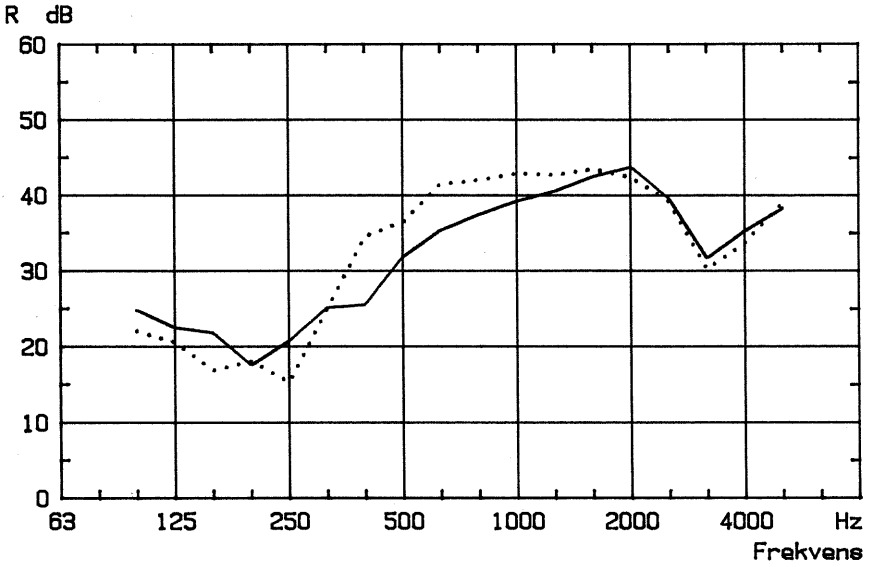
Ved fyldning med SF_6 er ændringerne af kurveforløbene principielt ens for den symmetriske rude 4-12-4 og den asymmetriske rude 8-12-4. Resonansdykket bliver dybere, og i mellemfrekvensområdet fås et væsentligt højere reduktionstal. Med hulrumsdybden 6 mm (figur 6.17) fås et endnu dybere resonansdyk. Med en hulrumsdybde på 24 mm medfører fyldning med SF_6 ikke et dybere resonansdyk, men tværtimod bedre reduktionstal.

En forklaring på SF_6-fyldningens forskellige virkning ved forskellige hulrumsdybder kendes ikke, men skyldes muligvis et kompliceret samspil mellem gasfyldningens fysiske egenskaber, rudens resonansfrekvens og rudens dimensioner (bredde og højde).

Argon har næsten samme fysiske egenskaber som atm. luft (se afsnit 4.9), og nogen særlig indflydelse på lydisolationen forventedes ikke. Tendenserne til lidt lavere reduktionstal kan forklares ved, at Argon har en lidt lavere lydhastighed end atm. luft og dermed også lidt mindre bølgelængder. Når ruden har fyldning af Argon, er hulrummets bredde og højde - målt i bølgelængder - næsten identisk med vinduesåbningens dimensioner. Det medfører mere lydtransmission og dermed lavere reduktionstal.

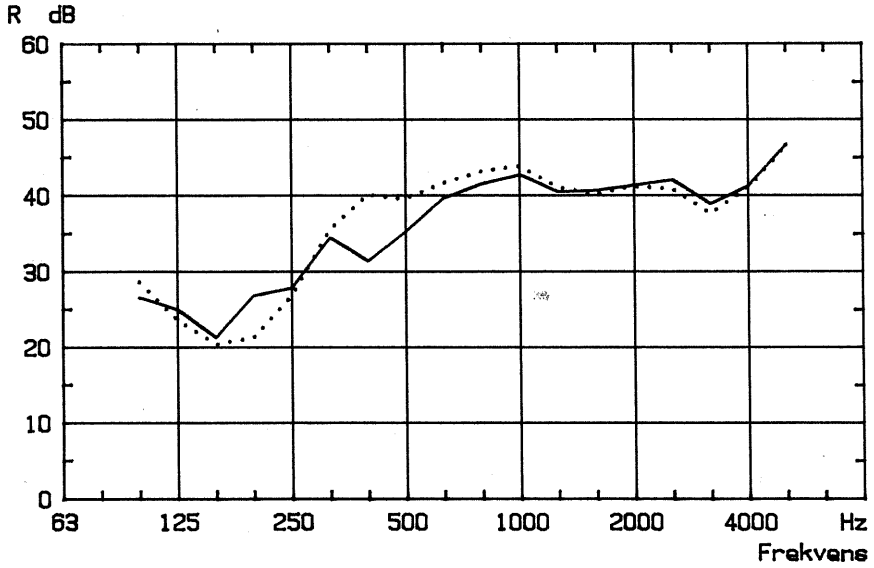
Ved målinger på det oplukkelige vindue blev det konstateret, at gasfyldningers principielle betydning for ruder med forskellige hulrumsdybder svarer til, hvad der er fundet ved målingerne i fast karm. Gasfyldningens kvantitative virkning er dog lidt mindre. Dette er en følge af, at rudens dimensioner er mindsket i forhold til vinduesåbningen. En nøjere forklaring findes i afsnit 4.10. Måleresultater for det oplukkelige, tætte vindue med en 4-12-4 rude og en 8-12-4 rude er afbildet på figur 6.19 og 6.20.

Gasfyldningens indflydelse på en termorudes R_w-værdi afhænger af hulrumsdybden. Ved hulrum på 6 mm ændres R_w-værdien med ca.



Figur 6.19 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for almindelig 2-lags termorude 4-12-4 indbygget i et oplukkeligt, tæt vindue. Hulrumsfyldning hhv. atm. luft og SF_6.

——————— o 4-12-4 Luft $R_w = 33$ dB $\Delta_{max} = 6,4$ dB ; R_w(dec) = 33,8 dB
..... o 4-12-4 SF_6 $R_w = 33$ dB $\Delta_{max} = 10,7$ dB ; R_w(dec) = 33,5 dB



Figur 6.20 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termorude 8-12-4 indbygget i et oplukkeligt, tæt vindue. Hulrumsfyldning hhv. atm. luft og SF_6.

——————— o 8-12-4 Luft $R_w = 38$ dB $\Delta_{max} = 5,6$ dB ; R_w(dec) = 38,8 dB
..... o 8-12-4 SF_6 $R_w = 38$ dB $\Delta_{max} = 6,7$ dB ; R_w(dec) = 38,9 dB

-1 dB, ved 9-12 mm ca. 0 dB, ved 16 mm ca. +1 dB. Hvis termoruden er lamineret, er ændringerne i R_w-værdier som følge af gasfyldning ca. 1 dB større end nævnt.

6.9 Gasblandinger

I det foregående er udelukkende omtalt resultater for rene luftarter. Blandinger af SF_6 og Argon anvendes af mange producenter, men har ikke kunnet undersøges nøje inden for projektets tidsrammer. En enkelt forsøgsserie er dog udført for at få et fingerpeg om blandingers egenskaber.

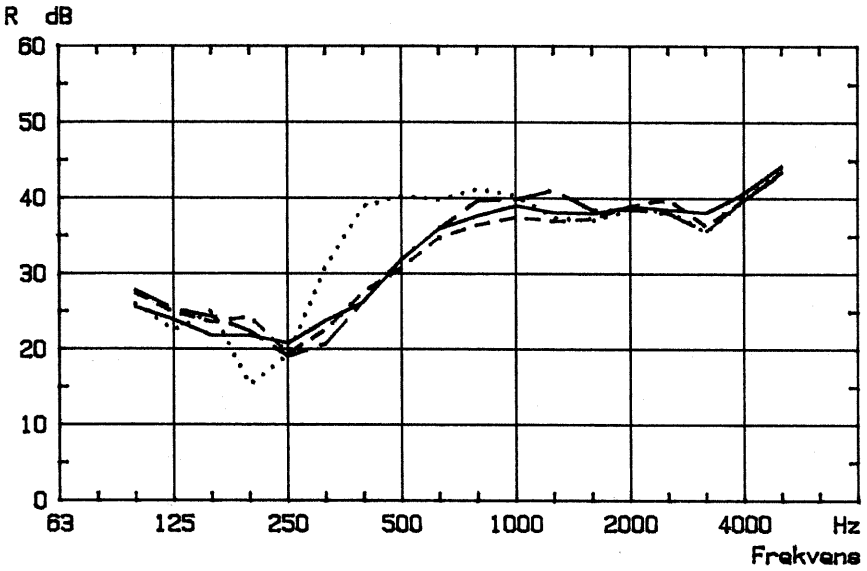
Målingerne er udført på en 8-12-4 rude i fast karm. Der er anvendt et andet rudefabrikat (rudefabrikat II, afstandsprofil af galvaniseret stål) end ved de foregående målinger.

Følgende luftarter og blandinger er anvendt:

- Atm. luft
- SF_6
- Ar
- Krypton
- SF/Ar-blandinger i forholdet 25/75, 50/50, 75/25 vol. %

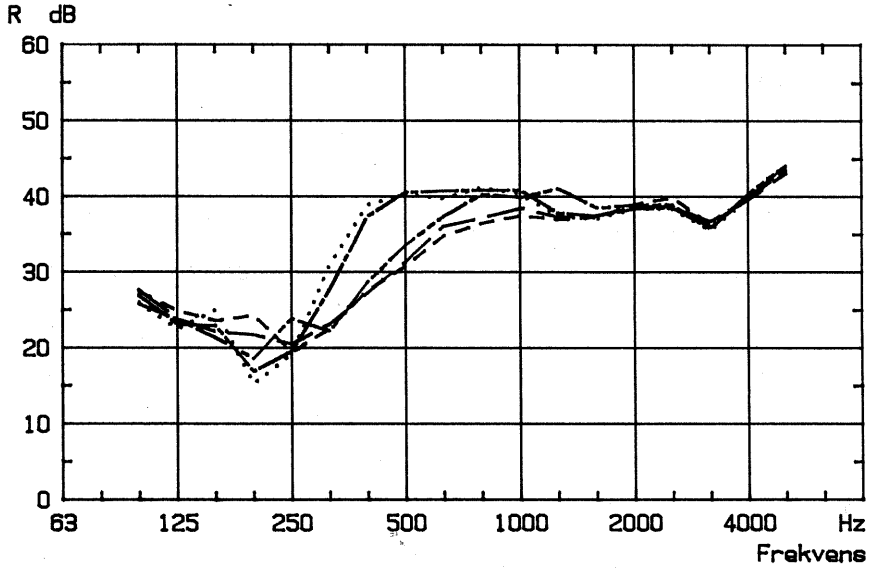
På figur 6.21 er vist resultaterne for de rene luftarter. For atm. luft, SF_6 og Ar kan konstateres de samme tendenser som vist på figur 6.16. Målingen på ruden med krypton er udført, fordi krypton har andre fysiske egenskaber end luft, SF_6 og Ar, og resultaterne kan derfor være nyttige ved senere forsøg på at udarbejde en ny beregningsmodel for ruder. Der er ikke udført målinger på andre ruder med krypton-fyldning. Krypton anvendes ikke i praksis på grund af den meget høje pris og ser i øvrigt heller ikke ud til at have afgørende betydning for lydisolationen.

På figur 6.22 ses reduktionstalskurver for 8-12-4 ruder med forskellige blandinger af SF_6 og Argon. Med blandingsforhold på 75/25 og 25/75 fås resultater, der ligger meget tæt på resultaterne for henholdsvis ren SF_6 og ren Ar. Resultaterne ty-



Figur 6.21 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termorude 8-12-4 (rudefabrikat II) med 4 forskellige hulrumsfyldninger ("rene" luftarter).

————————	f	8-12-4 Luft	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 6,7 dB;	R_w(dec) = 34,9 dB
.....	f	8-12-4 SF_6	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 9,7 dB;	R_w(dec) = 35,6 dB
- - - - - - - -	f	8-12-4 Argon	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 7,6 dB;	R_w(dec) = 34,5 dB
— — — —	f	8-12-4 Krypton	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 9,3 dB;	R_w(dec) = 34,3 dB



Figur 6.22 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2-lags termorude 8-12-4 (rudefabrikat II) med hulrumsfyldning af SF_6 + Ar i forskellige blandingsforhold.

			SF_6 / Ar			
.....	f	8-12-4	100%/ 0%	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 9,7 dB;	R_w(dec) = 35,6 dB
- - - - - - - -	f	8-12-4	0%/100%	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 7,6 dB;	R_w(dec) = 34,5 dB
— — — —	f	8-12-4	25%/ 75%	R_w = 34 dB	Δ_{max} = 6,8 dB;	R_w(dec) = 34,7 dB
—— - —— - —	f	8-12-4	50%/ 50%	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 8,8 dB;	R_w(dec) = 35,1 dB
—— - —— - ——	f	8-12-4	75%/ 25%	R_w = 35 dB	Δ_{max} = 8,4 dB;	R_w(dec) = 35,6 dB

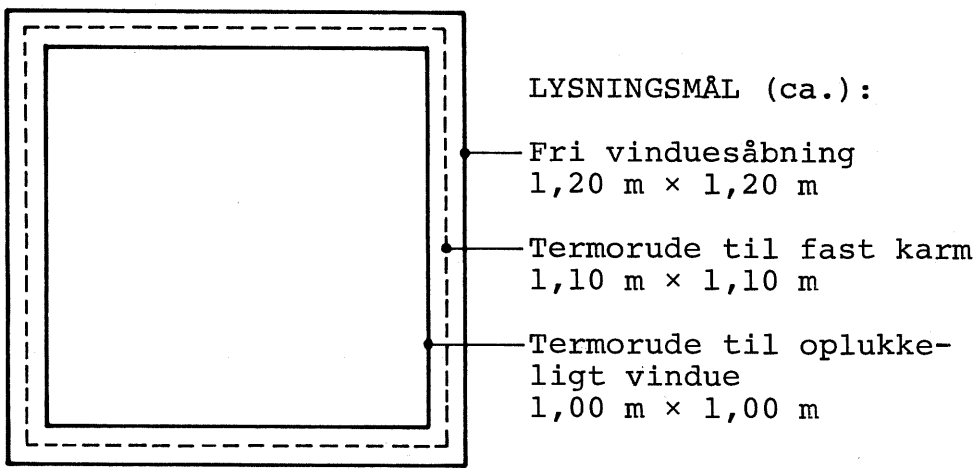
der altså på, at der med moderate blandingsforhold fås næsten samme reduktionstal som for de rene luftarter. Dette stemmer godt overens med instituttets egne erfaringer fra rekvirerede målinger, men ikke med publicerede resultater [21] og [30]. Med et blandingsforhold på 50/50 ligger reduktionstalskurven relativt lavt i kurveskaren.

Der er kun gennemført én forsøgsrække med gasblandinger. Datamaterialet er for spinkelt til, at der kan drages sikre konklusioner vedrørende blandingsforholdets betydning. En nøjere undersøgelse af luftarternes fysiske egenskaber samt nogle supplerende forsøg bør gennemføres for at opklare dette. Herved ville der også skabes baggrund for en bedre vurdering af, hvilken betydning gasfyldning har for forskellige rudetyper og -størrelser.

6.10 Fast karm / oplukkeligt, tæt vindue

I afsnit 4.10 er forklaret, at en termorudes lydisolation afhænger af termorudens dimensioner i forhold til måleåbningen, dvs. af "indbygningsbetingelserne". Dette fænomen er illustreret i figur 3.2, hvor der er afbildet måleresultater (fra [4]) dels for ruder med "normale" dimensioner svarende til indbygning i henholdsvis fast karm og oplukkeligt vindue, dels med mere ekstreme dimensioner - henholdsvis større og mindre.

Den eksperimentelle undersøgelse, der er beskrevet i den foreliggende rapport, omfatter kun målinger på ruder med "normale" dimensioner i forhold til vinduesåbningen. På figur 6.23 er vist en opstalt med angivelse af lysningsmål for den frie vinduesåbning i størrelse 12M × 12M samt for termoruder til den faste karm og det oplukkelige vindue. For andre vinduestyper og -størrelser kan naturligvis forekomme andre mål. I det aktuelle tilfælde ses, at højde og bredde varierer i spring på ca. 10%. De angivne mål for termoruder er hulrumsbredden og -højden.

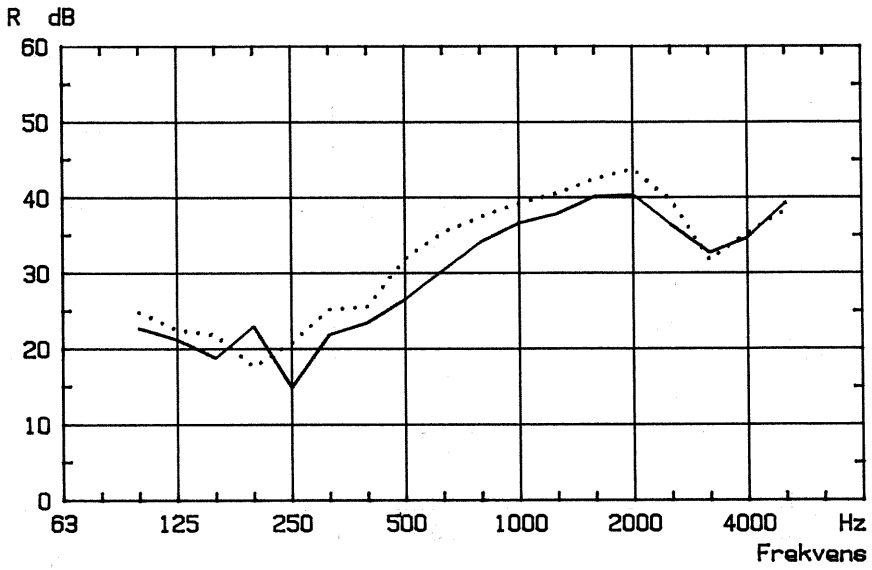


Figur 6.23 Opstalt af prøveåbning med angivelse af lysningsmål for termoruder

På figur 6.24-6.31 er vist sammenligninger af reduktionstalskurver for de samme rudetyper monteret i et fast vindue og i et oplukkeligt vindue med tape-tætning af karm/ramme-fuge indvendigt og udvendigt. Det oplukkelige vindue fungerer herved som én bred karm eller som et oplukkeligt vindue med to effektive tætningsplaner.

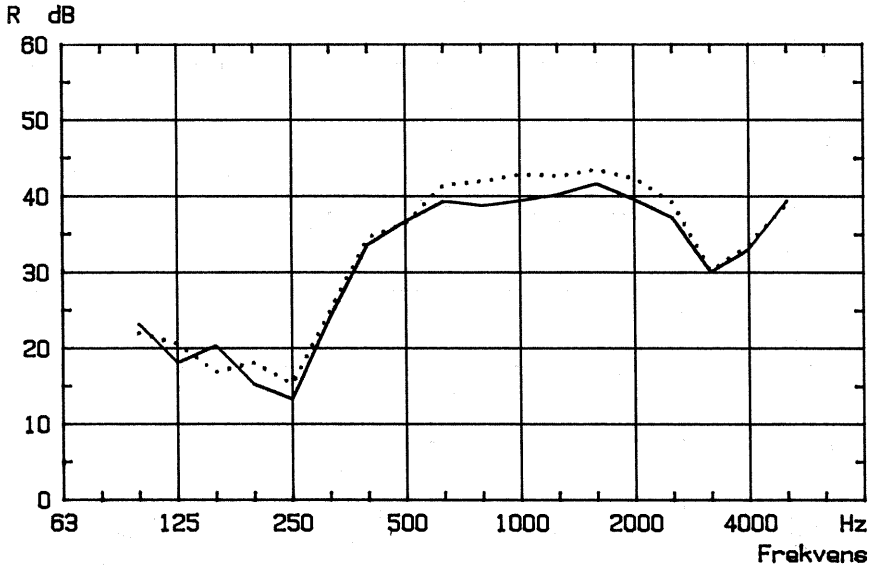
Det ses, at indbygningens betydning afhænger af rudetypen. For luftfyldte ruder er der en nogenlunde ens effekt for alle ruder i hele frekvensområdet 250-2000 Hz, og R_w-værdien stiger 2-3 dB, når karmen er bred. For gasfyldte ruder er effekten derimod mindre entydig, men der fås i alle tilfælde en vis forbedring ved indbygning i en bred karm. Betydningen af karmbredden er dog minimal for en almindelig termorude 4-14-2 med gasfyldning, mens der for en 8-12-4 termorude med gas fås en ca. 3 dB højere R_w-værdi ved indbygning i en bred karm.

Forsøgene viser, at måleresultater for en termorude ikke er alment gyldige, men afhængige af indbygningsbetingelserne. Denne afhængighed er forskellig for forskellige rudetyper. Der er et udbredt ønske om at indføre én generelt anvendelig indbyg-



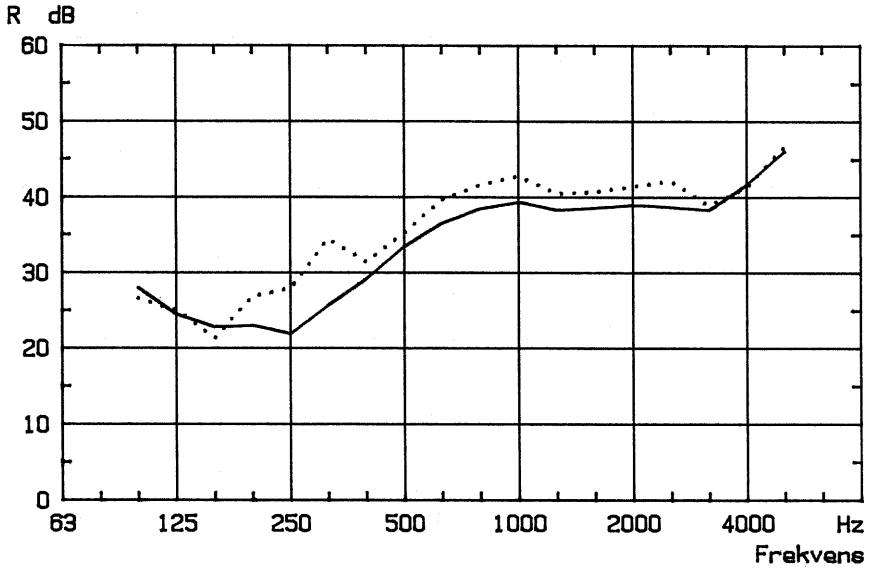
Figur 6.24 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en luftfyldt, 2-lags termorude 4-12-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 4-12-4 Luft R_w = 31 dB Δ_{max} = 9,1 dB ; R_w(dec) = 31,5 dB
..... O 4-12-4 Luft R_w = 33 dB Δ_{max} = 6,4 dB ; R_w(dec) = 33,8 dB



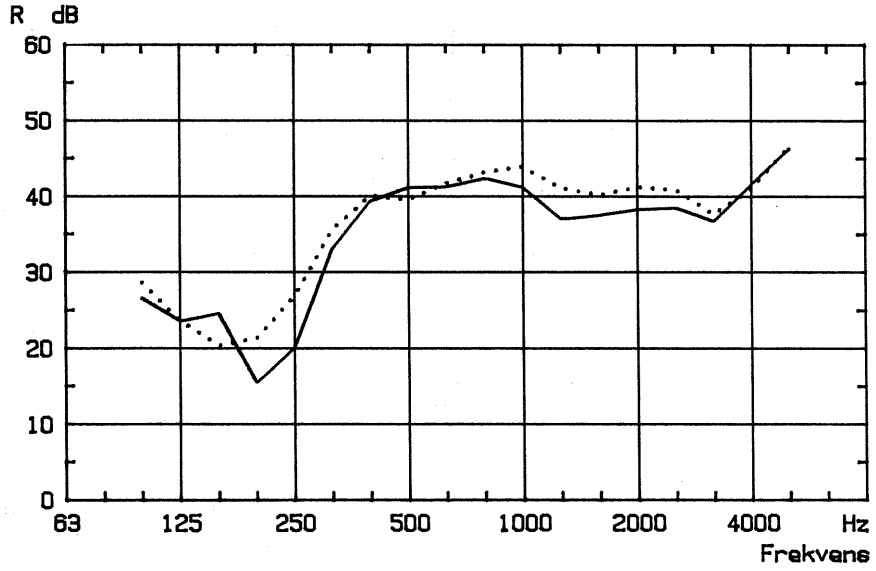
Figur 6.25 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en gasfyldt, 2-lags termorude 4-12-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 4-12-4 SF_6 R_w = 32 dB Δ_{max} = 11,7 dB ; R_w(dec) = 32,9 dB
..... O 4-12-4 SF_6 R_w = 33 dB Δ_{max} = 10,7 dB ; R_w(dec) = 33,5 dB



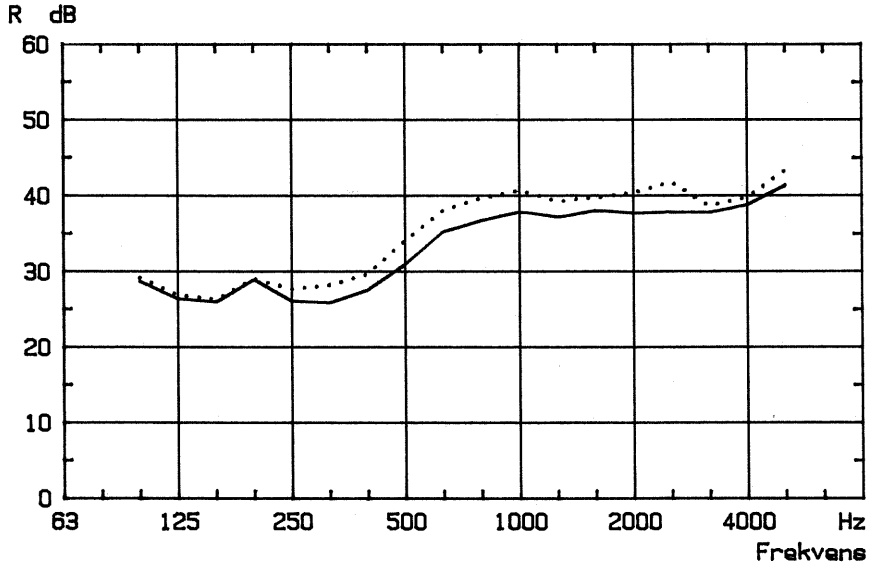
Figur 6.26 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en luftfyldt, 2-lags termorude 8-12-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 8-12-4 Luft $R_w = 35$ dB $\Delta_{max} = 6{,}1$ dB ; R_w(dec) = 35,9 dB
..... O 8-12-4 Luft $R_w = 38$ dB $\Delta_{max} = 5{,}6$ dB ; R_w(dec) = 38,8 dB



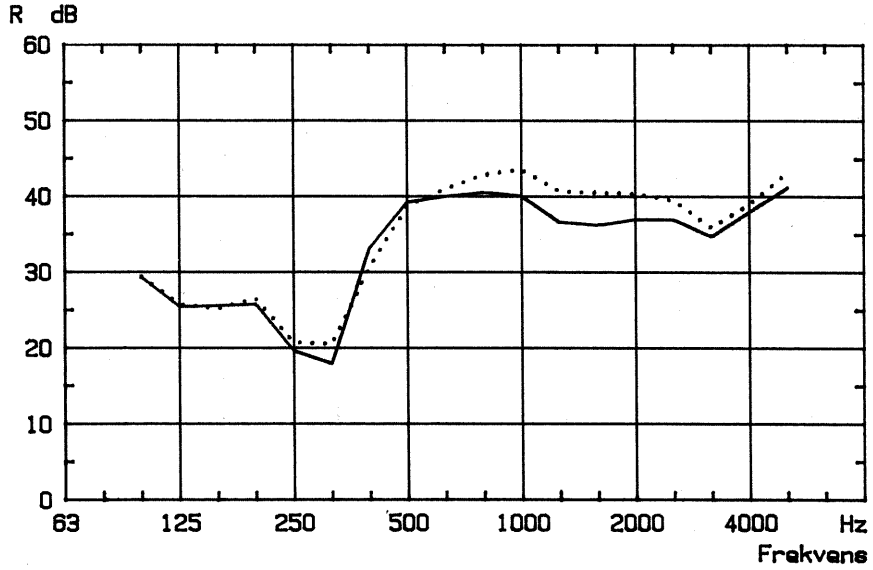
Figur 6.27 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en gasfyldt, 2-lags termorude 8-12-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 8-12-4 SF_6 $R_w = 36$ dB $\Delta_{max} = 10{,}5$ dB ; R_w(dec) = 36,0 dB
..... O 8-12-4 SF_6 $R_w = 38$ dB $\Delta_{max} = 6{,}7$ dB ; R_w(dec) = 38,9 dB



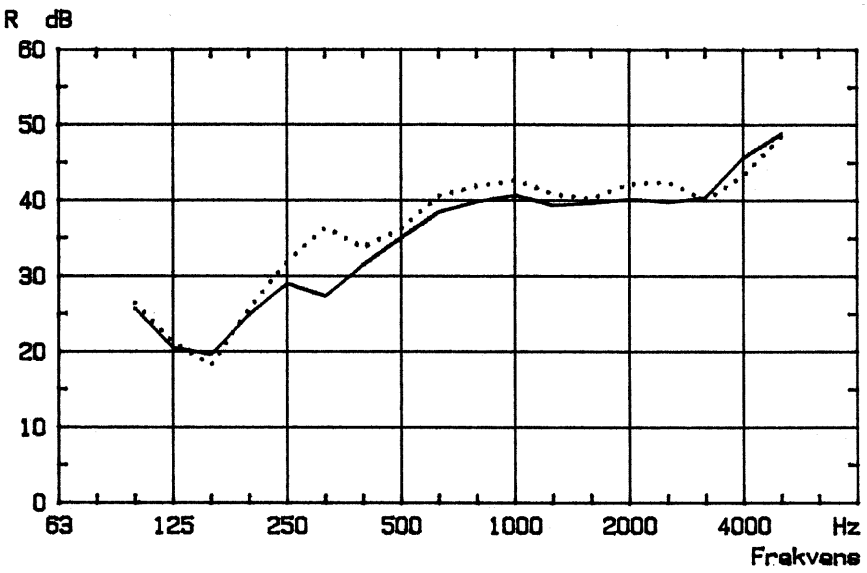
Figur 6.28 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en luftfyldt, 2-lags termorude 8-6-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 8-6-4 Luft R_w = 35 dB Δ_{max} = 6,4 dB ; R_w(dec) = 35,6 dB
..... O 8-6-4 Luft R_w = 38 dB Δ_{max} = 7,3 dB ; R_w(dec) = 38,0 dB



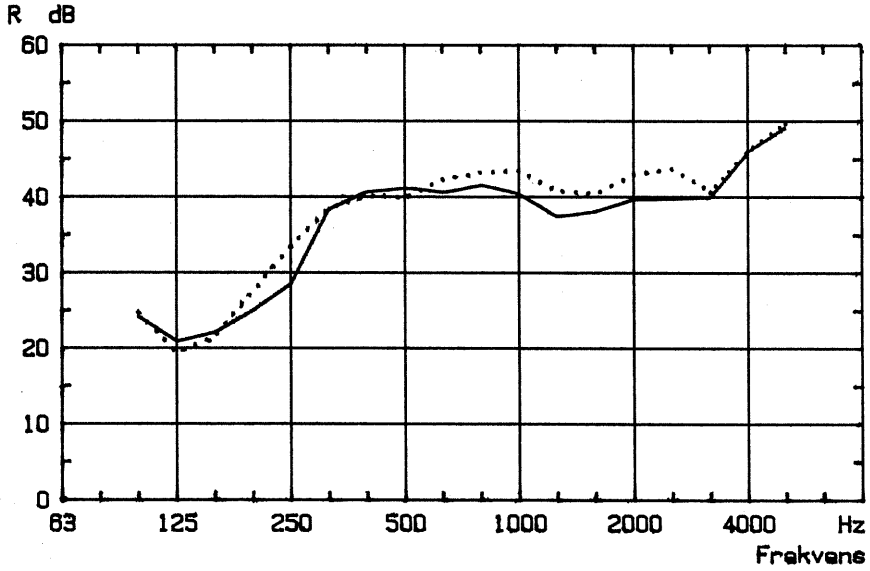
Figur 6.29 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en gasfyldt, 2-lags termorude 8-6-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 8-6-4 SF_6 R_w = 34 dB Δ_{max} = 12,1 dB ; R_w(dec) = 34,5 dB
..... O 8-6-4 SF_6 R_w = 36 dB Δ_{max} = 11,5 dB ; R_w(dec) = 36,5 dB



Figur 6.30 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en luftfyldt, 2-lags termorude 8-20-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 8-20-4 Luft $R_w = 37$ dB $\Delta_{max} = 5{,}7$ dB ; R_w(dec) = 37,5 dB
..... O 8-20-4 Luft $R_w = 39$ dB $\Delta_{max} = 7{,}8$ dB ; R_w(dec) = 39,2 dB



Figur 6.31 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for en gasfyldt, 2-lags termorude 8-20-4 monteret i hhv. fast karm (F) og oplukkeligt, tæt vindue (O).

——————— F 8-20-4 SF_6 $R_w = 38$ dB $\Delta_{max} = 4{,}6$ dB ; R_w(dec) = 38,6 dB
..... O 8-20-4 SF_6 $R_w = 40$ dB $\Delta_{max} = 5{,}4$ dB ; R_w(dec) = 40,8 dB

ningsform ved laboratoriemålinger af ruders reduktionstal og at benytte en fast korrektion for andre indbygningsbetingelser. Af figurerne ses tydeligt, at forskellene afhænger af rudetypen, og at der således ikke kan indføres en fast korrektion uafhængigt af rudetypen.

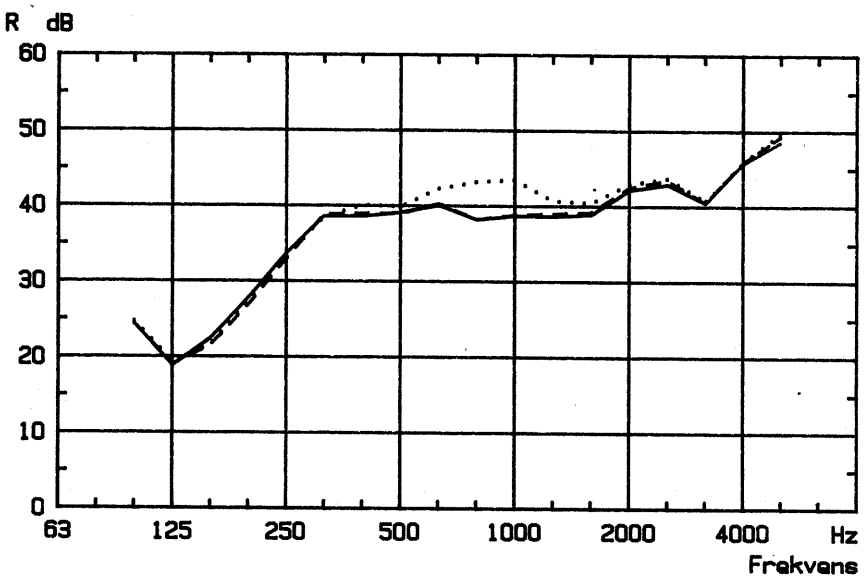
Det skal tilføjes, at endnu større forskelle vil kunne optræde, såfremt termoruden har samme mål som prøveåbningen, se f.eks. figur 3.2. Der er ikke gennemført en systematisk undersøgelse heraf eller af indbygningsbetingelsernes betydning for et større antal rudetyper i forskellige vinduesformater.

6.11 Tætninger i karm/ramme-fuge

Betydningen af karm/ramme-konstruktionens udformning og af tætningslisternes effektivitet er omtalt i afsnit 4.11 og 4.12.

Et eksempel på lydisolationens afhængighed af tætningsplanernes antal og placering er vist på figur 6.32. Der opnås ens resultater med og uden tape-tætning indvendigt. Det viser, dels at vinduet er tæt, dels at et ekstra tætningsplan i direkte tilknytning til en eksisterende, effektiv tætning ikke forøger lydisolationen. Når der tillige tætnes med tape udvendigt, fås derimod en forøgelse af reduktionstallet i frekvensområdet 400-2000 Hz. Et ekstra tætningsplan kan altså have betydning for lydisolationen, når afstanden mellem tætningsplanerne er rimeligt stor. Omvendt viser resultaterne, at reduktionstallet i dette frekvensområde ikke kan forbedres blot ved en ændring af ruden, når lydtransmissionen gennem karm/ramme-konstruktionen er væsentlig.

I eksemplet fra figur 6.32 medførte tætningen udvendigt en ca. 1½ dB højere R_W-værdi. Hvis der anvendes en væsentligt ringere termorude - f.eks. en 4-12-4 rude - er indflydelsen på R_W-værdien derimod ubetydelig.



Figur 6.32 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for gasfyldt, 2-lags termorude 8-20-4 monteret i oplukkeligt vindue med og uden tape-tætning af karm/ramme-fuge.

————————	A: uden tape	R_w = 39 dB	Δ_{max} = 4,4 dB;	R_w(dec) = 39,4 dB
- - - - - - - -	B: tape indv.	R_w = 39 dB	Δ_{max} = 4,4 dB;	R_w(dec) = 39,4 dB
.....	C: tape indv. + udv.	R_w = 40 dB	Δ_{max} = 5,4 dB;	R_w(dec) = 40,8 dB

7. OPTIMERING AF LYDISOLATION

7.1 Optimering - definition

Ved optimering af en egenskab forstås det at finde den højeste ydeevne vurderet i relation til størrelsen af en anden egenskab.

Optimering kan også foretages under samtidig hensyntagen til flere egenskaber. I så fald "vægtes" egenskaberne efter deres betydning.

Hvis der ved en optimeringsproces findes flere løsninger, er det naturligt at supplere med en optimering af ydeevnen i forhold til en anden egenskab, der tillægges betydning.

Før optimering kan foretages, skal der findes et mål for den ydeevne, der ønskes optimeret. Desuden skal der findes en "liste" over variationsmuligheder for den egenskab, der ønskes optimeret i forhold til.

7.2 Optimering - lydisolation

I afsnit 2 er angivet en række egenskaber, som har betydning ved valg af vindueskonstruktion.

En termorudes lydisolation kan tænkes optimeret i forhold til f.eks.:

- Vægten
- Tykkelsen
- Prisen
- Varmeisolationen

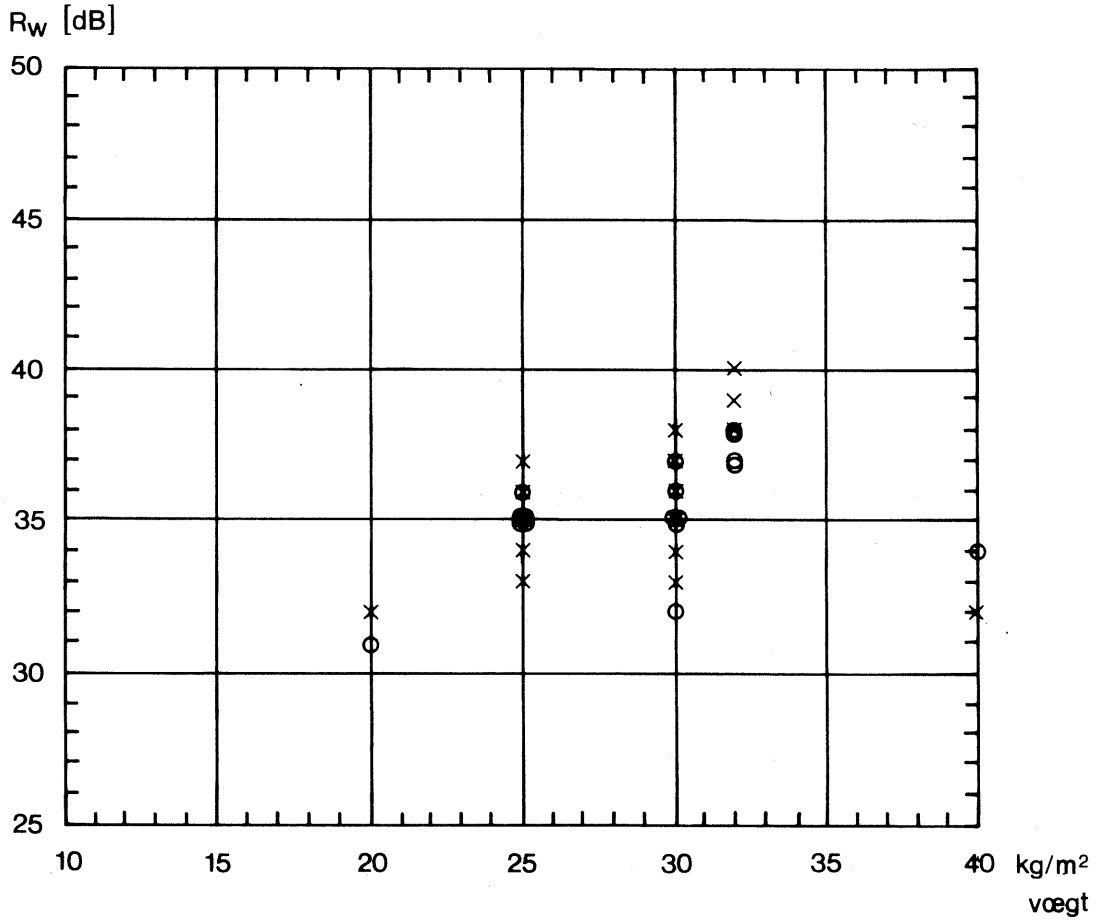
Da den tilladelige vægt og tykkelse for en termorude næsten altid har nogle begrænsninger, er der som regel brug for en optimering i forhold til både vægt og tykkelse.

Som mål for en termorudes lydisolerende egenskaber anvendes R_W-værdien i de efterfølgende eksempler, hvor nogle måleresultater er afbildet som funktion af andre egenskaber. Til afbildningerne er benyttet resultater fra tabel 6.1, som omfatter en serie målinger på ruder i fast karm. Der er benyttet

R_W-værdier fra ialt 33 målinger på 2-lags termoruder med hulrumsfyldning af atm. luft eller SF_6. Der er kun vist resultater for ruder med "almindelige" glasafstande, dvs. 6-20 mm.

7.3 Optimering af lydisolation i forhold til rudens vægt

Vægten af en rude har betydning i mange henseender: håndtering ved transport og montage, dimensionering af karm/ramme og hængsler, betjening af vindue. Herudover er vægten naturligvis et mål for den samlede glastykkelse og dermed medbestemmende for prisen.



Figur 7.1 R_W-værdier fra 33 målinger på 2-lags termoruder afbildet som funktion af rudevægten.

o Termoruder med atm. luft

× Termoruder med SF_6

I figur 7.1 er R_W-værdier fra 33 målinger (se afsnit 7.2) afbildet som funktion af rudevægten. Af afbildningen ses, at R_W-værdien for ruderne med en vægt på 30 - 32 kg/m^2 varierer mellem ca. 32 og 40 dB! Omvendt findes der i alle "vægtklasser" fra 20-40 kg/m^2 ruder med $R_W \sim 32$ dB.

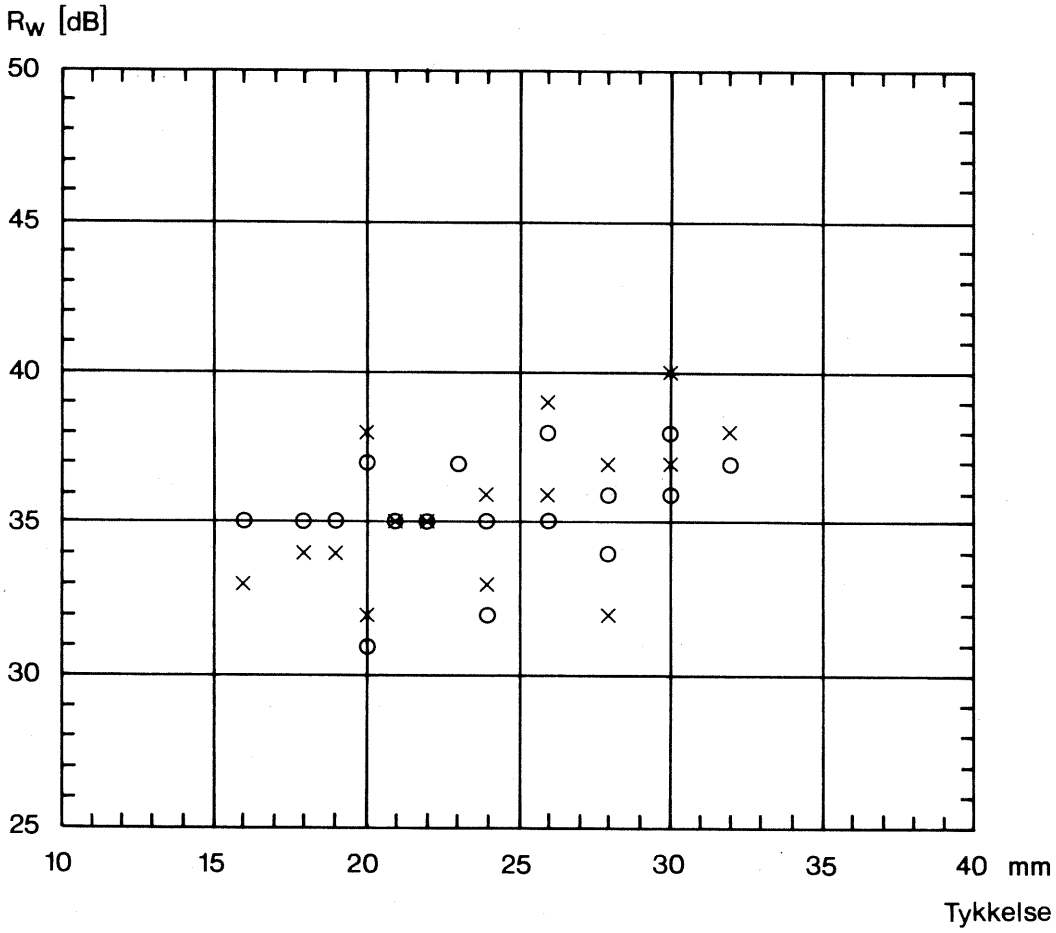
Det er således tydeligt, at der ikke er nogen entydig sammenhæng mellem vægt og lydisolation og at det i høj grad kan betale sig at foretage en optimering.

7.4 Optimering af lydisolation i forhold til rudens tykkelse

Mulighederne for valg af rudetykkelse er begrænset af falsdybden i vinduesrammen. For standardvinduer er falsdybden normalt 40-50 mm i trævinduer og 40-60 mm i kunststofvinduer.

Da glasliste og fugebånd tilsammen fylder mindst ca. 20 mm er den maksimalt tilladelige glastykkelse ofte 20-30 mm i trævinduer og 20-40 mm i kunststofvinduer.

I figur 7.2 er R_W-værdier fra 33 målinger (se afsnit 7.2) afbildet som funktion af den totale rudetykkelse. I gennemsnit giver stigende tykkelse stigende vægt, men der er for hver tykkelse et variationsområde for lydisolationen. Eksempelvis varierer ruder med tykkelse 24-26 mm mellem 32 og 39 dB i R_W-værdi. Hvis der ønskes en rude med tykkelsen 25 ±1 mm og bedst mulig lydisolation, skal der vælges en gasfyldt 4/2/4-12-4 termorude, som har R_W-værdien 38 dB. Vægten og tykkelsen af laminerede ruder er kun meget lidt større end for tilsvarende ikke-laminerede ruder. Da lydisolationen er højere, vil en optimering af en rude uden hensyn til prisen ofte føre til, at en lamineret rude vælges.



Figur 7.2 R_W-værdier for 33 målinger på 2-lags termoruder afbildet som funktion af rudetykkelsen.

o Termoruder med atm. luft

× Termoruder med SF_6

7.5 Optimering af lydisolation i forhold til prisen

Optimering i forhold til prisen er nok den almindeligste form for optimering. Der er gjort forsøg på at indhente brugbare oplysninger om priser. Nogle rudeproducenter benytter imidlertid ikke faste priser eller "prisfaktorer", men vurderer i høj grad hver enkelt sag og fastsætter prisen efter bl.a antallet af ruder ved en bestilling. Det kunne desuden konstateres, at f.eks. prisen for lamineret glas eller gasfyldning af hulrum varierede meget for forskellige rudefabrikater og at denne forskel ikke udlignedes ved et stort antal ruder.

Der tegnede sig således ikke et generelt anvendeligt billede af prisens afhængighed af lydisolationen. En vejledning i optimering i forhold til prisen blev derfor opgivet i denne omgang, selv om den i høj grad kunne have været spændende og ønskelig. Ikke mindst fordi det er en kendsgerning at prisen oftest er afgørende for det endelige valg af rude.

Af de oplysninger, som det lykkedes at fremskaffe, kunne dog ses nogle tendenser. Således afhang prisen for en termorude af glastykkelser, laminering og hulrumsfyldning, men ikke af hulrumsdybden (glasafstanden). En afbildning af lydisolationen i forhold til prisen ville således for ikke-laminerede ruder vise tendenser, der i store træk svarer til figur 7.1, og en termorude til en bestemt pris har altså en lydisolation, der afhænger af rudens opbygning. Endvidere kunne det konstateres, at der i forhold til en almindelig 4-12-4 termorude kunne opnås en væsentlig forbedring af R_W-værdien for en beskeden merpris (ændring af den ene glastykkelse til 6 mm), men at "prisen pr. dB" vokser betydeligt ved højere R_W-værdier.

8. KONKLUSION

Måleresultaterne fra undersøgelsen af 2-lags termoruder viste følgende (gas benyttes som betegnelse for SF_6):

- Termoruder med forskellige glastykkelser kan have en højere lydisolation end symmetriske ruder med samme eller endog noget større vægt.
- Ændringer i hulrumsdybden (glasafstanden) har en afgørende indflydelse på lydisolationen for gasfyldte ruder, men ikke på luftfyldte ruders lydisolation.
- Gasfyldning i små hulrum (6-9 mm) medfører en forringelse af lydisolationen.
- Ved hulrumsdybder over 12 mm medfører gasfyldning en forbedring af lydisolationen.
- Laminering af det ene glaslag forbedrer lydisolationen.

Ruder monteret i et oplukkeligt, tæt vindue havde i de fleste tilfælde en højere lydisolation end de samme rudetyper i en fast karm. Størrelsen af denne "indbygningseffekt" afhang af rudetypen. Ved indbygning af en termorude i et oplukkeligt vindue fås en større bredde af karm + ramme end ved indbygning i en fast karm. Dette har betydning for egensvingninger (parallelt med glassene) i rudens hulrum og dermed for rudens reduktionstal i en del af det aktuelle frekvensområde. Eventuelle utætheder i et oplukkeligt vindue kan dog forringe reduktionstallet, specielt ved højere frekvenser.

Effekten af laminering er knyttet til de højere frekvenser og kan derfor mindskes, hvis vinduet er utæt.

Generelt er betydningen af de enkelte konstruktionsdetaljer knyttet til forskellige frekvensområder, og forskellige ændringer kan ikke uden videre erstatte hinanden. En bestemt lydisolation kan måske kun opnås ved at ændre flere konstruktionsdetaljer. Der er dog en øvre grænse for den opnåelige lydisolation. Denne grænse afhænger ikke alene af termoruden, men også af karm/ramme-materiale og tætninger.

Som mål for et vindues lydisolerende evne er der i den foreliggende rapport anvendt det vægtede reduktionstal R_W [6],

bl.a. fordi denne vurderingsmetode benyttes i BR-82 [1] og ved fastlæggelse af vinduets klassebetegnelse i henhold til DS 1084 [5].

Resultaterne af undersøgelsen viser tydeligt, at der for en given konstruktionstykkelse eller -vægt fås en lydisolation, der i høj grad afhænger af rudens opbygning. En optimering af lydisolationen kan i nogle tilfælde give en forbedring på 3-5 dB for vinduets R_W-værdi.

Såfremt der anvendes andre vurderingsværdier end R_W som mål for vinduets lydisolerende evne (f.eks. I_a-værdi), kan forskellen mellem forskellige rudetyper blive væsentligt større. Dette gælder eksempelvis for termoruder med små hulrum (6-9 mm), hvor der for gasfyldte ruder fås specielt dybe resonansdyk, mens de luftfyldte ruder har et relativt fladt kurveforløb.

Ved undersøgelsen er der benyttet vinduer i formatet 12M × 12M, som er en almindelig vinduesstørrelse, og som i NT ACOU 013-1979 [28] og DS 1084 [5] anbefales til prøvning af vinduer. Der kan ikke påregnes helt samme måleresultater for vinduer i andre formater eller med andre rudestørrelser. Dette er grunden til, at ruder ikke kan prøves "neutralt", dvs. uden indflydelse fra indbygningsmetoden i måleåbningen. Der er således god grund til at fremme bestræbelserne på at få en international prøvningsmetode for ruder.

9. REFERENCER

[1] Bygningsreglement 1982. Byggestyrelsen, København. 1982.

[2] "Bygningsakustiske Laboratoriemålinger". Lydteknisk Laboratorium. Abonnementsserie.

[3] N. Michelsen og B. Rasmussen: "Vinduesformatets betydning for det målte reduktionstal". Lydteknisk Laboratorium, Lyngby. Rapport nr. 22, 1981.

[4] N. Michelsen og B. Rasmussen: "Laboratory Effects on the Measured Sound Reduction Index of Windows and Glazings". Lydteknisk Laboratorium, Lyngby. Rapport nr. 34, 1982.

[5] DS 1084-1982. "Vinduer - Lydisolation - Klassifikation". Dansk Standardiseringsråd, 1982.

[6] DS 2186.3-1982. "Akustik. Vurdering af lydisolation. Del 3: Luftlydisolation af facader og dele af facader". Dansk Standardiseringsråd, 1982.

[7] "Måling af vejtrafikstøj". Vejdirektoratet, Vejdatalaboratoriet, Miljøstyrelsen, 1982.

[8] DS/ISO 1996/1-1983. "Akustik. Måling og beskrivelse af ekstern støj. Del 1: Grundlæggende størrelser og fremgangsmåder". Dansk Standardiseringsråd, 1983.

[9] "Beregningsmodel for vejtrafikstøj". Vejdirektoratet, Vejdatalaboratoriet, rapport 23, 1981.

[10] Birger Plovsing og Christian Svane: "Aircraft Noise Exposure Prediction Model. Guidelines for the Methodology of a Danish Computer Program". Lydteknisk Institut, Lyngby. Rapport nr. 101, 1983.

[11] DS/ISO 140/3-1978. "Akustik. Lydisolationsmålinger i bygninger og af bygningselementer. Del 3: Måling af bygningselementers luftlydisolation i laboratorium". Dansk Standardiseringsråd, 1979.

[12] ISO 717/3-1982(E). "Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 3: Airborne sound insulation of facade elements and facades". ISO, 1982.

[13] ISO/R 717-1968(E). "Rating of Sound Insulation for Dwellings". ISO, 1968.

[14] DIN 52210-T 04-75. "Bauakustische Prüfungen. Luft- und Trittschalldämmung. Ermittlung von Einzahl-Angaben".

[15] NF S 31-051. "Mesure du pouvoir d'isolation acoustique des éléments de construction et de l'isolement des immeubles - Mesure en laboratoire du pouvoir d'isolation acoustique au bruit aérien des éléments de construction".

[16] "Isolering mot utendørs støy. Beregningsmetode". Byggdetaljer G 421.425. Norges Byggforskningsinstitutt, 1981.

[17] NS 3240-1982. "Lydisolerende vinduer. Lydklasser". Norges Byggstandardiseringsråd, 1982.

[18] "Bygningers lydisolering. Nye bygninger". SBI-anvisning 112, 2. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut, 1983.

[19] Bent Andersen: "Facaders Lydisolation over for vejtrafikstøj. En beregningsmetode". Lydteknisk Laboratorium, Lyngby. Rapport nr. 37, 1982.

[20] A. Brekke: "Vinduers Lydisolering". Akustisk Laboratorium, Trondheim. ELAB rapport STF44 A80025, 1980.

[21] P. Derner: "Einfluss der Gasfüllung auf die Schall- und Wärmedämmung von Isoliergläsern". Glastechnische Berichte. Heft 5, Mai 1975, p. 84-90.

[22] K. Gösele und B. Lakatos: "Verbesserung der Schalldämmung von Isolierglasscheiben durch Gasfüllung". Glastechnische Berichte. Heft 5, Mai 1975, p. 91-95.

[23] H.J. Gläser: "Verbesserung der Wärmedämmung bei Isoliergläsern". Glastechnische Berichte 50 (p. 248-256), 1977.

[24] K. Gösele, U. Gösele und B. Lakatos: "Einfluss einer Gasfüllung auf die Schalldämmung von Isolierglasscheiben". Acustica Vol. 38, 1977, p. 167-174.

[25] Tom Christensen: "Levetid for gasfyldte isoleringsruder". Jydsk Teknologisk Institut. Energiministeriets forskningsprogram 81, projekt nr. R 00-32. 1983.

[26] DS 1005-1958. "Vinduer af træ - Terminologi og målebenævnelser". Dansk Standardiseringsråd, 1958.

[27] "Glas til husbehov". Scanglas, 1984.

[28] NT ACOU 013-1979. "Doors and Windows: Sound Reduction Index". Nordtest, 1979.

[29] Nic Michelsen: "Repeatability of Sound Insulation Measurements". Lydteknisk Laboratorium, Lyngby. Rapport nr. 36, 1982.

[30] P. Derner, R. Groth, D. Mertin og W. Zernial: "Optimierung einer multifunktionalen Isolierverglasung bezoglich Schall- und Wärmedämmung". Flachglas A/S. Indlæg på internationalt seminar i Brüssel, 1979.

FORTEGNELSE OVER LYDTEKNISK
LABORATORIUMS PUBLIKATIONER

Rapport nr. 1, 1975: *Fritz Ingerslev og Ulrik Danneskiold-Samsøe*
Måling af byggepladsstøj.

Rapport nr. 2, 1975: *Poul Hansen*
Et datamaskineprogram til beregning af støjbelastningen omkring en flyvesektor.

Rapport nr. 3, 1975: *Nic Michelsen*
Transmissionsrummenes indflydelse på det laboratoriemålte reduktionstal. Delprojekt I: Opbygning af modelrum.

Rapport nr. 4, 1976: *Nic Michelsen*
Sammenlignende reduktionstalsmålinger for døre målt i laboratorium.

Rapport nr. 5, 1977: *Jørgen Kragh*
Analyse af sammenhængen mellem reaktioner på vejtrafikstøj og fysiske mål for støjen.

Rapport nr. 6, 1976: *Torben Astrup*
Måling af hørbart toneindhold i ekstern virksomhedsstøj.

Rapport nr. 7, 1977: *Poul Hansen*
Rapport vedrørende digitalt databehandlingsudstyr til Lydteknisk Laboratorium.

Rapport nr. 8, 1977: *Jørgen Kragh*
Støj i byområder. En undersøgelse af støjforhold og forbedringsmuligheder i et eksisterende byområde.

Rapport nr. 9, 1977: *Jørgen Kragh*
Bevoksningers støjdæmpning. Måling af bevoksningers dæmpende virkning over for støj fra jernbanetrafik.

Rapport nr. 10, 1978: *Torben Astrup*
Måling af ekstern støj fra virksomheder. Prototypemålinger.

Rapport nr. 11, 1978: *Jørgen Kragh*
Jordvoldes støjdæmpning. En undersøgelse af meteorologiske forholds indflydelse på jordvoldes støjdæmpende egenskaber.

Rapport nr. 12, 1978: *Poul Hansen*
Rapport vedrørende parallelanalysator og logaritme/antilogaritmeenhed i tilknytning til Lydteknisk Laboratoriums digitale databehandlingsudstyr.

Rapport nr. 13, 1978: *Poul Hansen*
Et datamaskineprogram til generel behandling af store datamængder med henblik på regressionsanalyse.

Rapport nr. 14, 1979: *Jørgen Kragh*
Bevoksningers støjdæmpning. Måling af bevoksningers dæmpende virkning over for støj fra vejtrafik.

Rapport nr. 15, 1978: *Nic Michelsen*
Måling af baflers absorption.

Rapport nr. 16, 1978: *Nic Michelsen*
Karakterisering af gulvbelægningers trinlyddæmpende egenskaber ved en enkelt talværdi.

Rapport nr. 17, 1979: *Nic Michelsen*
Måling i laboratorium af strålingsfaktor for skibsskod.

Rapport nr. 18, 1979: *Nic Michelsen*
The Effects of Laboratory Design on the Measured Sound Reduction Index.

Rapport nr. 19, 1980: *John Klinkby Olsen og Nic Michelsen*
En simpel målemetode til bestemmelse af lydisolationen i boligbyggeri.

Rapport nr. 20, 1980: *Nic Michelsen*
Måling af ækvivalent absorption ved brug af en referencelydkilde.

Rapport nr. 21, 1980: *Torben Astrup*
Støj fra tunge køretøjer. Måling af tunge køretøjers støjemission.

Rapport nr. 22, 1981: *Nic Michelsen og Birgit Rasmussen*
Vinduesformatets betydning for det målte reduktionstal.

Rapport nr. 23, 1981: *Jørgen Kragh og Bent Andersen*
Trafikstøj i bebyggelse. Måling og beregning af lydtrykniveauet af vejtrafikstøj i åben villabebyggelse.

Rapport nr. 24, 1981: *Jan Gybel*
Lydudstrålingen fra værktøjsmaskiner ved forskellige driftsparametre.

Rapport nr. 25, 1981: *Jørgen Jakobsen*
Prediction of Noise Emission from Facades of Industrial Buildings.

Rapport nr. 26, 1981: *Poul Hansen*
A Digital Airport Noise Computation Program.

Rapport nr. 27, 1981: *Nic Michelsen*
Måling af baflers absorption - II.

Rapport nr. 28, 1982: *Poul Hansen*
Real Time 1/3 Octave Analyzer Computer Program.

Rapport nr. 29, 1982: *Birger Plovsing and Christian Svane*
Aircraft Noise Exposure Prediction Model. Guidelines for the Methodology of a Danish Computer Program.

Rapport nr. 30, 1982: *Jørgen Kragh*
Bevoksningers støjdæmpning III. Måling af bevoksningers dæmpende virkning over for vejtrafikstøj. Supplerende måleresultater og sammenfatning.

Rapport nr. 31, 1982: *Jørgen Kragh*
Road Traffic Noise Attenuation by Belts of Trees and Bushes. Results of a Supplementary Series of Measurements.

Rapport nr. 32, 1982: *Jørgen Kragh, Bent Andersen & Jørgen Jakobsen*
Environmental Noise from Industrial Plants. General Prediction Method.

Rapport nr. 33, 1982: *Torben Holm Pedersen*
Round Robin Test af lydtrykmålere, mikrofoner og kalibratorer.

Rapport nr. 34, 1982: *Nic Michelsen & Birgit Rasmussen*
Laboratory Effects on the Measured Sound Reduction Index of Windows and Glazings.

Rapport nr. 35, 1982: *Karsten Bo Rasmussen*
Sound Propagation over Non-Flat Terrain.

Rapport nr. 36, 1982: *Nic Michelsen*
Repeatability of Sound Insulation Measurements.

Rapport nr. 37, 1982: *Bent Andersen*
Facaders lydisolation over for vejtrafikstøj.

FORTEGNELSE OVER PUBLIKATIONER FRA
AFDELINGEN FOR LYDTEKNIK, TEKNOLOGISK INSTITUT

Lærebog

1982 *Jan Voetmann (red.) m.fl.*
Akustik for bygningsteknikere. Lærebog + opgavehæfte. 2. udgave.

Rapporter

1978 *Jens Viggo Larsen*
Rapport til Hovedstadsrådet om støj ved motorsportsanlæg.

1978 *Jens Viggo Larsen*
Rapport til Roskilde Amtskommune om køreteknisk anlæg i Hedeland.

1978 *Jens Viggo Larsen*
Undersøgelse af mulighederne for at anvende modelforsøg i forbindelse med støjplanlægning.

1979 *Palle Voss, Niels Olsen og Steen Levin Nielsen*
Vibrationsskader fra håndværktøjer. 3 bind: Hovedrapport, Bilag til hovedrapport samt Måletekniske laboratorieforsøg.

1979 *Palle Voss (red.) m.fl.*
Maskinvibrationer og vibrationsbaseret tilstandskontrol. Indlæg ved temadag.

1981 *Bent Emstrup og Knud Gravlund*
Forsøg med multiplansbalancering af fleksibel rotor.

1981 *John Klinkby*
Lydabsorbenter i levnedsmiddelindustrien. 2 bind.

1981 *Palle Voss*
Arbejdshandskers vibrationsisolerende virkning.

FORTEGNELSE OVER REDEGØRELSER FRA MILJØSTYRELSENS
REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER - LYDTEKNISK INSTITUT

Redegørelse no. 1, 1980: *Torben Astrup, Ole Carlsen og Torben Holm Pedersen*

1. sammenlignende støjmåling.

Redegørelse no. 2, 1980: *Ole Carlsen*

Båndoptageren og dens anvendelse ved støjmålinger.

Redegørelse no. 3, 1981: *Jørgen Jakobsen*

Vindmåling i forbindelse med udendørs støjmåling.

Redegørelse no. 4, 1983: *Ole Carlsen*

Anden sammenlignende støjmåling.

FORTEGNELSE OVER LYDTEKNISK
INSTITUTS PUBLIKATIONER

Rapport nr. 101, 1983: *Birger Plovsing and Christian Svane*
Aircraft Noise Exposure Prediction Model. Guidelines for the Methodology of a Danish Computer Program.

Rapport nr. 102, 1983: *Poul Hansen*
Lydteknisk Instituts PDP8A databehandlingsudstyr.

Rapport nr. 103, 1983: *Anders C. Nilsson*
A Method for the Prediction of Noise and Velocity Levels in Ship Constructions.

Rapport nr. 104, 1983: *Anders C. Nilsson and Birgit Rasmussen*
Absorption Properties of a Perforated Plate and Membrane Construction.

Rapport nr. 105, 1983: *Jørgen Jakobsen and Bent Andersen*
Noise Immission from Industry. Measurement and Prediction of Environmental Noise from Industrial Plants.

Rapport nr. 106, 1983: *Knud Skovgård Nielsen*
Støjsvage maskinkonstruktioner. En statusrapport.

Rapport nr. 107, 1983: *Jørgen Kragh*
Måling og beregning af ekstern støj fra virksomheder. En statusrapport.

Rapport nr. 108, 1983: *Jørgen Jakobsen and Bent Andersen*
Wind Noise. Measurements of Wind-Generated Noise from Vegetation and Microphone system.

Rapport nr. 109, 1983: *Bent Andersen and Jørgen Jakobsen*
Noise Emission from Wind Turbine Generators.

Rapport nr. 110, 1984: *Karsten Bo Rasmussen og Bent Andersen*
Beregning af vejtrafikstøj i tæt bymæssig bebyggelse.

Rapport nr. 111, 1984: *Karsten Bo Rasmussen*
The Effect of Terrain Profile on Sound Propagation Outdoors.

Rapport nr. 112, 1984: *John Klinkby*
Støjdeklaration af varmepumper.

Rapport nr. 113, 1984: *Birgit Rasmussen*
Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder.

Assistance ved montage af vinduer:	Robert Mortensen, Hans Heinze m.fl.
Assistance ved målinger:	Robert Mortensen og Hans Heinze
Tegninger:	Birgitte Mann
Maskinskrivning:	Birgitte Mann og Lene Møller
Trykning:	Tekst & Tryk A/S
Indbinding:	Hans Meyers Bogbinderi

© Lydteknisk Institut, 1984.