

Optimal vinduesudformning
- en varmeteknisk undersøgelse

Kirsten Engelund Thomsen - Jørgen M. Schultz

Laboratoriet for Varmeisolering
Meddelelse nr. 201

Danmarks Tekniske Højskole
December 1990

LAVENERGIGRUPPEN: Bjarne Saxhof, civ.ing., projektleder
Mogens R. Byberg, lektor, civ.ing.
Jørgen M. Schultz, civ.ing.
Kirsten Engelund Thomsen, civ.ing.
Kim B. Wittchen, civ.ing.

FORORD

Nærværende rapport omhandlende optimal vinduesudformning indgår i rapportrækken over Energiministeriets Lavenergiprojekter ved Laboratoriet for Varmeisolering (LfV). Under EFP-84 blev bevilget midler til dette projekt ("Optimal vinduesudformning", ENS j.nr. 401-04-01, programområde 1.2.1 Klimaskærmen) med LfV som projektudførende. Formålet har været at finde frem til den bedste kombination af 1) vinduesplacering i forhold til vægtykkelser 2) vinduesstørrelse og -form 3) antal glaslag 4) rudetype (med og uden coating) og 5) mobil nati-solering for opnåelse af det laveste samlede energiforbrug.

Arbejdet omfatter hovedsageligt teoretiske overvejelser og beregninger, og endvidere nogle praktiske målinger foretaget i Lavenergiekspérimenthuset på DTH.

Resultater fra projektet har tidligere været præsenteret på Nordisk Symposium om Bygningsfysikk, Norges Tekniske Højskole, Trondheim, 20.-22. august 1990.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord	
Resumé	6
Summary	7
1. Indledning	8
2. Varmeovergange for flerlagsruder	9
2.1 Ind- og udvendig varmeovergang	9
2.2 Varmeovergang i hulrum	12
3. Parameteranalyse af varmestrømme og temperaturfelter	16
3.1 Modellens opbygning	16
3.2 Beskrivelse af vægtyper og vinduespositioner	18
3.3 Det todimensionale randfelts udstrækning	20
3.4 Varmestrømme og minimumtemperaturer	21
3.5 Betydningen af størrelsen af indvendig overgangsisolans	24
3.6 "U-værdier" (U_{2D}) beregnet todimensionalt med hensyntagen til vægtype	27
4. Beregning af solindfaldet gennem vinduer under hensyntagen til skyggende genstande	29
4.1 Beskrivelse af programmet	29
4.2 Eksempel på skygebilleder	30
4.3 Beregning af solindfaldets størrelse i forhold til varmetabet	32
4.4 Energibalance for lavenergihus	32
5. Varmebalancer for vinduer	34
5.1 Betydningen af vinduesstørrelse og orientering	34
5.2 Betydningen af vinduets form	43
5.3 Betydningen af karmens bredde	44
5.4 Betydningen af flerlagsruder, gasfyldning og coating	45
5.5 Betydningen af mobilisolering	48
6. Måleserie i eksperimenthus	54
6.1 Beskrivelse af forsøgsopstilling	54
6.2 Måling af soltransmission	55
6.3 Måling af U-værdier	55
7. Økonomisk vurdering	58

8. Konklusion	61
9. Litteraturliste	64
LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering, DTH	67
Appendix: Thermal Analysis of Window Design. Off-print af paper præsenteret på Nordisk Symposium om Bygningsfysikk, Trondheim, 20.-22. august 1990	74

RESUMÉ

Formålet med projektet er at finde den bedste kombination af 1) vinduesplacering i forhold til vægtykkelser 2) vinduesstørrelse og -form 3) antal glaslag 4) rudetype (med og uden coating) og 5) mobil natisolering for opnåelse af det laveste samlede energiforbrug.

Arbejdet omfatter hovedsageligt teoretiske overvejelser og beregninger, og endvidere nogle praktiske målinger foretaget i Lavenergieksperimenthuset på DTH.

Vinduer bør være sydorienteret. Hvis vinduet flyttes fra en sydvendt flade (nettovarmetab 105 kWh/m²) til en øst- eller vestfacade vil nettovarmetabet forøges med 75 kWh/m² (70%) i fyringssæsonen.

Som en hovedregel bør vinduer placeres ud for væggen isoleringslag, idet indflydelsen fra de flerdimensionale felter herved minimeres, ellers vil nettovarmetabet pr. m² vindue forøges med ca. 10% i fyringssæsonen. Hvis det er muligt at flytte vinduet længere ud i væggen uden at skabe alvorlige kuldebroer, vil nettovarmetabet falde med ca. 10% på grund af en forøgelse af solindfaldet.

Brug af isolerende skodder (U-værdi af skodde plus 2-lags rude = 0,9 W/m²K) hver nat i fyringssæsonen gør nettovarmetabet for vinduet negativt (-15 kWh/m²).

Fra et termisk synspunkt skal glasarealet inddeles i så få vinduer som muligt for at reducere indflydelse af ramme/karm, fx vil nettovarmetabet forøges med ca. 65%, hvis et 1,2 x 1,2 m vindue bliver udskiftet med 0,6 x 0,6 m vinduer. Den optimale vinduesform for et sydvendt vindue er kvadratisk, idet glasarealet ifht. det totale areal i dette tilfælde bliver størst, ensbetydende med at omkredsen af vinduet minimeres. Det endelige design vil blive et kompromis mellem energibesparelse, dagslys og arkitektoniske hensyn.

Brug af gasfyldte og coatede ruder med lave U-værdier vil som oftest være at foretrække, idet der er en stor reduktion af nettovarmetabet til trods for en nedsættelse af solindfaldet.

Resultater fra projektet har tidligere været præsenteret på Nordisk Symposium om Bygningsfysik, Norges Tekniske Højskole, Trondheim, 20.-22. august 1990.

SUMMARY

The purpose of the project is to find the best combination of 1) where the windows should be placed in the wall, 2) the size and form of the windows, 3) the number of glass layers, 4) type of window (with and without coating) and 5) mobile night insulation to obtain the lowest possible energy consumption.

The work has mainly consisted of studies and calculations, but some practical measurements have also been made in the low energy experimental house at the Technical University of Denmark.

Windows should be south orientated. If the windows are moved from the south facade (net heat loss 105 kWh/m²) to an east or west facade the net heat loss increases by 75 kWh/m² (70%) in the heating season.

As a main rule windows should be positioned in continuation of the insulation layer in the surrounding wall. Otherwise the net heat loss per m² window can increase by about 10% in the heating season. If it is possible to move the window outwards in the wall construction without creating serious thermal bridges around the joint between the window and the wall, the net heat loss will decrease by about 10% due to an increase in solar heat gains.

When using insulating shutters (U-value of shutter plus window with 2 layers of glass = 0.9 W/m²K) every night during the heating season the net heat loss for the window will be negative (-15 kWh/m²).

From a thermal point of view, the total glass area of a house should be divided into as few windows as possible for reduction of the influence from the thermal bridge effect from the frame and case, eg the net heat loss per m² will increase by 65% if the 1.2 m · 1.2 m window is exchanged with 0.6 m · 0.6 m windows. The final design will be a compromise between energy savings, daylighting and architectural considerations.

Use of gas filled and low emissivity coated window panes with low centre U-values will most often be preferable as there is a big reduction of the net heat loss in spite of a decrease in solar heat gains.

The results from the project have been presented at the symposium "Building Physics in the Nordic Countries", Trondheim, Norway, August 20-22, 1990.

1. INDLEDNING

At vinduer har stor betydning for boligens varmetab og varmetilskud og dermed også på det termiske indeklima er velkendt. Denne betydning bliver mere og mere udpræget, idet transmissionstab for de øvrige bygningsdele ret enkelt kan reduceres ved anvendelse af store isoleringstykkelser, medens vinduerne skal forblive transparente og oftest også oplukkelige. Gennem de sidste 30 år har varmetabet gennem boligens vinduer ændret sig fra at udgøre ca. 15% af det samlede varmetab gennem klimaskærmen til at udgøre ca. 35% for et enfamiliehus opført efter Bygningsreglementet (BR82). I lavenergihuse, hvor vægge og lofter er isoleret svarende til 200-400 mm mineraluld, kan halvdelen af det samlede transmissionstab henføres til vinduerne.

En almindelig to-lagstermorude har en transmissionskoefficient (U-værdi), der er ca. 10 gange større end U-værdien for en væg, men samtidig giver vinduerne et gratis energitilskud fra solindfaldet. Denne solstråling kan ikke altid udnyttes, idet indetemperaturen kan blive for høj fx på varme sommerdage. Man har derfor behov for at have nøjagtige oplysninger om solindfaldet gennem vinduerne ved beregning af bygningens energiforbrug. Energiforbruget er imidlertid ikke alene bestemt af varmetabet til det fri og solindfaldet, men i høj grad afhængig af den varme, som tilføres bygningen fra andre varmetilskud (såsom personer, lys etc.). Størst mulig udnyttelse af solvarmen opnås ved optimering af det komplekse samspil mellem vægkonstruktion, vinduesudformning og evt. solafskærmning.

De oprindelige funktioner for et vindue var og er at slippe lys ind og at fungere som ventilationsåbning. Disse primære krav er i Bygningsreglementet (BR82) beskrevet således: *"Beboelsesrum og køkken skal have vinduer til det fri med et vindueskarmlysningsareal på mindst 10% af rummets gulvareal. I mange tilfælde skal vinduet fungere som redningsåbning og derved have en nøjere fastlagt størrelse. Desuden skal vinduet ofte - undtagen i huse med mekanisk ventilationsanlæg og varmegenvinding - give ventilationsmulighed"*. Samtidig må - if. BR82 - husets samlede vinduesareal højst udgøre 15% af bygningens bruttoetageareal, hvis de angivne værdier for transmissionskoefficienterne bruges. Andre transmissionskoefficienter og vinduesarealer kan bruges, såfremt det samlede dimensionerende varmetab i henhold til DS418 /8/ ikke derved bliver større.

I denne rapport fokuseres på det rent varmetekniske dvs. de nettoenergitilførsler, der opnås ved alternative udformninger og placeringer af vinduet.

2. VARMEOVERGANG FOR FLERLAGSRUDER

Glas har et varmeledningstal på 0,8 W/mK, og en 4 mm glasskive får således en isolans på 0,005 m²K/W - en meget lav værdi. Dette betyder, at glasset som materiale betragtet kun yder et forsvindende bidrag til vinduers varmeisoleringsevne. De væsentlige bidrag kommer fra overgangsisolanserne og især fra stillestående luftlag mellem ruderne. Teorien for varmeovergange ved vinduer er ret kompliceret, og der tages i det følgende ikke hensyn til sol- og himmelstrålingens indvirken på vinduets temperatur- og overgangsforhold.

2.1 Ind- og udvendig varmeovergang

Varmestrømmen mellem overflade og det omgivende rum beskrives ved varmeovergangstallet α eller isolansen R , hvor der gælder $\alpha = 1/R$. Denne varmeveksling kan ske dels ved stråling og dels ved konvektion, således at en tilnærmet bestemmelse af den indvendige og den udvendige overgangsisolans kan foretages ved hjælp af formlerne:

$$R_i = \frac{1}{\alpha_{k,i} + \alpha_{s,i}} \quad m^2 K / W$$

$$R_u = \frac{1}{\alpha_{k,u} + \alpha_{s,u}} \quad m^2 K / W$$

α_k : varmeovergangstallet ved konvektion [W/m²K]
 α_s : varmeovergangstallet ved stråling [W/m²K]
indeks i, u : refererer til indvendig hhv. udvendig

Konvektion

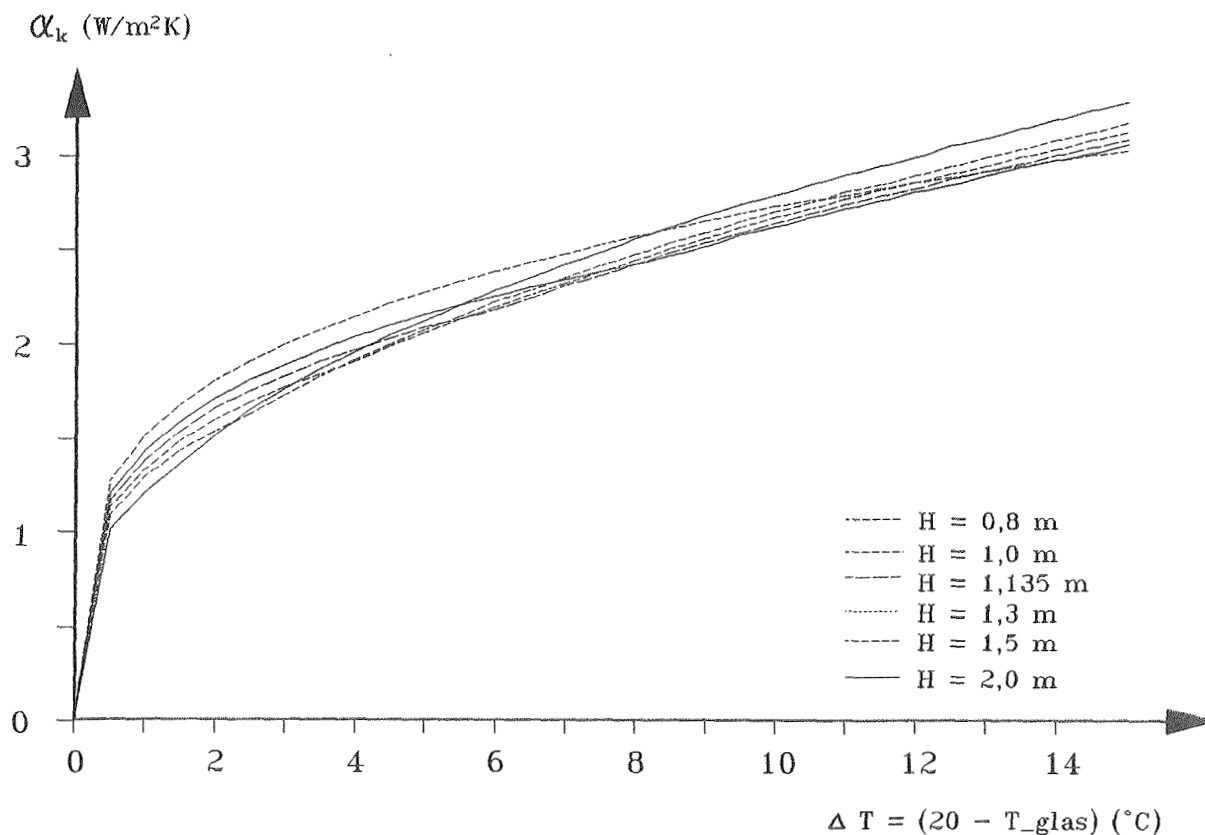
For varmeoverføringen ved konvektion bliver grundligningen:

$$\frac{Q_k}{A} = \alpha_k (T_{\text{luft}} - T_{\text{overflade}}) \quad W / m^2$$

Q_k / A : konvektiv varmestrøm pr. m² [W/m²]
 α_k : varmeovergangstallet ved konvektion [W/m²K]
 T_{luft} : lufttemperatur [°C]
 $T_{\text{overflade}}$: overfladetemperatur af glasset [°C]

hvor α_k findes ved eksperimentelt fundne sammenhænge sædvanligvis udtrykt ved hjælp af de dimensionsløse størrelser Nu (Nusselt-tal), Re (Reynolds-tal), Gr (Grashof-tal) og Pr (Prandtl-tal).

Den indvendige konvektive varmeovergang afhænger af rudehøjden og temperaturdifferensen mellem ruden og rumluften. Til illustration af denne afhængighed er det konvektive varmeovergangstal afbildet for forskellige rudehøjder som funktion af temperaturdifferensen.



Figur 1. Den konvektive varmeoverføring midlet over rudehøjden som funktion af temperaturdifferensen mellem rumluften og den indvendige glasoverflade for forskellige rudehøjder.

Ifølge litteratur [3] kan det indvendige konvektive overgangstal for vinduer ved fuldt udviklet strømning sættes til:

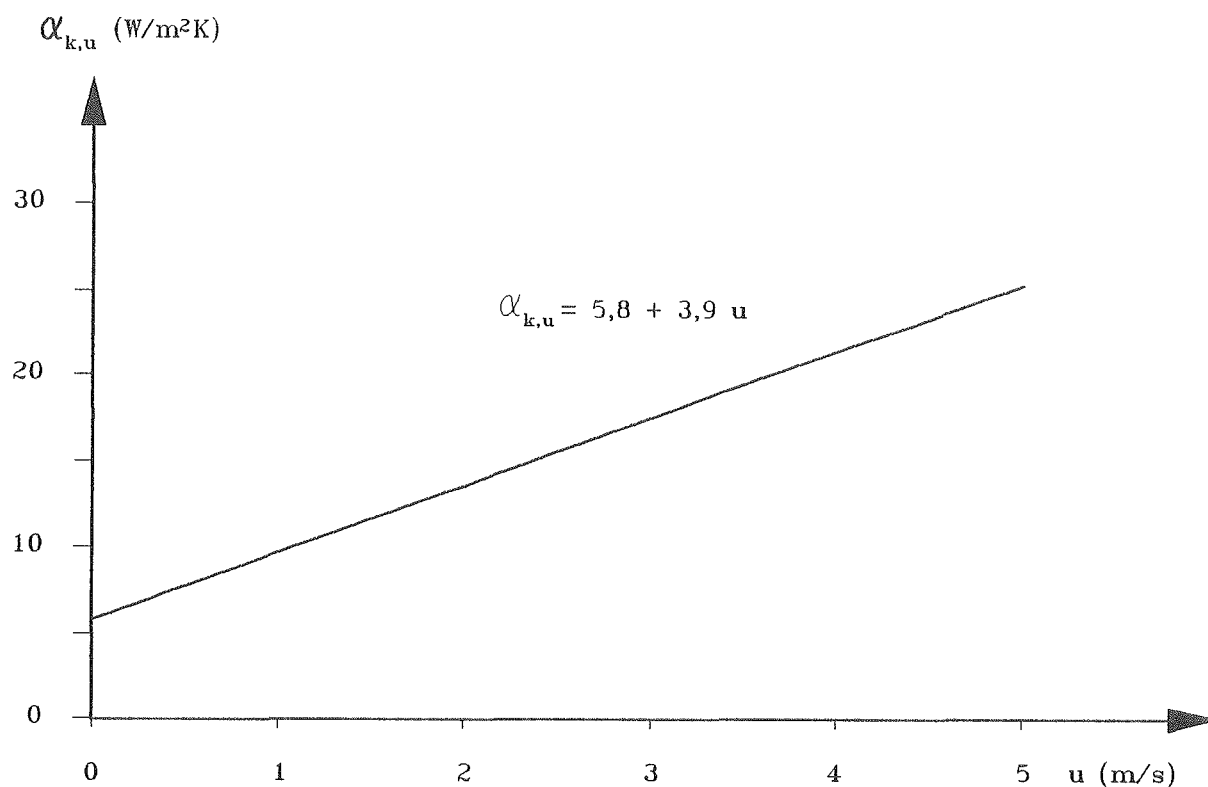
$$\alpha_{k,i} = 2,2(T_{\text{luft}} - T_{\text{overflade}})^{0,25} \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

$\alpha_{k,i}$: konvektiv varmeovergangstal ved indvendig glasoverflade [W/m²K]

T_{luft} : lufttemperatur [°C]

$T_{\text{overflade}}$: temperatur af glasoverflade [°C]

Strømningen langs ydersiden af vinduet kan beskrives ved hjælp af teorien for tvungen konvektion, som afhænger af vindhastigheden. Da denne varierer momentant, anvendes gennemsnitsværdier af vindhastigheden til at beregne det udvendige varmeovergangstal. På modstående figur er vist den konvektive varmeoverføring som funktion af vindhastigheden.



Figur 2. Konvektivt overgangstal ved udvendig side af rude /23/.

Stråling

Den ind- og udvendige varmeoverføring består, ud over den konvektive varmeoverføring, af et strålingsbidrag. Den resulterende strålingsudveksling mellem to "grå overflader" (foruden at absorbere stråling reflekteres en brøkdel af denne diffust) kan udtrykkes ved følgende formel:

$$\frac{Q_s}{A} = \alpha_s (T_{\text{luft}} - T_{\text{overflade}}) \quad \text{W/m}^2$$

- Q_s / A : varmestrøm pr. m^2 ved stråling [W/m^2]
 α_s : varmeovergangstallet ved stråling [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 T_{luft} : lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{\text{overflade}}$: overfladetemperatur af glasset [$^{\circ}\text{C}$]

Ann-Charlotte Andersson /3/ angiver en formel for α_s under forudsætning af, at der findes en fælles temperatur af de omgivende flader T_{middel} :

$$\alpha_s = \epsilon_{\text{res}} \cdot \alpha_{ss} = \epsilon_{\text{res}} \cdot 0,04 \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{\frac{1}{2}(T_{\text{overflade}} + T_{\text{middel}})}{100} \right)^3 \quad W/m^2K$$

α_s :	varmeovergangstallet ved stråling [W/m ² K]
ϵ_{res} :	$\epsilon_1 \cdot \epsilon_2$
ϵ_1 :	emissionen for flade 1
ϵ_2 :	emissionen for flade 2
α_{ss} :	varmeovergangstallet ved stråling mellem to absolut sorte legemer [W/m ² K]
σ_s :	Stefan-Boltzmann's konstant $\cdot 10^8 = 5,7 \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$T_{\text{overflade}}$:	overfladetemperatur af flade 1 [K]
T_{middel} :	middeloverfladetemperatur af flade 2 [K]

Den udvendige varmeovergangsmodstand udgør kun en lille del af rudens samlede modstand, hvorfor der i de følgende beregninger antages, at den udvendige varmeovergangsmodstand har den i DS418 angivne værdi på 0,04 m²K/W. Til beregningerne i afsnit 3.4 bruges den i DS418 angivne værdi for den indvendige overgangsisolans på 0,13 m²K/W, mens der i afsnit 3.5 er lavet en analyse af betydningen af denne størrelse.

2.2 Varmeovergang i hulrum

U-værdien for flerlagsruder beregnes af formeludtrykket:

$$U = \frac{1}{R_i + R_u + \sum R_l + \sum R_m} \quad W/m^2K$$

U :	transmissionskoefficienten [W/m ² K]
R_i :	overgangsisolans ved indv. overflade [m ² K/W]
R_u :	overgangsisolans ved udv. overflade [m ² K/W]
R_l :	isolans for luftlag [m ² K/W]
R_m :	isolans for materialelag [m ² K/W]

Varmeovergangen i selve hulrummet vil foregå som stråling og enten ledning eller konvektion.

I ligningen for α_s anvendes for 2 tætliggende parallelle skiver følgende udtryk for ϵ_{res} :

$$\epsilon_{\text{res}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

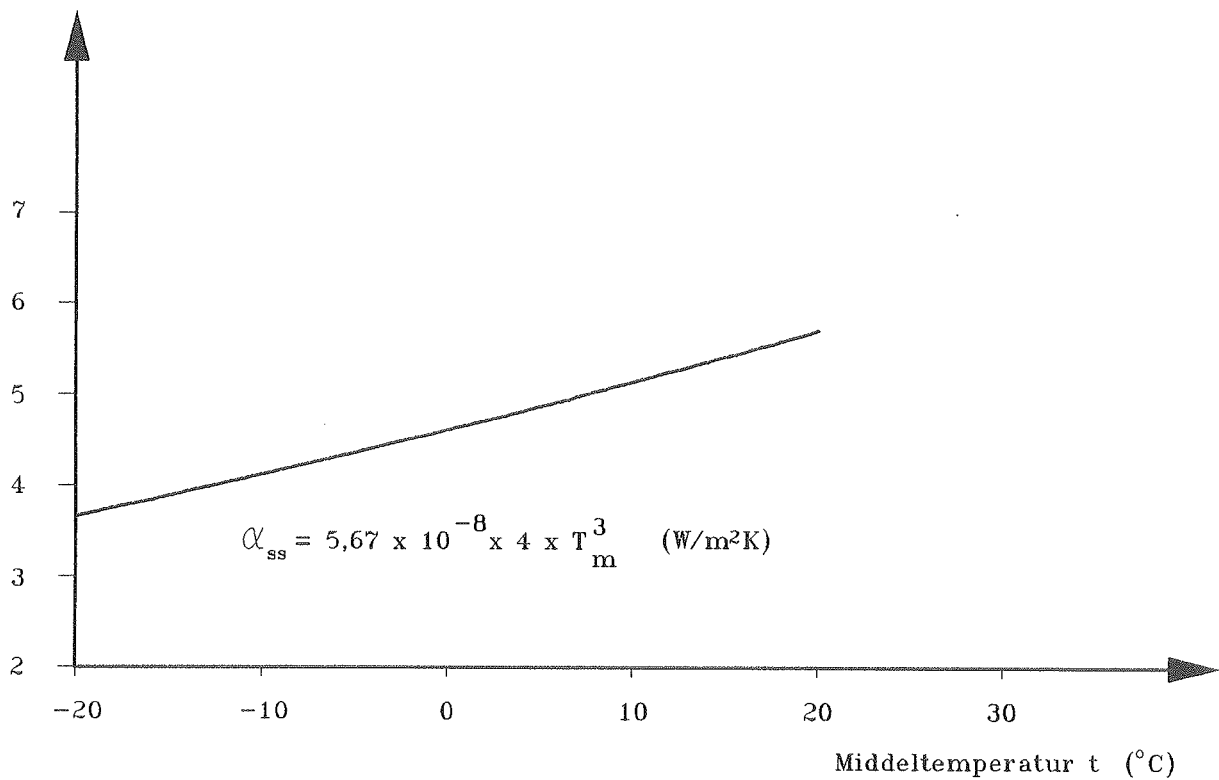
hvor ϵ_1 og ϵ_2 er de indgående fladers emissionstal. For almindeligt glas er $\epsilon = 0,85$.

For varmeovergangstallet ved stråling kan følgende udtryk benyttes:

$$\alpha_s = \epsilon_{res} \cdot \alpha_{ss} \quad W/m^2K$$

$$\text{hvor } \alpha_{ss} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot T_m^3 \quad W/m^2K$$

$$\alpha_{ss} \quad (W/m^2K)$$



Figur 3. Varmeovergangstallet ved stråling mellem to absolut sorte legemer.

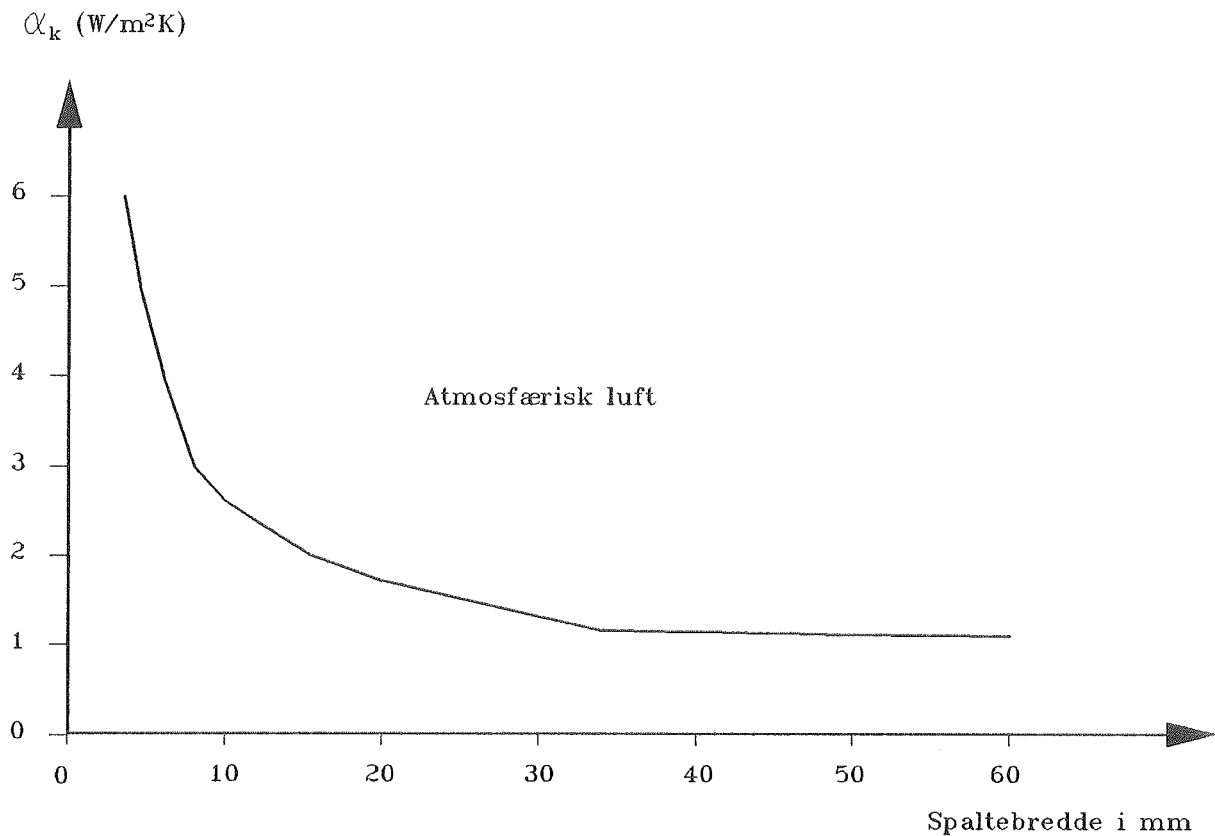
Det fremgår af ovenstående formel, at varmeoverføring ved stråling er stærkt afhængig af emissionstallet ϵ . Forskellige værdier for emissionstallet fremgår af følgende tabel:

Tabel 1. Emissionstal for vinduesglas med forskellig coating.

Materiale	ϵ
Glas	0,85
Guld (Au)	0,05
Sølv (Ag)	0,05
Kobber (Cu)	0,03
Aluminium (Al)	0,04
Indiumoxid ($\text{In}_2\text{O}_3\text{:Sn}$)	0,08
Tinoxid ($\text{SnO}_2\text{:Sb}$)	0,22
Zinkoxid	0,11
Ag + ZnS	0,05

Varmeoverføring ved stråling udgør for en normal dobbeltrude ca. 60% af den samlede varmeoverføring mellem glassene. Ved coating med en belægning med $\epsilon = 0,05$ på den ene overflade reduceres varmeoverføringen ved stråling med ca. 95%. Man opnår således en væsentlig reduktion af varmetabet ved brug af coatede ruder, men samtidig reduceres den til opvarmning nyttiggjorte solenergi. Solstrålingen reduceres, fordi coatingen bevirker en forøgelse af vinduets refleksion.

Det konvektive varmeovergangstal α_k afhænger af bredden af luftspalten mellem glassene. Den maksimale isolans fremkommer ved ca. 30 mm luftspalte, og er næsten uændret op til 60 mm.



Figur 4. Det konvektive varmeovergangstal som funktion af spaltebredden.

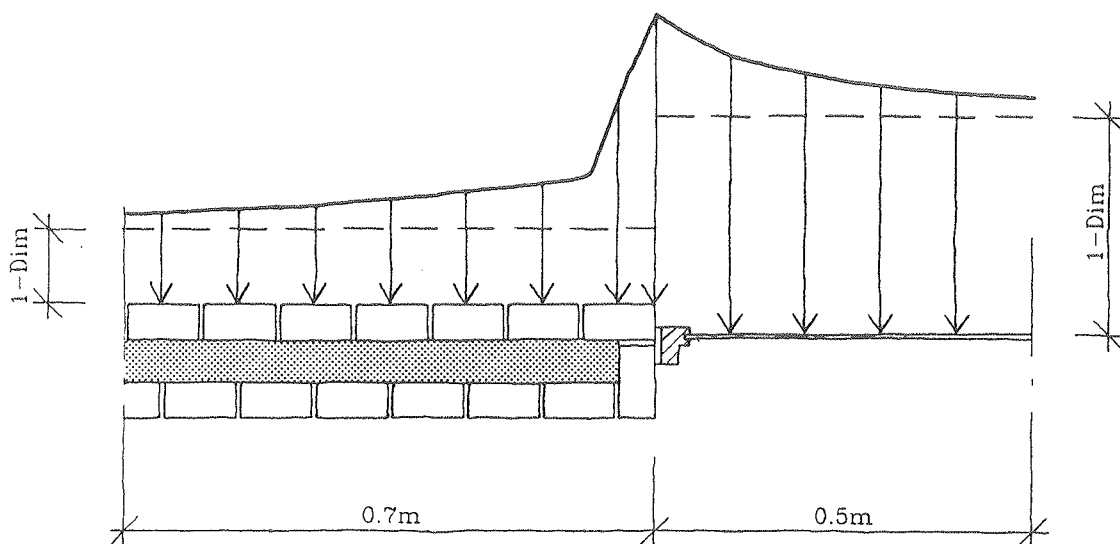
Der er endnu en parameter, som man kan ændre på for at nedsætte vinduets varmetab, nemlig gasarten mellem glassene. Den konvektive varmeovergang afhænger af gassens varmelednings-
evne og viskositet. Disse materialeegenskaber har betydning dels for varmeledningen og var-
meoptagelsen i gassen, og dels for strømningshastighed og strømningstype.

3. PARAMETERANALYSE AF VARMESTRØMME OG TEMPERATURFELTER

3.1 Modellens opbygning og forudsætninger

Til at vurdere betydningen af vinduets placering i væggen rent varmemæssigt er nedenstående konstruktioner - figur 5 - blevet analyseret vha. TODIM, et EDB-program til beregning af todimensionale varmem strømme. Den brugte beregningsmodel udnytter analogien mellem den termiske og elektriske modstand /16/ og EDB-programmet er en tilpasset version af et program til beregning af elektriske modstande udviklet på Stærkstrømsafdelingen på Danmarks Tekniske Højskole /20/.

Et udsnit af et stykke væg med isat vindue betragtes.



Figur 5. Illustration af varmem strømme.

Som figuren antyder, eksisterer der en endimensional varmem strøm, men i praksis sker det ofte, at vægstykket mellem vinduerne er så smalt, at varmem strømmen bliver som skitseret. En nærmere undersøgelse af dette problem er beskrevet i afsnit 3.3. I de følgende beregninger er valgt 0,7 m væg og 0,5 m vindue.

Der er forudsat konstante ude- og indetemperaturer på hhv. -12 og 20°C , men da der er lineær sammenhæng mellem varmetabet og temperaturforskellen, kan varmetabet bare angives pr. grads temperaturforskel, og dermed er det ligegyldigt, hvilken temperaturforskel, der bruges.

Hvad angår overfladetemperaturerne er det mere interessant, hvilke temperaturer der er valgt, men de angivne overfladetemperaturer kan også opnås for andre temperaturforskelle vha. følgende formel:

$$T_{over, ny} = T_{i, ny} - (20 - T_{over, gl.}) \left(\frac{T_{i, ny} - T_{u, ny}}{32} \right) \quad ^\circ C$$

$T_{over, ny}$: er den nye overfladetemperatur [$^\circ C$]
 $T_{i, ny}$: er den nye indvendige lufttemperatur [$^\circ C$]
 $T_{u, ny}$: er den nye udvendige lufttemperatur [$^\circ C$]
 $T_{over, gl.}$: er den gamle overfladetemperatur [$^\circ C$]

Som nævnt i forrige afsnit bruges konstante overgangsisolanser, hvor den indvendige (R_i) sættes til 0,13 m²K/W og den udvendige (R_u) til 0,04 m²K/W. En beregning af overgangsisolansen, som vist på figur 13 er beskrevet i afsnit 3.5.

De forskellige materials varmeledningsevne, som anvendes i beregningerne er hovedsagelig hentet fra DS418 /8/. Nedenstående tabel viser de anvendte størrelser:

Tabel 2. Varmeledningstal for forskellige materialer.

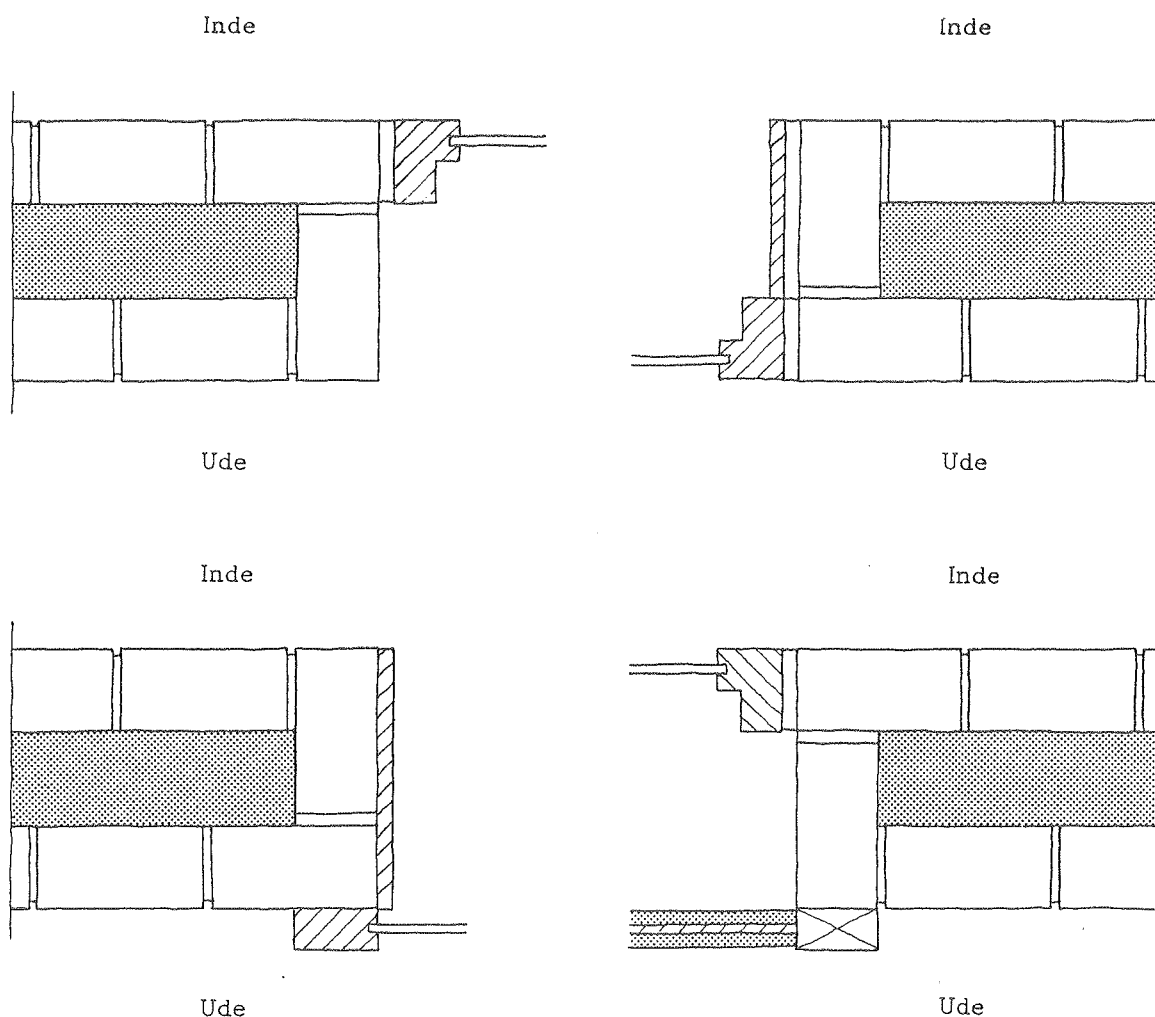
Materiale	λ (W/mK)
Indvendig murfacade	0,55
Udvendig murfacade	0,75
Isolering - væg	0,039
Isolering - skodder	0,040
Kalfatringsfuge	0,050
Glas	0,80
Træ	0,12
Letbeton - væg	0,195
Aluminium - afstandsprofil	220

For letbetonen er anvendt værdien 0,195 W/mK, hvilket gælder for indvendig placering med densiteten 650 kg/m³.

For specielle lag som fx visse luftspalter er den i DS418 angivne varmemodstand for laget omdannet til et fiktivt varmeledningstal, ved at lagets tykkelse er divideret med den aktuelle varmemodstand.

3.2 Beskrivelse af vægtyper og vinduespositioner

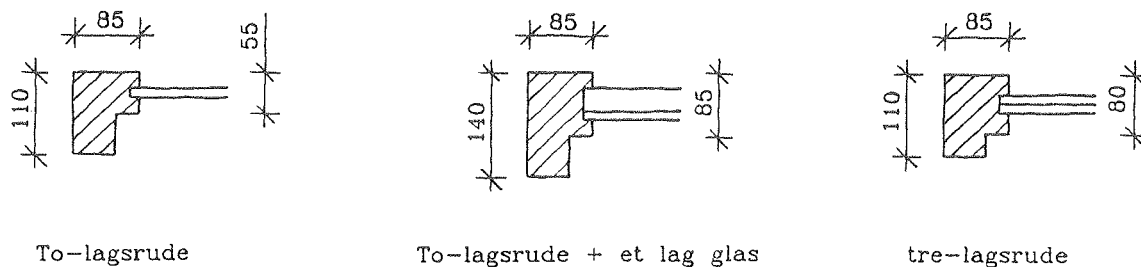
Tre forskellige vægtyper er valgt til denne undersøgelse - en tung konstruktion af mursten (figur 6), en væg af letbeton indvendig og træ udvendig (figur 8) og endelig en let konstruktion af træ og isolering (figur 9).



Figur 6. 350 mm murfacade med 125 mm hulmursisolering og 20 mm kuldebroafbrydelse vist med fire forskellige vinduespositioner.

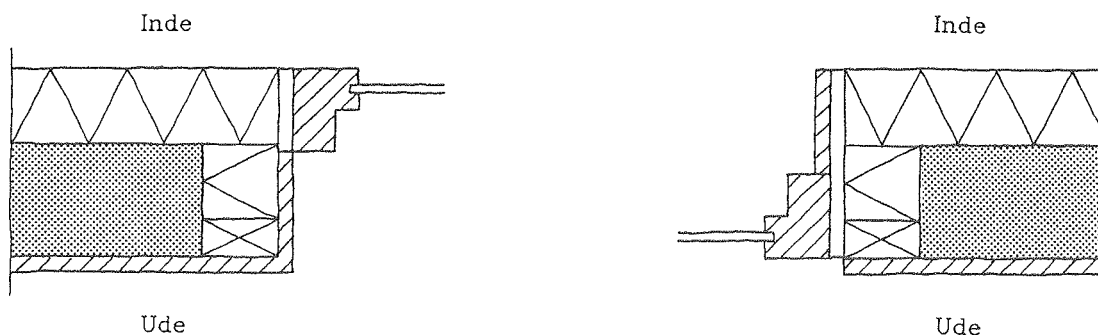
Foruden disse versioner er varmetabet beregnet med vinduet anbragt i midten af væggen. Konstruktionerne er - på nær to lag glas med skodde - blevet beregnet med hhv. to lag, tre lag og to plus ét lag glas. To- og tre-lagsruderne er termoruder med 12 mm glasafstand, medens to plus et lag glas er en termorude med 30 mm afstand til et enkelt lag glas.

Følgende forenklede karmprofiler (træ, $\lambda = 0,12 \text{ W/mK}$) og karmbredder er antaget (mål i mm):



Figur 7. Forenklede karmprofiler anvendt i beregninger. Ramme/karmdimensioner i mm.

Skodden består af en standard vinduesramme, hvor glasset er erstattet med en masonitplade, og hård isolering er limet på begge sider af denne - i alt 50 mm.



Figur 8. 100 mm letbeton indvendigt, 150 mm isolering og træ udvendigt.

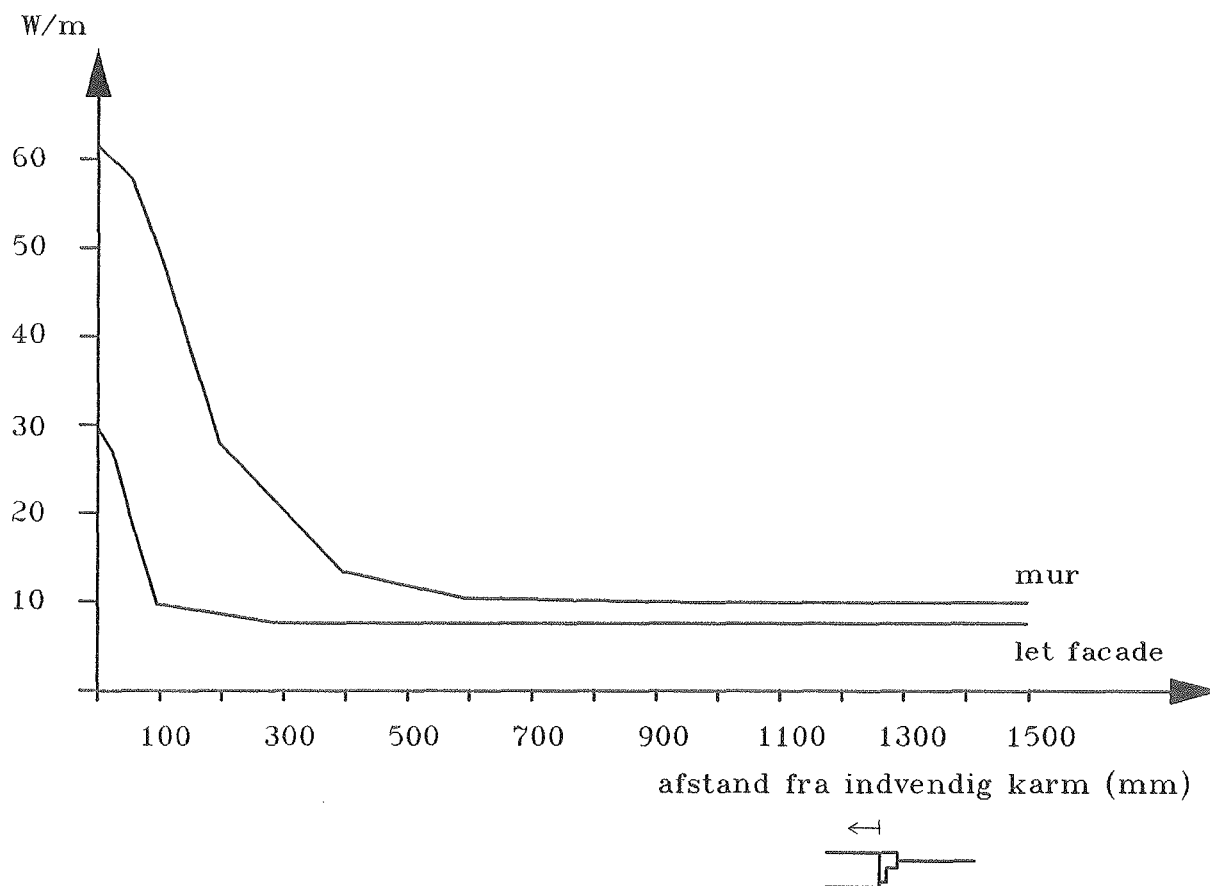


Figur 9. 150 mm isolering beklædt med træ ind- og udvendigt.

Alle tre vægtyper er beregnet med samme rudetyper og antal glaslag.

3.3 Det todimensionale randfelts udstrækning

For at bedømme hvor langt ind i væggen vinduet påvirker varmestrømmen, er der udført en række EDB-beregninger med det todimensionale program, og i modstående figur gives et par eksempler:



Figur 10. Varmestrøm gennem væg i afhængighed af vægkens længde for henholdsvis en murfacade og en let facade.

Det kan ud fra disse beregninger konstateres, at ca. 0,5 m fra vindueshullet er varmemstrømmen endimensional.

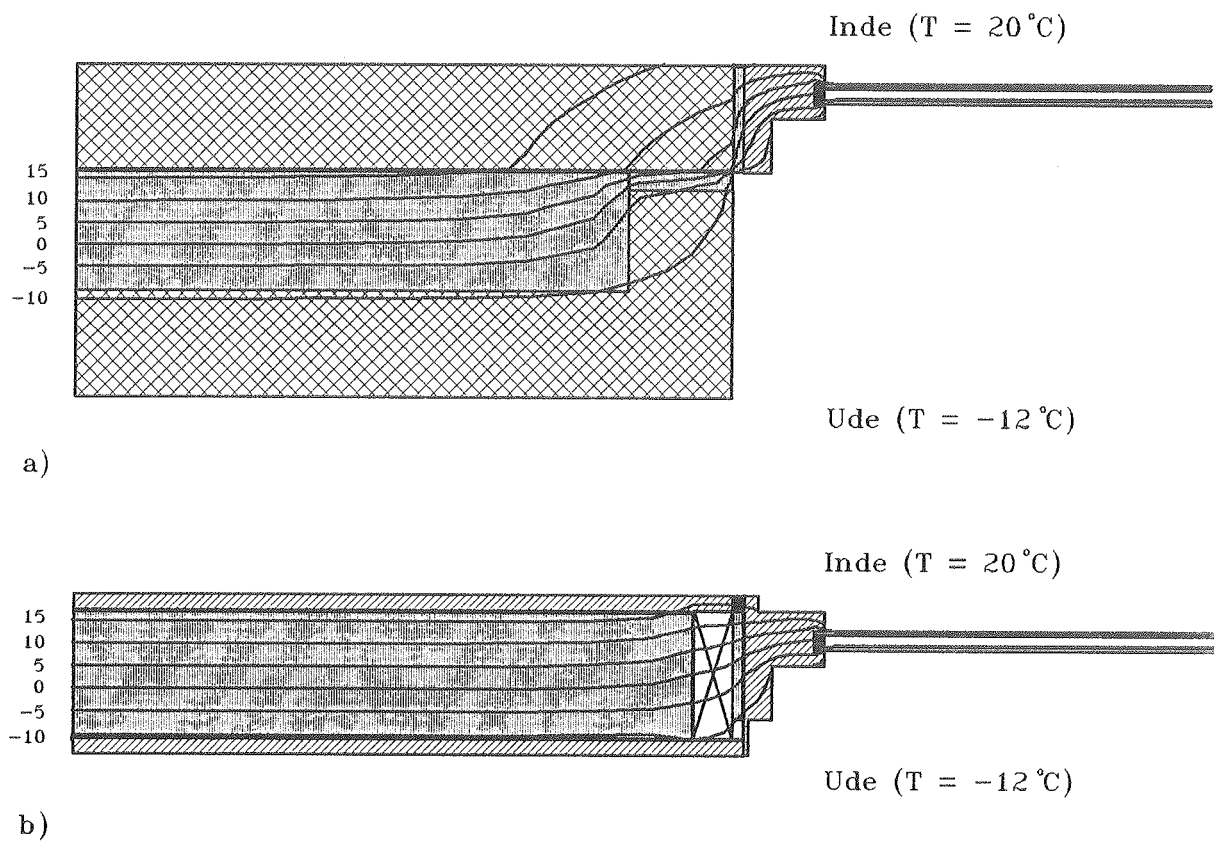
3.4 Varmestrømme og minimumtemperaturer

I nedenstående skemaer ses resultaterne fra de todimensionale beregninger - det totale varmetab gennem den valgte konstruktion (0,7 m væg plus 0,5 m vindue) i W/m^2 , og den indvendige overflades minimumtemperatur i $^{\circ}\text{C}$ (ved -12°C udvendigt og 20°C indvendigt).

Tabel 3. Totale todimensionale varmestrømme (W/m^2) og minimumtemperaturer ($^{\circ}C$) ved forskellige facader og antal glaslag.

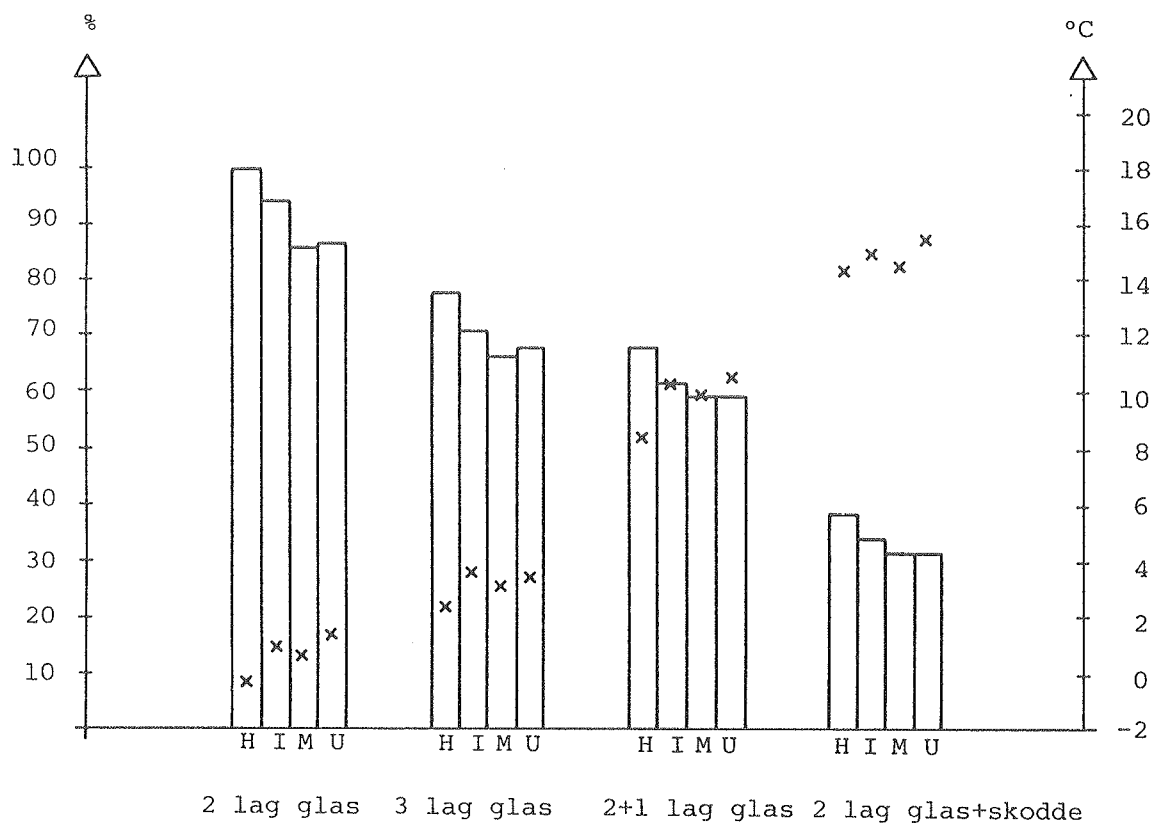
Placering af vindue				
Murfacade	Inde	Mellem	Ude	Helt ude
2 lag glas	52,8/1,2	49,6/0,59	51,5/0,93	59,0/-0,37
2+1 lag glas	36,8/10,2	35,3/9,9	36,4/9,7	42,50/8,2
3 lag glas	41,8/3,8	38,9/3,1	40,4/3,3	46,24/2,3
2 lag glas + skodder	18,5/14,8	19,1/14,1	19,1/15,4	22,9/14,1
Placering af vindue				
Letbetonfacade	Inde	Mellem	Ude	Helt ude
2 lag glas	48,0/1,2	47,2/1,2	47,1/0,98	55,67/0,33
2+1 lag glas	33,6/10,1	32,8/10,1	32,6/9,9	35,89/8,6
3 lag glas	37,3/3,8	36,3/3,7	36,1/3,0	39,3/3,0
2 lag glas + skodder	12,9/16,2	13,2/16,4	13,8/16,0	15,8/14,5
Placering af vindue				
Letfacade	Inde	Mellem	Ude	Helt ude
2 lag glas	46,9/0,74	46,3/1,1	46,4/1,4	51,7/0,31
2+1 lag glas	32,3/10,1	32,0/10,1	32,3/9,9	35,5/8,7
3 lag glas	35,8/3,2	34,1/3,5	35,5/3,7	39,0/3,0
2 lag glas + skodder	12,9/16,1	13,1/16,0	13,4/16,1	15,3/14,5

Som det kan ses af tallene, er der ikke den store forskel på placeringerne inde, mellem og ude, hverken når det samlede varmetab eller minimumtemperaturen betragtes. Det kan dog konkluderes, at det er bedst, rent varmemæssigt, at placere vinduet et stykke ude i vægkonstruktionen, således at vinduesplaceringen resulterer i de mest lineære isotermer. Nedenfor er optegnet isotermer for et par af konstruktionerne. Minimumtemperaturen svinger maksimalt 0,7 grader mellem inde- og udepositionen af vinduet. Idet den murede konstruktion med 2-lags rude er den mest kritiske mht. minimumtemperatur og kuldebrovirkning, vælges denne til varmebalanceberegningerne i afsnit 5.



Figur 11. Isothermer.

På den efterfølgende figur ses de todimensionale varmetab og minimumtemperaturerne for en murfacade optegnet. Det skal bemærkes, at ved to lag glas + skodde er skodden permanent placeret helt ude som angivet på figur 6, og kun vinduet flyttes.



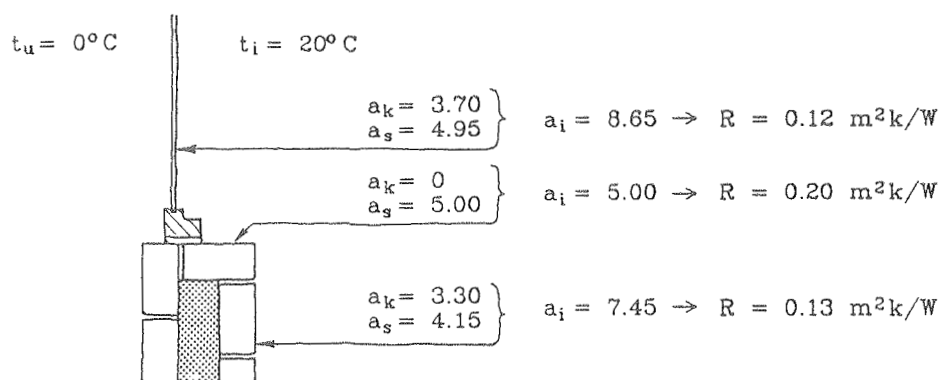
Figur 12. Totalt todimensionalt varmetab i % af det største - 71 W/m snitdybde - ved forskellige vinduestyper og placeringer (søjler). Minimum indvendige overfladetemperaturer i °C (x'er).

- H: Vindue placeret helt ude i vinduesåbningen
- I: Vindue placeret inderst i vinduesåbningen
- M: Vindue placeret midt i vinduesåbningen
- U: Vindue placeret yderst i vinduesåbningen

3.5 Betydningen af størrelsen af indvendig overgangsisolans

I dette afsnit undersøges, hvilken indflydelse fastsættelsen af R_i har på beregningsresultaterne i TODIM.

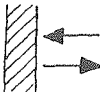
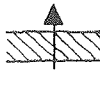
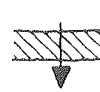
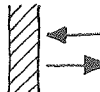
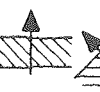
Som beskrevet i afsnit 2 sættes R_i - den indvendige overgangsisolans - i beregningsmodellen til $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Overgangsisolansen afhænger imidlertid af mange faktorer og ifølge /3/ er det rimeligt at antage følgende størrelser som angivet i figur 13:



Figur 13. Antagne overgangsisolanser for væg/vinduestilslutning.

De følgende beregningsresultater sammenlignes med referencetilfældet som beskrevet i afsnit 3 med $R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ og $R_u = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Q-2 angiver det totale varmetab gennem konstruktionen (dvs. 0,7 m væg og 0,5 m vindue), og $t_{\text{over,min}}$ er den laveste indvendige overfladetemperatur. Foruden ovennævnte tilfælde beregnes også for $R_i = 0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$ og $R_i = 0,30 \text{ m}^2\text{K/W}$ (reduceret emission) - se omstående tabel med angivelse af forskellige landes normmæssige overgangsisolanser /34/.

Tabel 4. Overgangsisolanser ($\text{m}^2\text{K/W}$).

Land	R_i Varmestrøm			R_u Varmestrøm		
						
Belgien	0,125	0,125	0,166	0,043	0,043	0,043
Danmark	0,13	0,13	0,13	0,04	0,04	0,04
England	Normal emission					
	0,12	0,22	0,14	0,06	0,04	0,04
	Reduceret emission					
	0,30	0,22	0,55	0,07	0,05	0,05
Holland	0,13	0,13	0,13	0,04	0,04	0,04
Tyskland	0,13	0,13	0,17	0,04*	0,04*	0,04*
Frankrig	0,11	0,09	0,17	0,06	0,05	0,05
Italien	0,123	0,107	0,172	0,043	0,043	0,061
ISO	0,12	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

* 0,09 i koldt ventilerede hulrum.

Følgende tabel angiver beregningsresultaterne fra TODIM for dels en murvæg og dels en let facade med vinduet placeret hhv. indvendigt og i midten af væggen.

Tabel 5. Varmetab og mindste overfladetemperaturer ($R_u = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, $t_i = 20^\circ\text{C}$ og $t_u = -12^\circ\text{C}$).

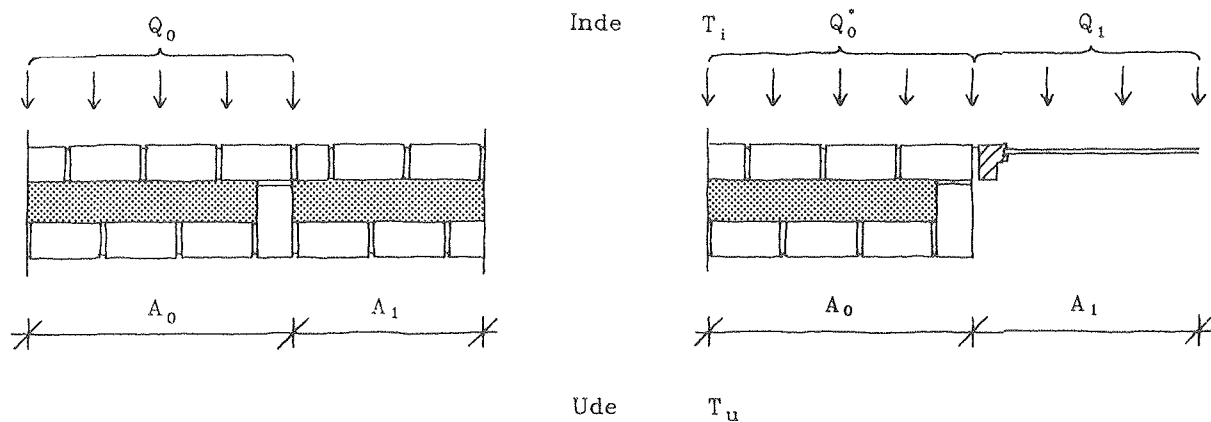
$R_i = \text{som fig. 13}$			$R_i = 0,10$		$R_i = 0,13$		$R_i = 0,30$	
	Q-2 W/m	$t_{\text{over,min}}$ $^\circ\text{C}$	Q-2 W/m	$t_{\text{over,min}}$ $^\circ\text{C}$	Q-2 W/m	$t_{\text{over,min}}$ $^\circ\text{C}$	Q-2 W/m	$t_{\text{over,min}}$ $^\circ\text{C}$
indv. MUR	65,0	1,6	69,0	2,7	63,4	1,2	44,5	-3,3
mellem	61,3	0,97	64,8	1,9	59,5	0,59	41,8	-3,6
indv. LET	57,4	1,1	61,1	2,0	55,9	0,70	38,6	-3,5
mellem	57,5	1,6	60,0	2,6	55,6	1,1	38,3	-3,3

Forskellen mellem temperaturerne i de tre første tilfælde (hvis der ses bort fra $R_i = 0,30$) er max. $1,5^\circ\text{C}$, hvilket er væsentligt i bedømmelsen af kondensrisiko.

3.6 "U-værdier" (U_{2D}) beregnet todimensionalt med hensyntagen til vægtype

En konstruktions isoleringsevne udtrykkes ved dens U-værdi, der angiver varmemstrømmen gennem 1 m^2 ved en temperaturforskel på 1°K over konstruktionen. Ved sammenbygning af forskellige konstruktioner beregnes den samlede varmemstrøm i henhold til /8/ som summen af varmemstrømmene gennem de enkelte konstruktionsdele. Hvis et vindue indbygges i en væg, vil dette imidlertid ikke være korrekt, idet der dannes et kraftigt flerdimensionalt temperaturfelt, så varmetabet typisk vil blive større.

Der indføres derfor et begreb " U_{2D} -værdi" der tager hensyn til det flerdimensionale felt. U_{2D} -værdien kan beregnes som varmetabet gennem vinduesarealet og vindueshullets sider plus det forøgede varmetab gennem den omkringliggende vægkonstruktion som følge af det flerdimensionale temperaturfelt. Beregningen er skitseret i fig. 14.



$$U_{2D} = \frac{(Q_0^* + Q_1) - Q_0}{A_1(T_i - T_u)}$$

Figur 14. Beregning af U_{2D} -værdi ved placering af vindue i en vægkonstruktion.

Beregnes U_{2D} -værdien af vinduet med 2-lags ruden efter denne metode fås følgende resultater:

Tabel 6. U_{2D} -værdien i W/m^2K for et 2-lags vindue placeret i forskellige vægtyper. Til sammenligning er U -værdien beregnet efter /8/ 3,1 W/m^2K .

	Placering af vindue		
	Inde	Mellem	Ude
Murfacade	3,39	3,16	3,37
Letbeton facade	3,23	3,15	3,14
Let facade	3,14	3,09	3,09

4. BEREGNING AF SOLINDFALDET GENNEM VINDUER UNDER HENSYNTAGEN TIL SKYGGENDE GENSTANDE

4.1 Beskrivelse af programmet

Generelt opnås det lave energiforbrug i lavenergihuse bl.a. ved udnyttelse af gratisvarmen enten direkte eller gennem akkumulering i tunge konstruktioner. Det er derfor væsentligt både i projekteringsfasen og ved energiberegninger at kunne bestemme det mulige solindfald korrekt.

LfV har som et led i indeværende projekt og EFP-projektet "Målinger i 2.-generations lavenergihus i Hjortekær" udarbejdet et EDB-program til beregning af solindfaldets størrelse gennem vinduer. I beregningen tages hensyn til skyggende genstande såsom indrykning af glasset i vindueshullet, skodder, tagudhæng, anneks på bygninger og eventuelle nabohuse/træer.

Solindfaldet på en flade er sammensat af tre bidrag:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{direkte}} + I_{\text{diffus, himmelstråling}} + I_{\text{diffus, reflek.}}$$

og hvis man vil beregne solindfaldet på vinduer, der kan ligge delvis i skygge, er det nødvendigt at dele indstrålingen op i disse bidrag. Den solbeskinnede del af vinduet vil modtage alle tre former for stråling, men den skyggede del vil kun modtage diffus stråling.

I beregningsprogrammet findes de forskellige strålingsbidrag ud fra målte værdier af enten diffus- og globalstråling på vandret, eller totalstråling på lodret mod henholdsvis nord, øst, syd og vest - se /33/.

Selve skyggeberegningsprogrammet er udviklet til beregning af det solbeskinnede areal på plane vinduer for et vilkårligt tidspunkt på en vilkårlig dag /30/.

Vinduerne er forudsat placeret i vinduesplaner med et eller flere vinduer. Planerne kan være orienteret vilkårligt.

Princippet i programmet er, at alle skyggegivende genstande beskrives ved hjælp af konvekse polygoner, der fastlægges i et tredimensionelt koordinatsystem ved angivelse af hjørnernes koordinater. Ud fra solens stilling på himlen kan projektionen af polygonernes hjørner på det aktuelle vinduesplan beregnes. Skygebilledet fra polygonen beskrives med vektorer mellem hvert hjørnepunkt. Vektorernes retning vælges, så deres tværvektor peger ind i skyggen.

Dette gøres for samtlige skyggegivende genstande, hvilket ofte resulterer i, at flere polygoner falder helt eller delvis inden i hinanden. Der foretages derfor en sortering, således at skygepolygoner, der ligger helt i skygge af andre, kasseres.

Resten af vektorerne underinddeles således, at hvis en vektor krydses af en anden, deles den i to vektorer i skæringspunktet.

Det er nu muligt ud fra et arbitrært valgt begyndelsespunkt at indkredse det skyggede område, idet man har kendskab til vektorernes orientering i forhold til det skyggede område. Når et område er indkredset kan arealet beregnes af:

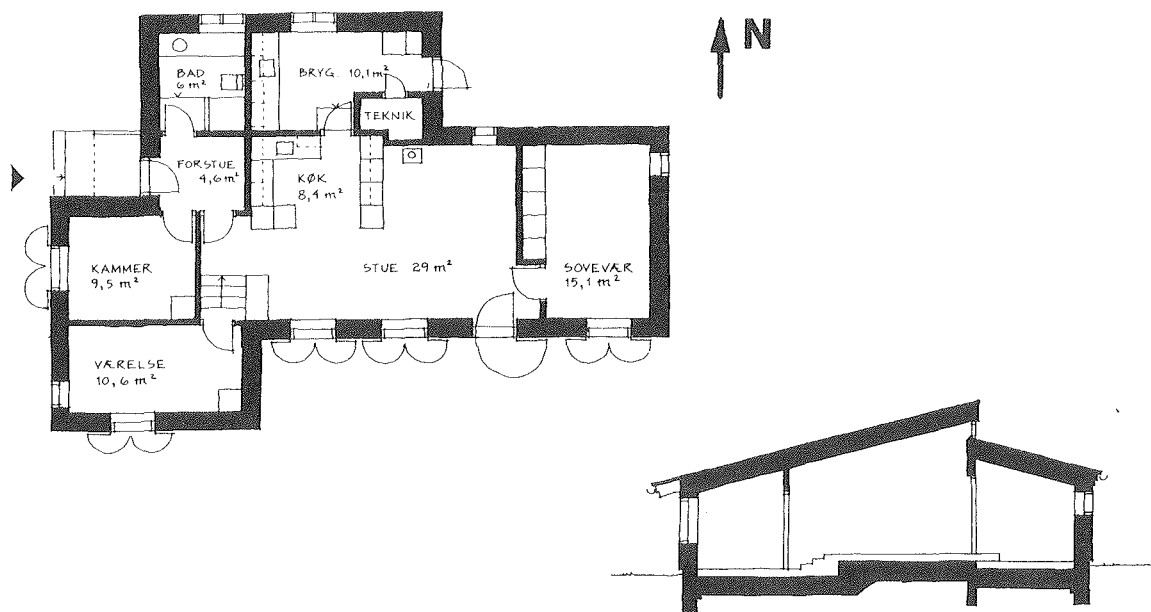
$$A = 0,5 \cdot \begin{vmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_2 & x_3 \\ y_2 & y_3 \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} x_{n-1} & x_n \\ y_{n-1} & y_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_n & x_1 \\ y_n & y_1 \end{vmatrix}$$

Proceduren gentages, indtil alle vektorer har været brugt, hvilket sikrer, at man får medregnet alle de skyggede områder på vinduet.

Beregningen gentages for alle vinduerne et efter et.

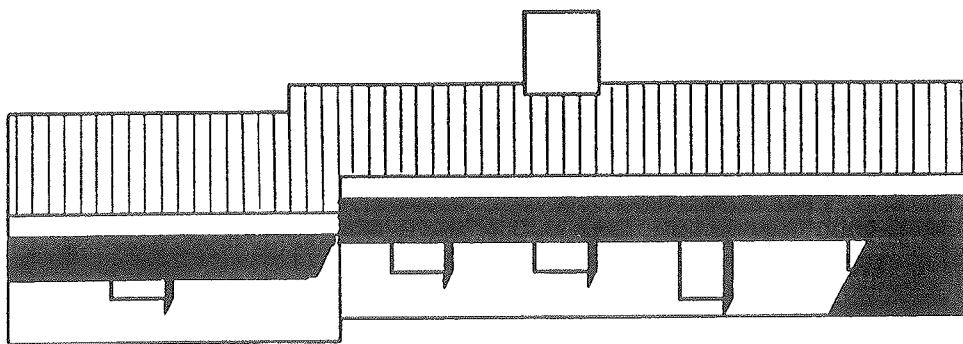
4.2 Eksempel på skyggebilleder

Som eksempel på anvendelsen af dette program ses optegnet skyggebilleder på hus G - det 7. lavenergihus i Hjortekær. Snit og plan af hus G ses på nedenstående figur:

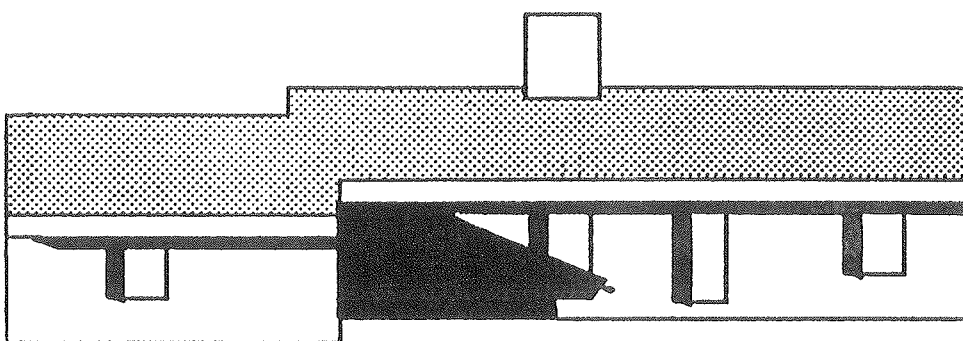


Figur 15. Snit og plan af hus G.

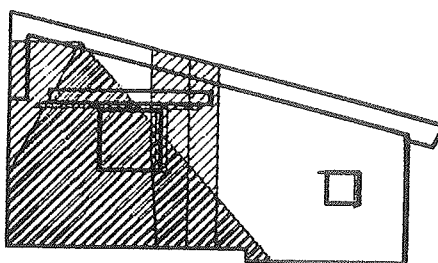
Skyggebilleder er optegnet for den 1/3 (kl. 16⁰⁰) og den 7/5 (kl. 10⁰⁰) på sydfacaden, og den 1/3 (kl. 16⁰⁰) på vestfacaden. På sydfacaden kan man kl. 16⁰⁰ bl.a. se skyggevirkningen af annekset, medens man på vestvinduet klart ser skyggen af nabohuset.



Skygge på sydfacaden d. 7/5 kl. 10⁰⁰



Skygge på sydfacaden d. 1/3 kl. 16⁰⁰



Skygge på vestfacaden d. 1/3 kl. 16⁰⁰

Figur 16. Skygebilleder.

4.3 Beregning af solindfaldets størrelse i forhold til varmetabet

En beregning af lavenergihus G's varmetab (transmissions-, ventilations- og infiltrationstab) og soltilskud med og uden hensyntagen til skygger vha. referenceårets vejrdato, giver følgende tal (tabel 7). Der er anvendt en indetemperatur på 20°C, beregnede U-værdier, målt infiltrationstab og 75 % genvinding på den mekaniske ventilation.

Tabel 7. Varmetab og soltilskud for hus G.

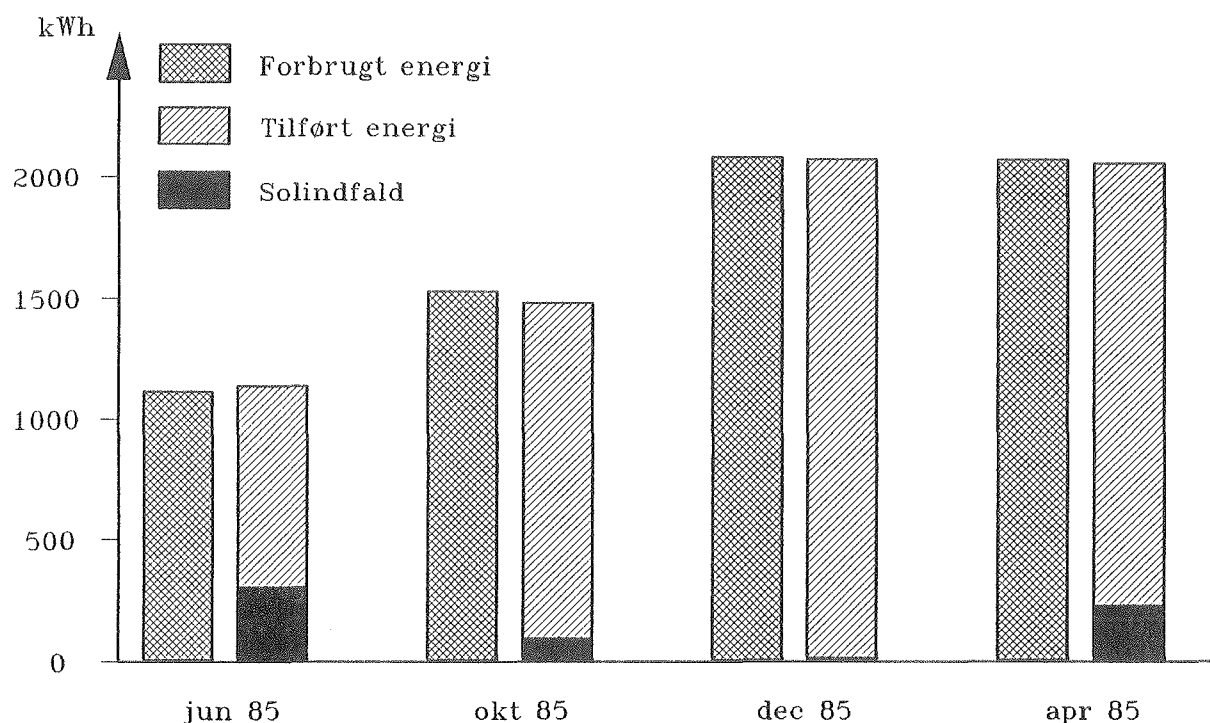
Måned	Varmetab (kWh)	Solttilskud (kWh)	
		Uden h.t. skygge	Med h.t. skygge
Okt.	685	336	158
Nov.	891	193	67
Dec.	1111	165	37
Jan.	1239	131	45
Feb.	1144	295	112
Mar.	1056	361	220
Apr.	803	594	426
	—	—	—
	6929	2075	1065
Maj	601	685	535
Jun.	308	749	572
Juli	273	676	545
Aug.	261	644	486
Sep.	415	495	309
	—	—	—
	1858	3249	2447

I fyringssæsonen udgør soltilskuddet ved beregningen med hensyntagen til skygge 50% ift. beregningen uden hensyntagen til skyggen, eller med andre ord; Hvis der ikke tages hensyn til skyggevirksomhed, overvurderes solindfaldet i huset med næsten 100%. Det beregnede soltilskud med og uden skygge udgør hhv. ca. 15 og 30% af varmetabet. Det er derfor vigtigt i projekteringsfasen at beregne solindfaldet korrekt.

4.4 Energibalance for lavenergihus

Skyggeberegningsprogrammet er desuden velegnet til opstilling af energibalancer baseret på målinger. Som et eksempel herpå er valgt opstillingen af energibalancer for lavenergihus G.

De udvalgte månedsenergibalancer er beregnet ud fra døgnbalancer, der igen er baseret på timeværdier. Den forbrugte energi består af transmissions-, infiltrations- og ventilationstab plus energi til varmt vand. Der er brugt beregnede U-værdier samt målte infiltrationstab, temperaturer og luftmængder.



Figur 17. Energibalance for hus G.

Den tilførte energi består af målte el-forbrug til opvarmning og varmt vand, målt gratisvarmetilskud (personvarme, og forbrug til lys og husholdning ved simuleret beboelse) plus det beregnede solindfald ud fra målte solintensiteter. Genvindingen fra det mekaniske ventilations-system er beregnet ud fra målte luftstrømme og temperaturer.

5. VARMEBALANCE FOR VINDUER

5.1 Betydning af rudens størrelse og orientering

Vinduet er den del af klimaskærmen, som ikke kun har et varmetab, men også kan have et varmetilskud i dagtimerne stammende fra solindstrålingen. For at vurdere vinduets energibalance er det nødvendigt at betragte både transmissionskoefficienten (U), solindstrålingen, skyggefaktoren og orienteringen af vinduet. Normalt bruges U -værdier for vinduet uafhængigt af hvilken væg, det sidder i, men som beregningen i afsnit 3.6 viste, er U_{2D} -værdien for en murfacade ved indvendig placering ca. 10% højere end U -værdien beregnet efter DS418. Der er derfor valgt at bruge de allerede beregnede U_{2D} -værdier i de følgende energibalancer, som er beregnet på den her angivne måde:

$$q_{\text{netto}} = q_{\text{sol}} - q_{\text{tab}},$$

hvor q_{netto} er nettoenergitilførsel i kWh/m²

q_{sol} er transmitteret solindstråling omregnet til kWh/m² og

q_{tab} er varmetabet gennem vinduesmurhul omregnet til kWh/m²

Når vinduesarealet øges, betyder det et større varmetab, som modvirkes af et større solindfald. Denne solstråling kan ikke altid udnyttes, idet indetemperaturen kan blive for høj. De følgende energibalancer er altså et udtryk for den maksimale udnyttelse af vinduet.

Som vejrdata er brugt det danske referenceår - TRY - hvor månedsmiddel af udetemperatur og solintensiteter estimeres ud fra timemiddelværdier. Til beregning af solindfaldet bruges et af LfV udviklet skyggeberegningsprogram, /30/, som beskrevet i afsnit 4. Indetemperaturen er sat til 20°C.

Følgende skemaer viser nettoenergitilførslerne (kWh/m²) dels for fyringssæsonen og dels for hele året for hhv. 0,6 x 0,6 m, 1,2 x 1,2 m og 1,8 x 1,8 m vindue med to-lags rude orienteret mod hhv. nord, øst, syd og vest. Vinduet placeret hhv. inderst og yderst i en 350 mm væg.

Tabel 8. Nettoenergitilførsler i kWh/m².

0,6 x 0,6 m vindue (2-lagsrude)

Orientering	Nord		Øst		Syd		Vest	
Position	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude
Okt-Maj	-254	-251	-237	-222	-201	-174	-240	-225
Maj-Sept	22	28	62	82	36	82	65	85
Årlig	-232	-223	-175	-140	-165	-92	-175	-140

1,2 x 1,2 m vindue (2-lagsrude)

Orientering	Nord		Øst		Syd		Vest	
Position	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude
Okt-April	-224	-222	-189	-177	-123	-104	-193	-181
Maj-Sept	75	80	148	165	126	163	154	169
Årlig	-149	-142	-41	-12	3	59	-39	-12

1,8 x 1,8 m vindue (2-lagsrude)

Orientering	Nord		Øst		Syd		Vest	
Position	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude
Okt-April	-210	-209	-165	-158	-88	-75	-171	-163
Maj-Sept	97	101	183	197	166	195	190	202
Årlig	-113	-108	18	39	78	120	19	39

Det kan ses, at årsbalancen først bliver positiv mod syd med en vinduesstørrelse på ca. 1 x 1 m, medens man i fyringssæsonen overhovedet ikke kan opnå en positiv balance med en almindelig 2-lagsrude. Ved omkring 1,5 m x 1,5 m vindue opnås et positivt årsbidrag både fra øst og vest.

"Effektive" U-værdier

For den tidligere brugte vinduestype i den aktuelle væg kan det bemærkes, at det er umuligt at opnå positive nettoenergitilførsler i fyringssæsonen imod syd uanset glasstørrelse.

Med de førnævnte forudsætninger er nedenfor angivet de U-værdier ($U_{2D,1}$), vinduet skal have, for at nettoenergitilførslen i fyringssæsonen bliver 0, samt analog til det sædvanlige effektive U-værdibegreb, den U-værdi ($U_{2D,2}$) vinduet ville have, når der i U-værdien tages hensyn til den indkomne solstråling i fyringssæsonen.

Tabel 9. U-værdier angivet i W/m^2K for sydvendt to-lags vindue, udvendig placering i 350 mm muret væg.

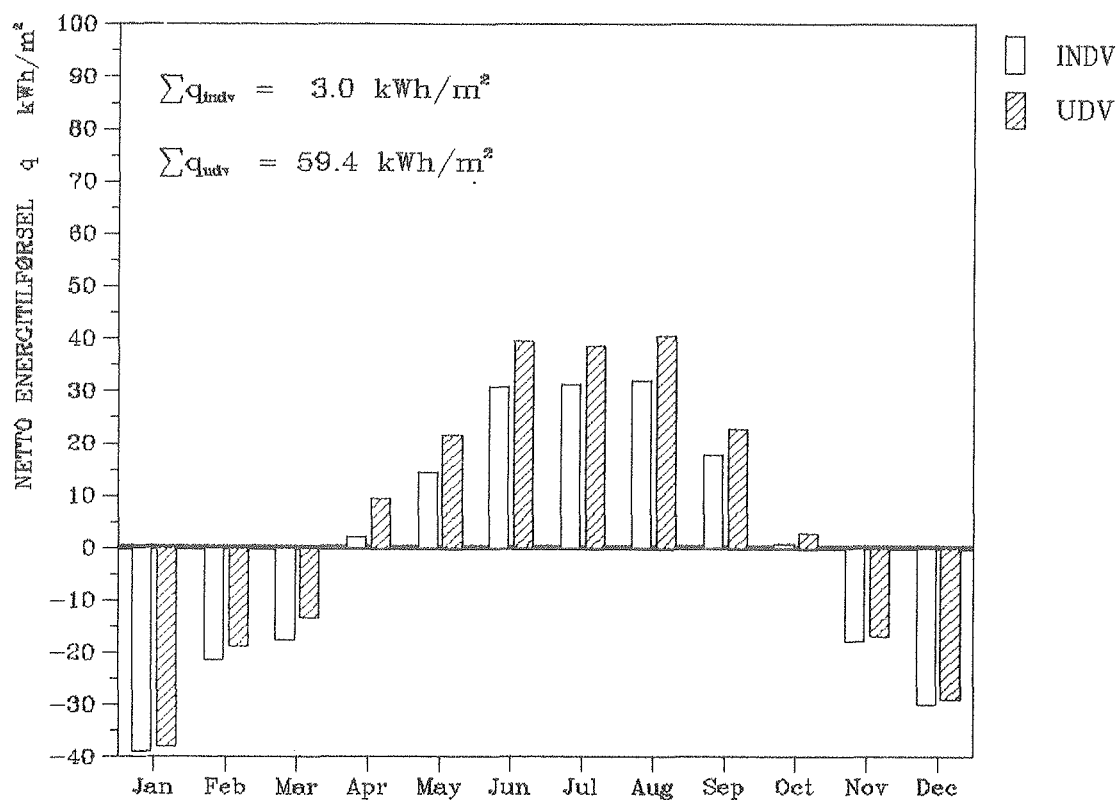
$U_{2D,1}$ = U-værdi hvor nettoenergitilførslen i fyringssæsonen bliver 0

$U_{2D,2}$ = effektiv U-værdi

	U_{2D}	$U_{2D,1}$	$U_{2D,2}$
0,6 x 0,6 m vindue	3,45	1,39	2,06
1,2 x 1,2 - -	3,37	2,14	1,23
1,8 x 1,8 - -	3,31	2,42	0,89
3,0 x 3,0 - -	3,29	2,65	0,64
4,2 x 4,2 - -	3,27	2,72	0,56

Sammenligner man $U_{2D,2}$ -værdien med U-værdien for tunge vægge på $0,40 W/m^2K$, som BR82 kræver, ses vinduer stadig at være langt de svageste led i klimaskærmen.

Energibalancen for det sydvendte 1,2 x 1,2 m vindue ses optegnet på figur 18.



Figur 18. Energibalance for 1,2 m x 1,2 m sydvendt vindue med 2-lagsrude ved placering hhv. indvendigt og udvendigt i en 350 mm muret væg.

Skyggevirkningen for selve vindueshullet ses for sydvinduerne, hvor balancen for fyringssæsonen bliver bedre ved den yderste placering, men selvfølgelig også resulterer i større solindfald i sommermånederne.

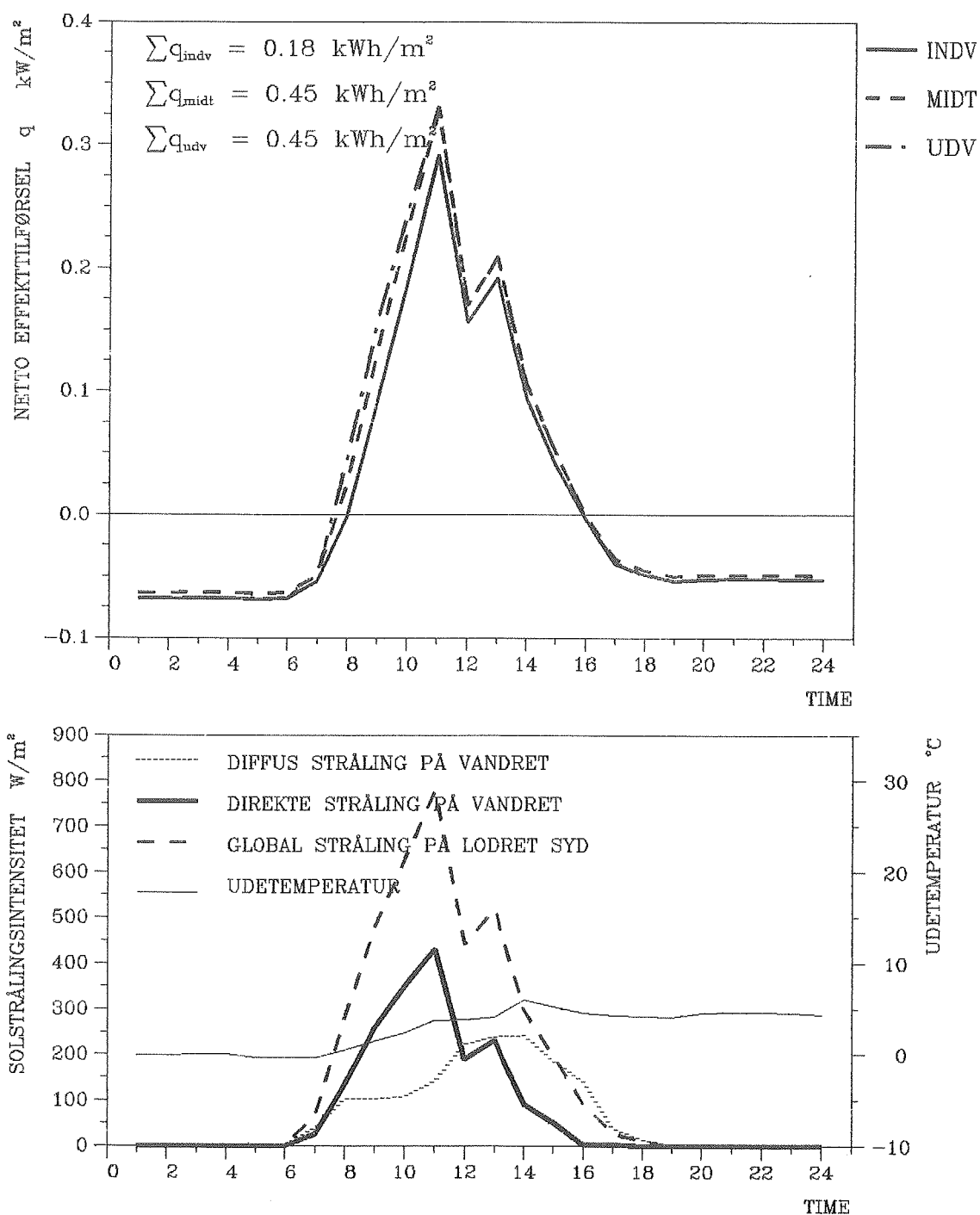
Nettoenergitilførslen er for et sydvendt 1,2 x 1,2 m vindue også beregnet for mellemlaceringen.

Tabel 10. Nettoenergitilførsel i kWh/m².

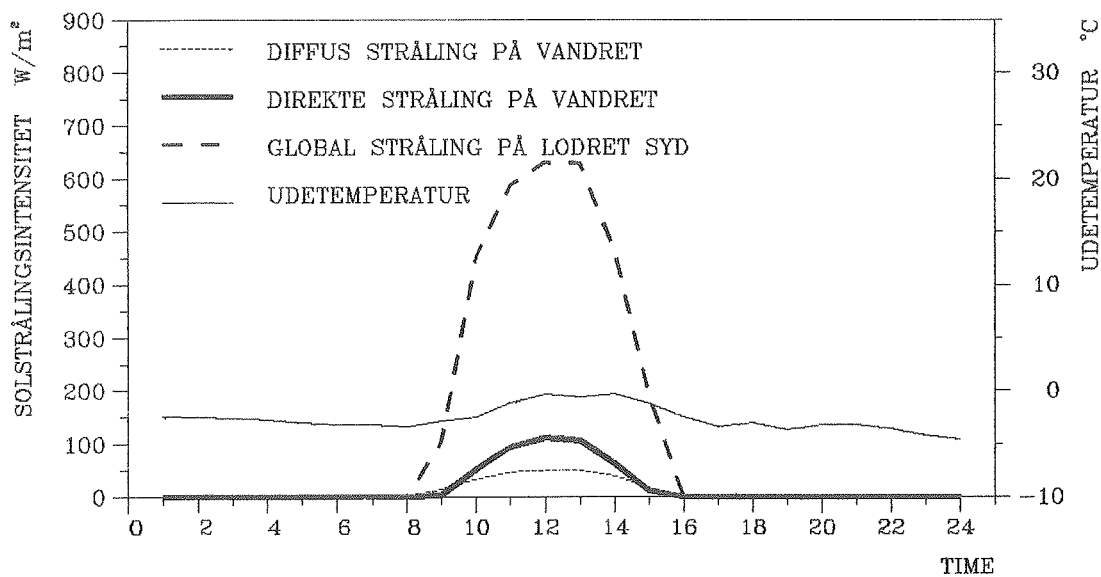
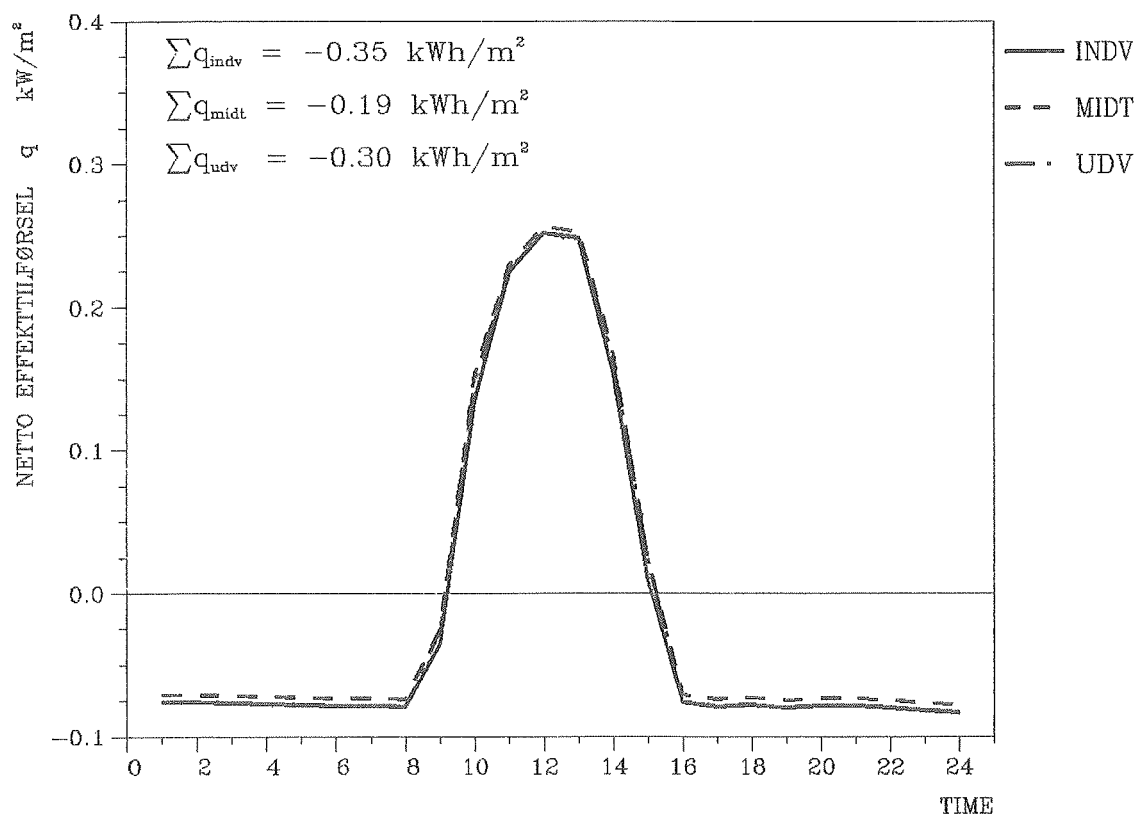
Sydvendt	1,2 x 1,2 m vindue, mellemposition		
	Q_{sol}	Q_{tab}	Q_{netto}
Okt-April	173	267	-95
Maj-Sept	211	63	149
Årlig	384	330	54

Det ses - som for den varmemæssige beregning - at mellempositionen er en anelse bedre end den yderste for fyringssæsonen. Nettovarmetabet i fyringssæsonen er ca. 10 kWh/m² mindre, og nettoenergitilførslen i sommermånederne bliver også mindre - her kan det jo netop være en fordel, for at undgå overtemperaturer inden døre.

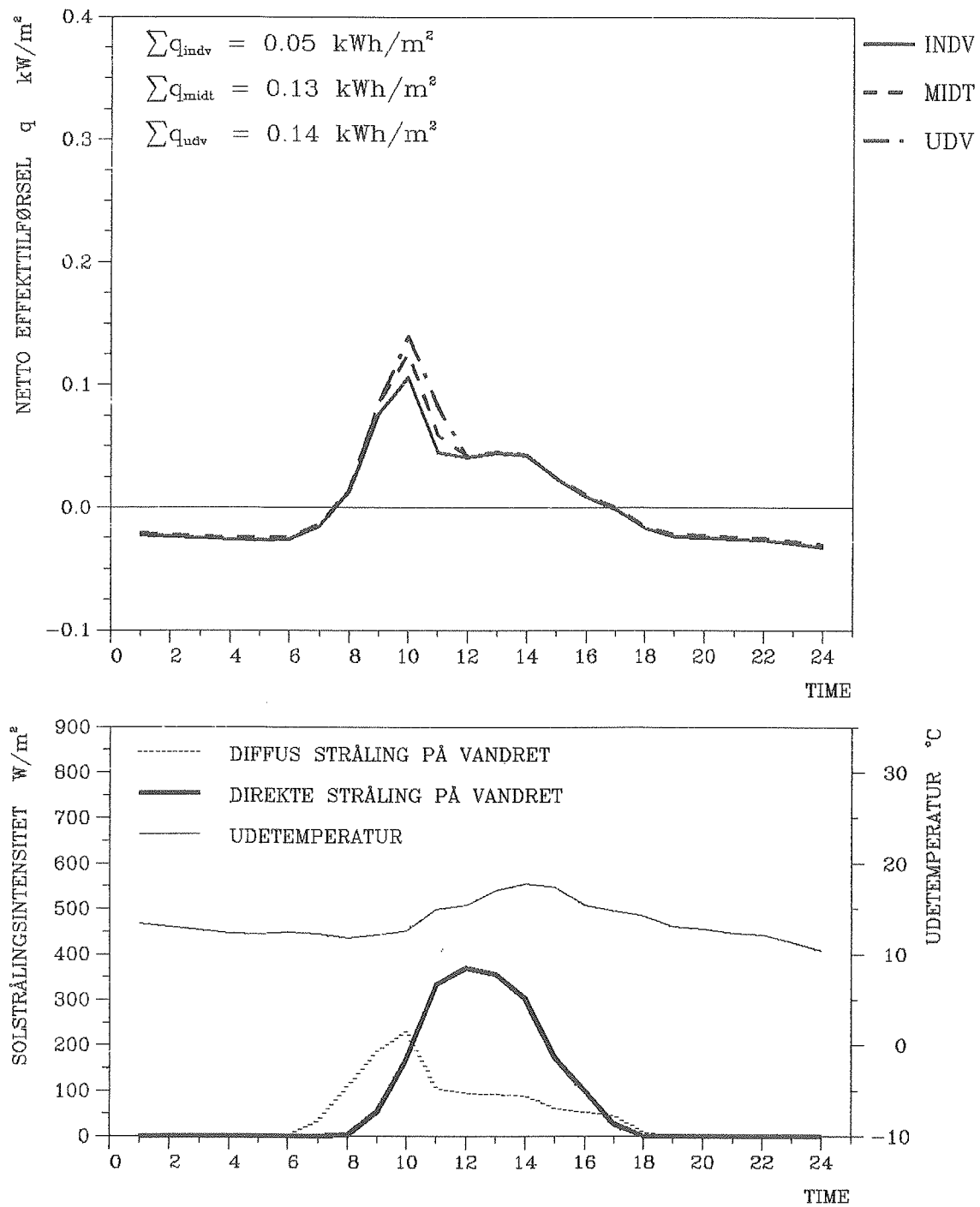
På de efterfølgende figurer 19-22 ses energibalancen optegnet for udvalgte dage med tilhørende vejrdata for 1,2 x 1,2 m vindue. Det sydvendte vindue er afbildet den 20. marts (figur 19) og den 22. december (figur 20) med ruden placeret hhv. indvendigt, mellem og udvendigt i forhold til væggen. Den 22. december ses placeringen af ruden at være uden betydning på solindfaldet, da solen kun skinner midt på dagen, og skyggerne derfor ingen indvirkning har. Solen står lavt på himlen, derfor en lille global stråling på vandret, men stor stråling på lodret. På figur 21-22 ses hhv. det østvendte og det vestvendte vindues energibalancer for den 23. september, og betydningen af den diffuse stråling kan bemærkes.



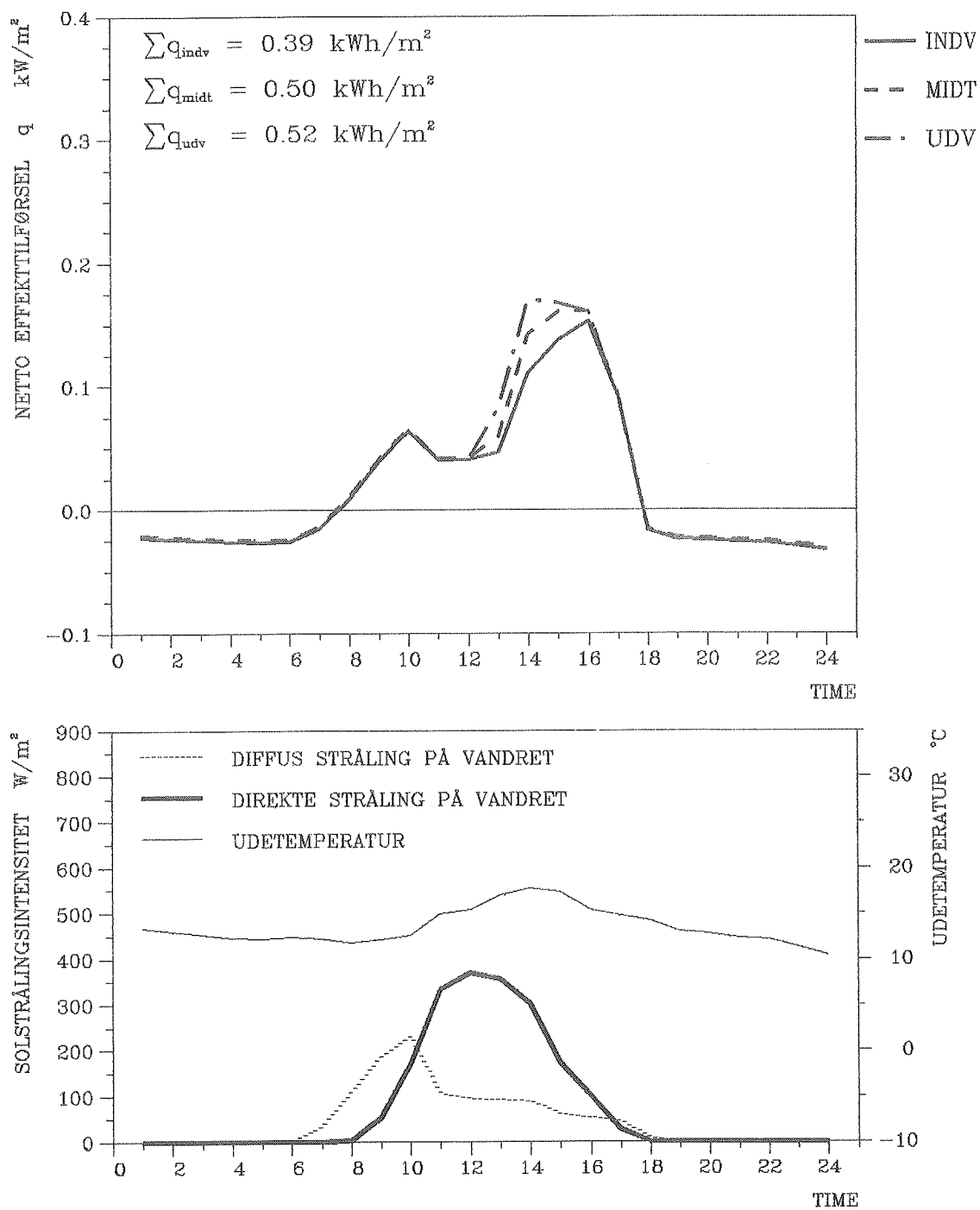
Figur 19. Energibalance for 1,2 x 1,2 m sydvendt vindue med 2-lagsrude og tilhørende referenceårsdata den 20. marts.



Figur 20. Energibalace for 1,2 x 1,2 m sydvendt vindue med 2-lagsrude og tilhørende referenceårsdata den 22. december.



Figur 21. Energibalance for 1,2 x 1,2 m østvendt vindue med 2-lagsrude og tilhørende referenceårsdata den 23. september.



Figur 22. Energibalance for 1,2 x 1,2 m vestvendt vindue med 2-lagsrude og tilhørende referenceårsdata den 23. september.

5.2 Betydningen af vinduesform

For at vurdere den varmetekniske betydning af vinduets form er energibalancen beregnet for et 1,44 m² sydvendt vindue med dobbeltrude. Vinduesformen er varieret fra at være et højt og smalt vindue til at være et lavt og bredt vindue. Nettoenergitilførslerne er beregnet i kWh/m² med vinduet placeret hhv. indvendigt og udvendigt i en 350 mm muret væg.

Tabel 11. Nettoenergitilførsel i kWh/m² mod syd for forskellige vinduesformer med samme areal (A = 1,44 m²) med dobbeltrude placeret hhv. indvendigt (Inde) og udvendigt (Ude) i 350 mm væg.

Vinduesform	Position	Okt-apr	Maj-sept	Årlig
b x h				
m	Inde/Ude	kWh	kWh	kWh
0,3 x 4,8	Inde	-296	-8	-304
	Ude	-287	-5	-292
0,6 x 2,4	Inde	-182	93	-89
	Ude	-163	123	-40
0,8 x 1,8	Inde	-150	119	-31
	Ude	-133	152	19
0,96 x 1,5	Inde	-137	128	-9
	Ude	-120	162	42
1,2 x 1,2	Inde	-123	126	3
	Ude	-104	163	59
1,5 x 0,96	Inde	-134	121	-13
	Ude	-120	161	41
1,8 x 0,8	Inde	-146	106	-40
	Ude	-132	150	18
2,4 x 0,6	Inde	-177	70	-107
	Ude	-164	120	-44
4,8 x 0,3	Inde	-306	-9	-305
	Ude	-290	-7	-297

Det fremgår af tallene, at for en given vinduesform ændres energibalancen minimalt ved en 90° drejning. Derimod er der stor forskel i tallene, når formen ændres ved bibeholdt totalt areal. Dette skyldes dels, at glasarealet ændres, dels at U_{2D} -værdien stiger for hhv. smalle og lave vinduer. Yderligere varierer solindfaldet pga. ændrede skyggeforhold.

Den optimale vinduesform for et sydvendt vindue er kvadratisk, idet glasarealet ifht. det totale areal da bliver størst, ensbetydende med at omkredsen af vinduet minimeres.

5.3 Betydningen af ramme-/karmbredde

Som nævnt i afsnit 3.2 er der i de foregående beregninger brugt en ramme-/karmbredde på 85 mm. Til at vurdere betydningen af karmens størrelse er følgende energibalance beregnet med 1,2 x 1,2 m vindue med 2 lag glas i 350 mm væg, indvendig og udvendig placeret:

- 1) Uden ramme/karm
- 2) Med 85 mm ramme/karm
- 3) Med 150 mm ramme/karm

Der gøres følgende forudsætninger, som ses i tabel 12:

Tabel 12. Forudsætninger for energibalanceberegning.

	Uden karm	85 mm karm	150 mm karm
Glasareal (m ²)	1,39	1,02	0,77
Glasareal (%)	96,7	70,6	53,5
U_{2D} for vindue indv./udv. placeret	4,04/ 4,11	3,39/ 3,37	3,24/ 3,22

Selve energibalancerne giver omstående resultat:

Tabel 13. Nettoenergitilførslen (kWh/m²) for 1,2 x 1,2 m vindue med 2 lag glas hhv. indvendigt og udvendigt placeret i en 350 mm væg.

Karmstørrelse	Uden karm		85 mm karm		150 mm karm	
Orientering	Syd		Syd		Syd	
Pos. i væg	inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude
Okt-april	-125	-90	-123	-104	-142	-132
Maj-sept	184	244	126	163	89	112
Årlig	59	154	3	59	59	-20

Tallene viser, at på årsbasis er det bedst at gøre karmen så lille som mulig, medens man i fyringssæsonen ikke har den store forskel på en rude med 85 mm karm i hver side og en rude uden karm.

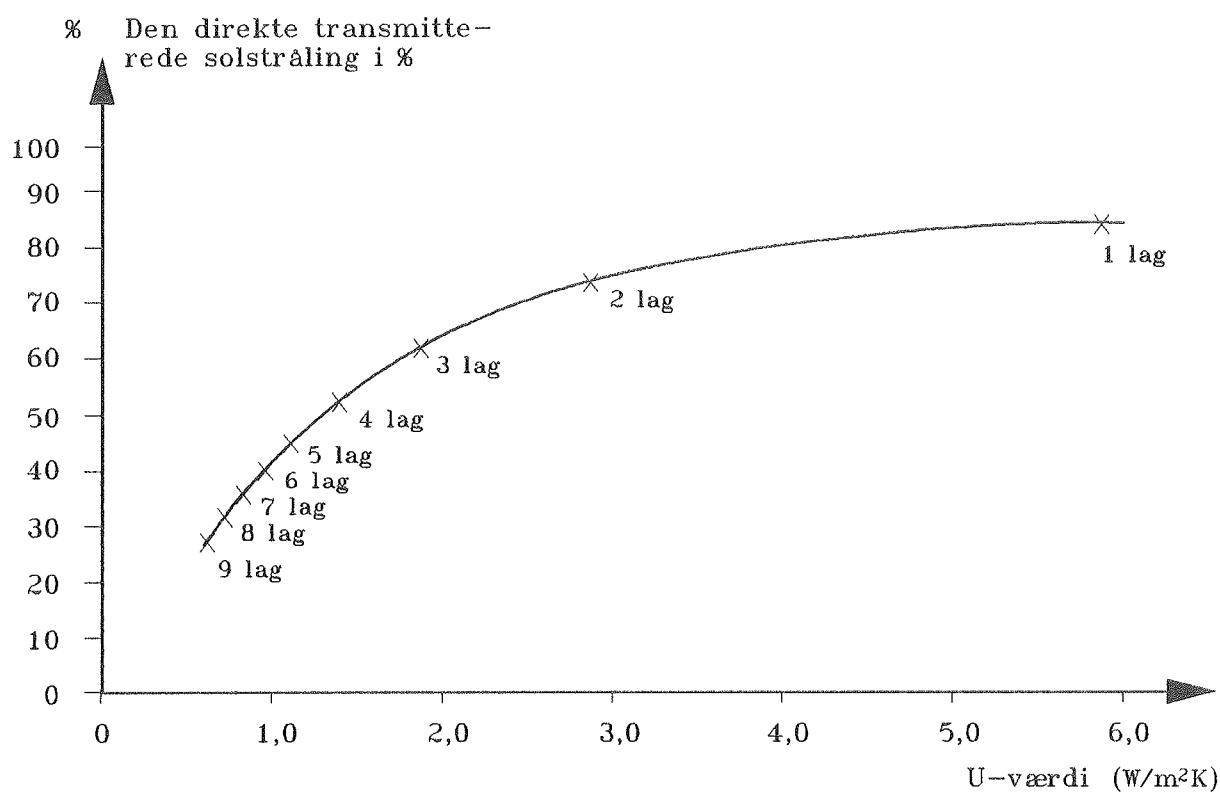
For fyringssæsonen deles nettoenergitilførslen op i dels energitilførslen fra solen og dels energitabet, og følgende fås:

Tabel 14. Energibalance (nettoenergitilførsel i kWh/m²) for fyringssæsonen for 1,2 x 1,2 m sydvendt vindue med to lag glas hhv. indvendigt og udvendigt placeret.

	Q _{sol}		Q _{tab}		Q _{netto}	
	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude
Uden karm	217	258	342	348	-125	-90
85 mm karm	164	181	287	285	-123	-104
150 mm karm	132	141	274	273	-142	-132

5.4 Betydningen af flerlagsruder, gasfyldning og coating

Ved anvendelse af flere lag glas skal man i vurderingen af den varmeøkonomiske gevinst tage hensyn til både ændringen af U-værdi og ændring af transmittans af solstrålingen. Fra /23/ fås figur 23, som illustrerer dette forhold.



Figur 23. Strålingstransmission gennem flerlagsruder (almindeligt glas).

Selektive belægninger anvendes ofte i forbindelse med vinduer enten til reduktion af solindstrålingen (overophedning i fx kontorbygninger), og/eller til nedsættelse af vinduers U-værdi. I sidstnævnte tilfælde anvendes en meget tynd "usynlig" metalbelægning, der reducerer den langbølgede varmestråling mellem vinduets glaslag, uden at reducere transmittansen af den kortbølgede stråling (lys, solstråling) væsentlig.

En anden måde at forbedre de varmetekniske egenskaber er ved gasfyldning af mellemrummet - i omstående tabel - fra /7/ - ses eksempler på ruder med angivelse af deres U-værdi, transmission for lys/solvarme og afskærmningsfaktor. Afskærmningsfaktoren er et mål for transmitteret lys/solvarme i forhold til en almindelig 2-lagsrude.

Tabel 15. Eksempler på ruder i forskellige udførelser med angivelse af U-værdi, transmission for lys/solvarme, og afskærmningsfaktor for lys/solvarme.

Rudetype	Belægning i pos.	Luft eller gas	U W/m ² K	Transmittans for lys/solvarme	Afskærmningsfaktor for lys/solvarme $f_{\text{lys}}/f_{\text{af}}$
Almindelige ruder (glas 4 mm, glasafstand 12 mm):					
2 lag	-	luft	3,0	0,80/0,76	1,00/1,00
1 lag	-	-	6,0	0,88/0,83	1,10/1,09
3 lag	-	luft	2,0	0,72/0,67	0,90/0,88
4 lag	-	luft	1,5	0,65/0,60	0,81/0,79
2 lag med gas	-	argon	2,8	0,80/0,76	1,00/1,00
3 lag med gas	-	argon	1,9	0,72/0,67	0,90/0,88
2-lags ruder (4-12-4) med lavemissionsglas:					
Glastype 1, med gas	3	argon	1,6	0,77/0,65	0,96/0,86
Glastype 2, med gas	3	argon	1,6	0,63/0,69	0,79/0,91
Glastype 2, med gas	2	argon	1,6	0,63/0,59	0,79/0,78
Glastype 2	3	luft	2,0	0,63/0,69	0,79/0,91
2-lags ruder (4-12-4) med lavemissionsglas (type 1) indvendig kombineret med solafskærmende glas udvendig:					
Reflekterende (brun) overfladebelagt glas	2 + 3	argon	1,5	0,09/0,14	0,11/0,18
Reflekterende modificeret glas	2 + 3	argon	1,6	0,29/0,34	0,36/0,45
Absorberende (grå) gennemfarvet glas	1/2 + 3	argon	1,9	0,47/0,47	0,59/0,62
3-lags ruder (4-12-4-12-4) med lavemissionsglas:					
Glastype 1, med gas	5	argon	1,2	0,70/0,60	0,88/0,79
Glastype 2, med gas	5	argon	1,2	0,56/0,62	0,70/0,82
2-lags ruder (4-12-4) med solafskærmende glas:					
Reflekterende, overfladebelagt glas	2	luft	2,4	0,09/0,19	0,11/0,25
Reflekterende, modificeret glas	2	luft	3,0	0,29/0,43	0,36/0,57
Absorberende gennemfarvet glas	1/2	luft	3,0	0,48/0,56	0,60/0,74
Film klæbet på alm. ruder, lav U-værdi, lav solvarmegennemgang:					
Mørk film	2	luft	2,1	0,16/0,15	0,20/0,20
Mørk film	4	luft	2,4	0,16/0,27	0,20/0,35
Lys film	2	luft	2,1	0,28/0,27	0,35/0,35
Lys film	4	luft	2,4	0,28/0,49	0,35/0,65

Note: Belægningspositionen tælles som glasoverflader udefra.

Glastype 1 er klar og har høj transmittans for lys.

Glastype 2 er tonet og har lav transmittans for lys.

I nedenstående tabel er to-lagsruden sammenlignet med to andre typer af vinduer hhv. en tre-lagsrude og en to-lags gasfyldt rude med coated glas (1 lag neutral sølvbelægning).

Tabel 16. Nettoenergitilførsel (kWh/m²) for 1,2 x 1,2 m sydvendt vindue, placeret hhv. indvendigt og udvendigt i en 350 mm sydvendt væg.

Vinduestype	2 lag termorude 12 mm luft		3 lag termorude 2 x 12 mm luft		2 lag specialrude coated, 12 mm gas	
Position	Inde	Ude	Inde	Ude	Inde	Ude
Okt-april	-123	-104	-75	-57	-46	-31
Maj-sept	126	163	118	151	105	133
Årlig	3	59	43	94	59	102

Det ses, at for specialruden er nettoenergitilførslen større om vinteren, men mindre om sommeren end for de to andre. Herved opnås både en reduktion af energiforbruget i fyringssæsonen og en formindskelse af overophedningsrisikoen i sommerperioden.

Følgende U_{2D} -værdier og transmissionstal for solstrålingen er anvendt til beregning af energibalancerne:

Tabel 17. U_{2D} -værdier + transmissionstal for solstråling.

Rudetype	U_{2D} -værdi		Transmissionstal for solstråling
	Udv.	Indv.	
2 lag alm.	3,37	3,39	73%
3 lag alm.	2,55	2,57	64%
2 lag spec.	1,97	1,98	55%

5.5 Betydningen af mobilisolering

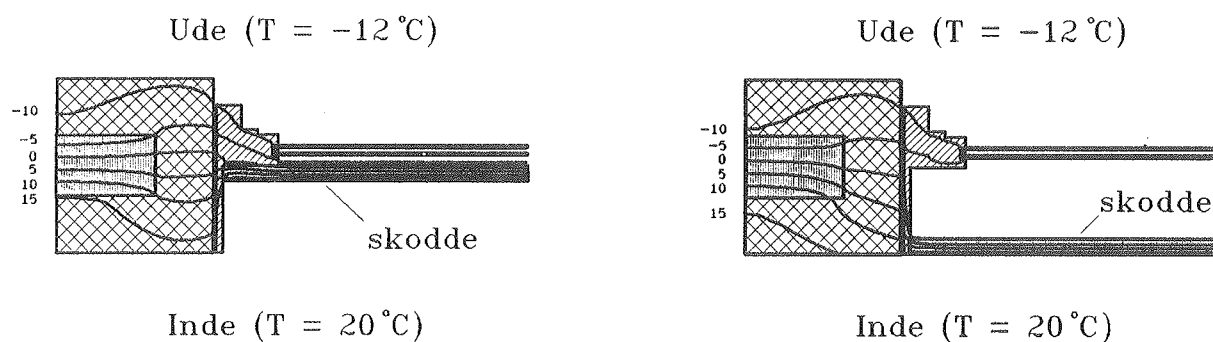
En alternativ mulighed for reduktion af varmetabet - som ikke samtidig påvirker strålingstransmissionen - er anvendelsen af isolerende skodder i døgnets mørke timer. Ved en isolerende skodde forstås en mobil og stiv isoleret pladekonstruktion, der kan opsættes foran et vindues- eller dørparti med det primære formål at nedsætte varmetabet gennem dette. Skodder er ikke formforanderlige, og de stiller derfor større pladskrav i passivstillingen end jalousier, persienner og gardiner. Til gengæld vil deres isoleringsevne og tæthed normalt kunne gøres væsentlig bedre. Isolerende skodder kan placeres på tre forskellige måder i forhold til vinduet 1) udvendigt 2) indvendigt og for konstruktioner med to eller flere lag glas 3) imellem ruderne. Alle tre

placeringer har fordele og ulemper, fx med hensyn til arkitektur, operationsvenlighed, vedligeholdelse og kondensproblemer, så placeringen og designet af skodderne må tilpasses det enkelte projekt.

Energibesparelsen, der kan opnås ved anvendelse af isolerende skodder, afhænger af anvendelsesmønstret, skoddens varmemodstand (tykkelse), mængden af kuldebroer, lufttætheden af skoddens tilslutning, vinduets og væggens konstruktion samt skoddens placering i forhold til disse.

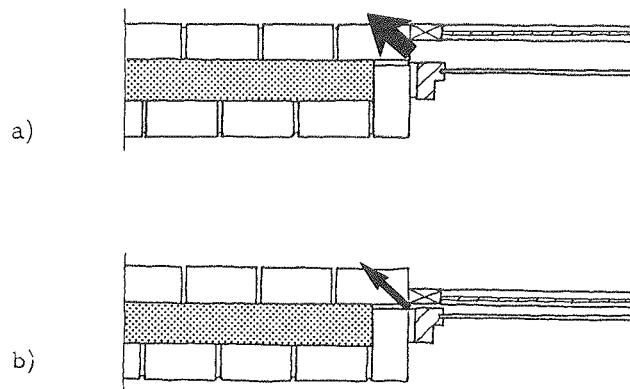
Der er på laboratoriet udført en række beregninger af skodders reelle isoleringsevne afhængig af de ovenfor nævnte forhold, hvoraf hovedresultaterne bliver beskrevet i det følgende. En mere detaljeret beskrivelse kan findes i /29/.

Den optimale placering af skodder i en vægkonstruktion er, som for vinduer, den placering, der resulterer i de mest rette isotermer, dvs. typisk midt ud for væggens isolering. Dette forhold gælder både for udvendige og indvendige skodeløsninger. Nedenstående figur 24 viser isotermbilledet for to forskellige placeringer af en indvendig skodde.



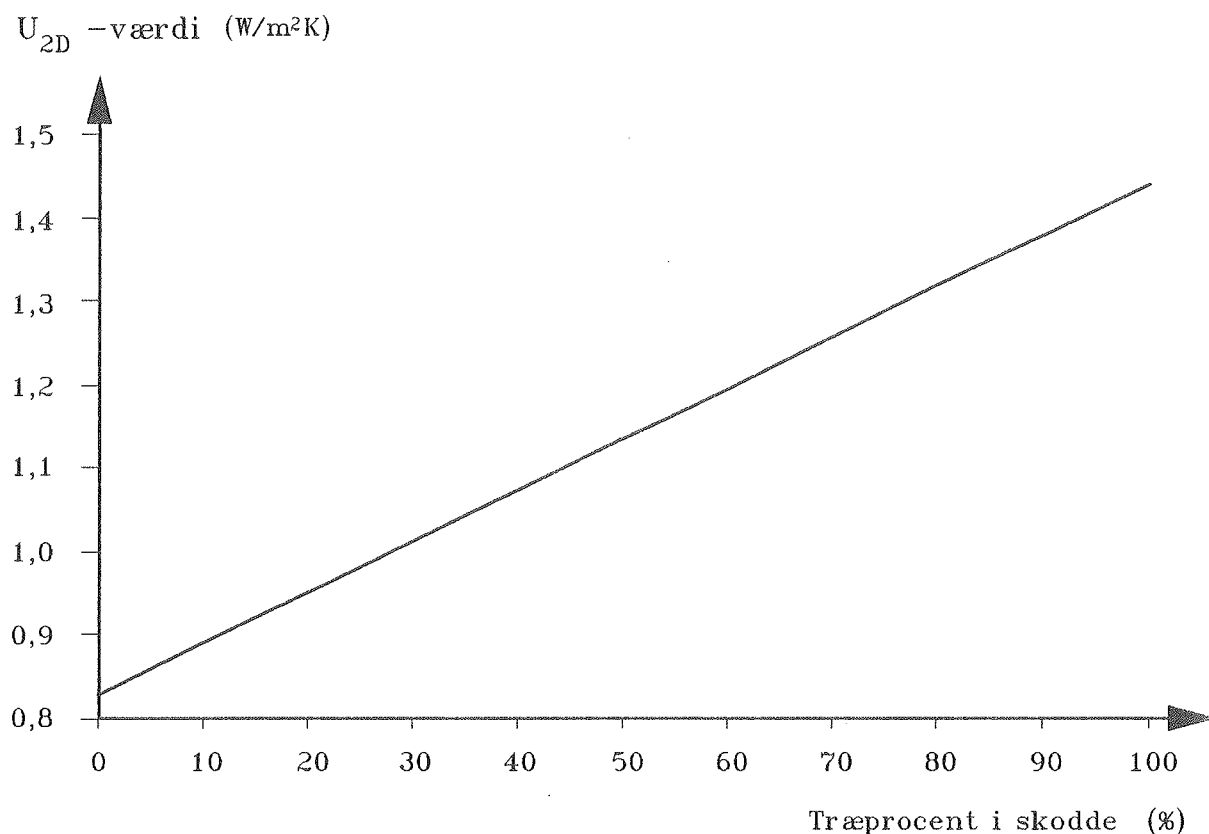
Figur 24. Isotermbillede for to forskellige placeringer af indvendige skodder. De tilhørende U_{2D} -værdier er for venstre figur $0,88 \text{ W/m}^2\text{K}$ og for højre figur $0,92 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Af hensyn til kuldebrovirkningen uden om skodden bør denne placeres så tæt på vinduet som muligt (fig. 25) dog således, at afstanden mellem skodde og glas er større end 15 mm (udnyttelse af luftrumets isolans).



Figur 25. a) Stor kuldebrovirkning uden om skodden.
b) Lille kuldebrovirkning uden om skodden.

Kuldebroer i skodder hidrører som regel fra en ramme langs skoddens kanter samt eventuelle gennemgående beslag. Kuldebroernes indflydelse på skoddens effektivitet er undersøgt for en skodde med 30 mm polyisocyanuratskum fastholdt i en træramme. U_{2D} -værdien er beregnet for forskellige rammebredder, svarende til en træprocent mellem 5% og 100%. Resultatet af beregningerne er vist for skodden monteret foran et vindue med en almindelig 2-lagsrude - figur 26.



Figur 26. U_{2D} -værdi for skodde + vindue som funktion af træprocenten.

$$\lambda_{isolering} = 0,033 \text{ W/mK.}$$

$$\lambda_{træ} = 0,12 \text{ W/mK.}$$

Det fremgår af ovenstående figur, at hvis rammearealet øges fra 5% til 10% af skoddens areal forringes skoddens resulterende varmemodstand med ca. 3%. Hvis skodden udelukkende bestod af en 50 mm tyk træplade, ville varmemodstanden af den samlede konstruktion forringes med 40%.

Lufttæthed af skodden og dennes tilslutning til vindue/vægkonstruktionen har for indvendige skodder stor betydning for eventuelle kondensproblemer, så alene derfor skal man tilstræbe en lufttæt konstruktion. Betydningen for varmetabet er undersøgt med et program til en bordregner /23/. Den resulterende U_{2D} -værdi er beregnet for forskellige størrelser af lufttætheder udtrykt ved det antal gange, som luftmængden i hulrummet mellem skodde og vindue bliver udskiftet pr. time. Tabel 18 viser de beregnede resultater for både udvendige og indvendige skodder.

Tabel 18. U_{2D} -værdien for skodde + vindue som funktion af luftudvekslingen mellem rumluft/udeluft og hulrummet mellem skodde og vindue.
Indetemperatur: 20°C.
Udetemperatur: -12°C.

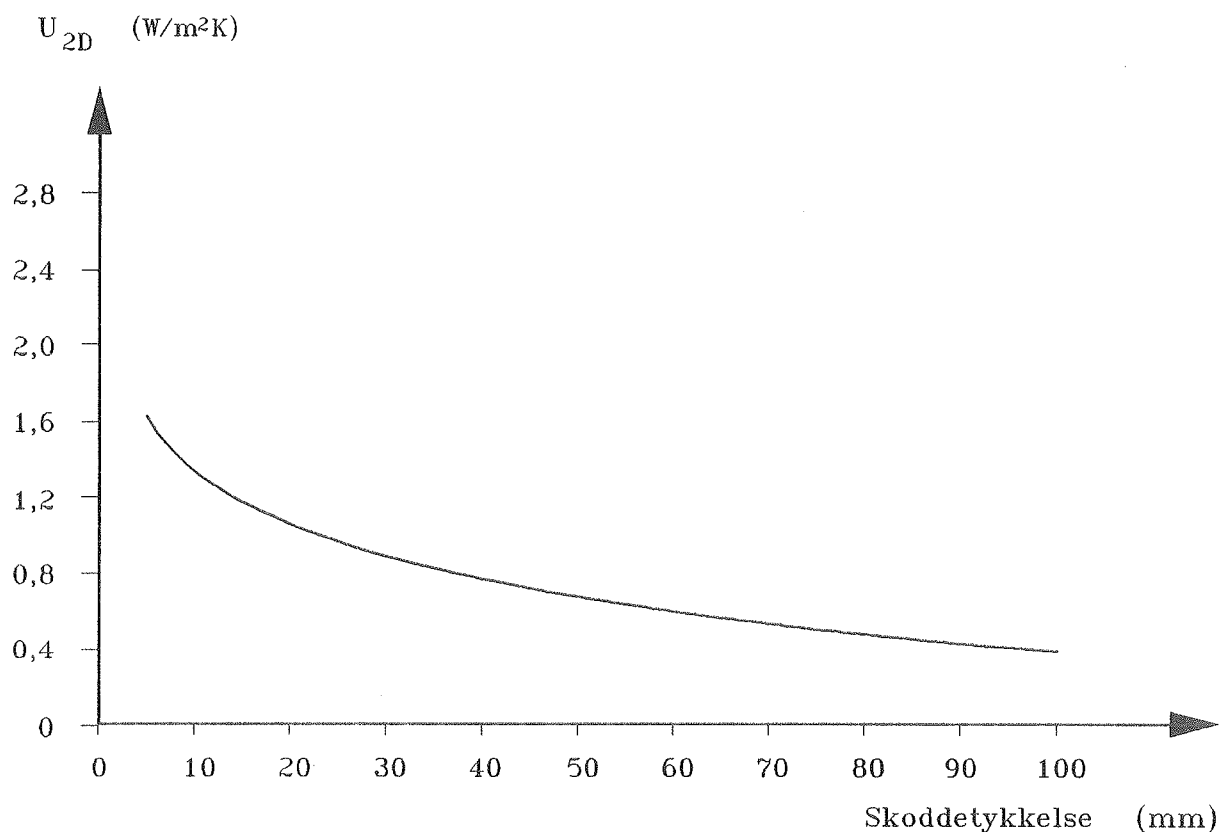
Hulrumsvolumen	Luftudveksling	U_{2D} -værdi	
		Indv. skodde W/m ² K	Udv. skodde W/m ² K
m ³	h ⁻¹		
0,1	0	0,85	0,90
0,1	5	0,87	0,91
0,1	10	0,92	0,95
0,1	15	0,99	1,00
0,1	20	1,05	1,05

Det fremgår af tabellen, at små utætheder ikke påvirker isoleringsevnen i betydelig grad. Ved store utætheder vil U_{2D} -værdien imidlertid stige kraftigt.

Luftskiftet ved udvendige skodder vil være stærkt afhængig af vindpåvirkningen og derfor uforudsigeligt. Derimod kan man finde en øvre grænse for luftskiftet, når der anvendes indvendige skodder, da de drivende kræfter opstår pga. afkøling af luften i hulrummet. Den øvre grænse vil svare til, at der ikke fandtes nogen skodde foran vinduet samtidig med, at vinduets indvendige overfladetemperatur bibeholdes svarende til, at skodden stadig er der. I /36/ er opstillet et teoretisk udtryk til beregning af strømningshastighed og luftmængde ved afkøling af luft langs et vindue.

Til sammenligning kan luftmængden beregnes for en almindelig to-lags termorude på 1 x 1 m² uden skodder med en rumtemperatur på 20°C og en udetemperatur på -12°C til 15 m³/h med en middelhastighed på 0,2 m/s.

Den resulterende U_{2D} -værdi som funktion af skoddetykkelsen er vist i figur 27 for en tætslutende indvendig skodde foran et vindue med en almindelig 2-lagsrude.



Figur 27. U_{2D} -værdi for vindue + skodde som funktion af skoddetykkelsen.
 $\lambda_{skodde} = 0,039 \text{ W/mK}$.

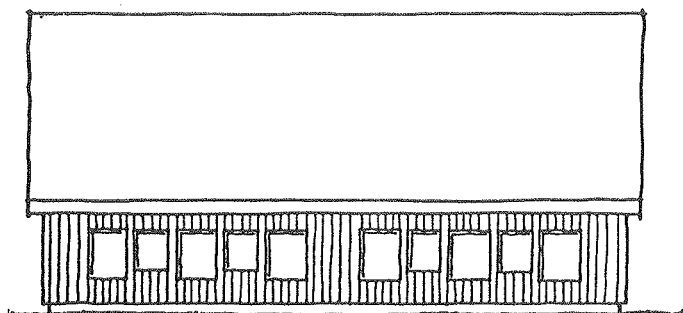
Figur 27 viser, at en forøgelse af skoddens isoleringstykkelse ud over 40 - 60 mm ikke resulterer i en væsentlig forøgelse af energibesparelsen. De beskrevne beregninger er udført for skodder placeret dels i en lavenergihuskonstruktion og dels i en typisk ældre vægkonstruktion med fuld udmuring omkring vinduet. Beregningerne viser ingen signifikant forskel i energisparepotentialet, hvorimod den absolutte U_{2D} -værdi er væsentlig forskellig i de to typer konstruktioner.

Den årlige energibesparelse afhænger i høj grad af brugermønstret, men den maksimale besparelse ved anvendelse af en skodde med 50 mm hård mineraluld ($\lambda = 0,045 \text{ W/mK}$) er beregnet til ca. 130 kWh/m². Beregningen er foretaget under forudsætning af, at skodden lukkes, hvis nettoenergitabet (dvs. varmetabet minus solindfaldet) gennem vinduet med åben skodde er større end varmetabet gennem vinduet med lukket skodde. Hvis skodden lukkes hver aften ved solnedgang og åbnes igen hver morgen ved solopgang i perioden 1. sept. - 30. april er energibesparelsen ca. 120 kWh/m².

6. MÅLESERIE I EKSPERIMENTHUSET

6.1 Beskrivelse af forsøgsopstilling

Som en verificering af resultatet i afsnit 5 (tabel 16) om varmembalancer, hvor en beregning viste, at et to-lags specialvindue, coated og med 12 mm gasfyldning havde en større nettoenergitilførsel i fyringssæsonen og en mindre om sommeren end en almindelig tre-lags rude, blev en måleserie sat i gang i eksperimenthuset på DTH. Forsøgets formål var at bestemme dels soltransmissionen dels varmetabskoefficienten for tre forskellige ruder: to termoruder af typen SGB Combiplus Neutral med hhv. to og tre lag glas og en "almindelig" tre-lags termorude (Scan Gobain). Nedenstående figur viser en opstalt af eksperimenthusets sydfacade, hvor der er monteret - regnet for de store vinduer fra øst - hhv. en to-lags SGB-rude, en tre-lags SGB-rude og en tre-lags Scan Gobain rude.



Figur 28. Sydfacade af lavenergieksperimenthus.

De to SGB-ruder er - på det mod rummet vendende lag glas, på overfladen mod luftmellemmrummet i ruden - påført en sølvbelægning. Denne belægning skal nedsætte varmestrålingen mellem de to lag glas. Glasmellemmrummet er desuden fyldt ud med en specialgas, der har en lavere varmeledningsevne end atmosfærisk luft. Begge ruder har glastykkelser på 4 mm og luftmellemmrum på hhv. 14 mm og 2 x 9 mm. Den almindelige 3-lags termorude har glastykkelsen 4 mm og 2 x 9 mm luftmellemmrum.

Ifølge fabrikanten af SGB-ruderne er varmetabskoefficienten for begge ruder 1,3 W/m²K (centerværdier), idet værdien for to-lags ruden er målt, medens den for tre-lags ruden er beregnet. Den direkte solenergitransmission er for to-lags ruden opgivet til 49%. Det var ikke muligt at få oplyst en tilsvarende værdi for 3-lags SGB-ruden. Varmetabskoefficienten for Scan Gobain ruden er opgivet til 2,0 W/m²K, og solenergitransmissionen til 57%.

6.2 Måling af soltransmission

Vinduerne er placeret yderst i en let væg med 300 mm isolering. Bestemmelsen af soltransmissionen foretages ved at måle solstrålingen umiddelbart hhv. inden for og uden for vinduet. Målingerne foretages i samme højde over jordniveau på begge sider af vinduet. Der måles med to solarimetre, og den direkte solenergitransmission kan nu findes vha. forholdet mellem de målte værdier.

Resultatet blev følgende:

Tabel 19. Den direkte solenergitransmission.

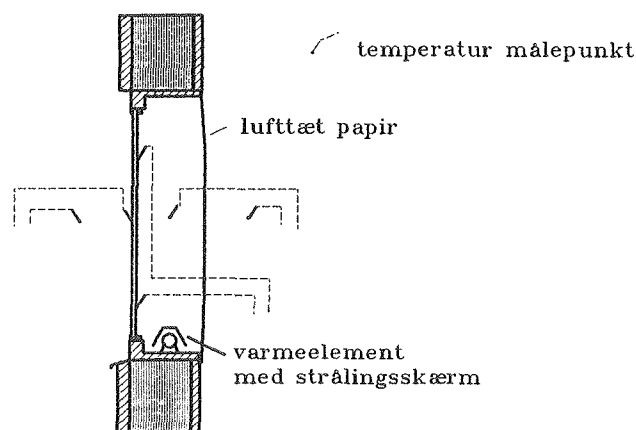
	SGB - 2-lags rude	SGB - 3-lags rude	Alm. 3-lags rude
Målt	49 %	44 %	58 %
Litteratur	49 %	—*	57 %

* Værdi ikke oplyst.

Det ses, at de målte resultater (fra januar måned) stemmer meget fint overens med de opgivne. Målingerne viste endvidere, at værdierne er uafhængige af indfaldsvinklen. Resultatet skal imidlertid ses i sammenhæng med, at den største indfaldsvinkel i januar måned er godt 50°, og transmissionsevnen afhængighed af indfaldsvinklen bliver først mærkbar ved vinkler over 50°. SGB-rudens transmittans er pga. af coatingen lille sammenlignet med almindelige to-lags termoruder, der sædvanligvis ligger på omkring 70%.

6.3 Måling af U-værdier

Idet transmissionskoefficienten skal findes, bestemmes varmetabet gennem glas og karm ved at anbringe et varmelegeme i bunden af vinduespartiet og måle, hvor meget effekt varmelegemet afgiver. Det er således nødvendigt at sørge for, at varmetransporten kun strømmer ud gennem vinduet og dets rand. Dette kan opnås ved at afskærme vinduet indvendigt fx med lufttæt papir. Der holdes nu samme temperatur i hulrummet mellem papir og glas som inde i selve rummet og herved fås kun et varmetab gennem vinduet og dets rand.

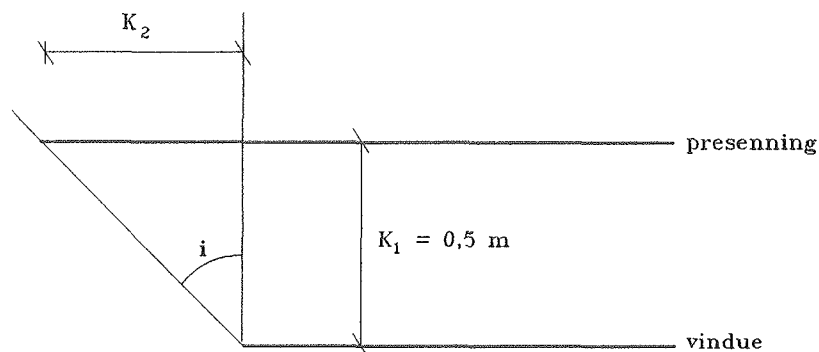


Figur 29. Skitse af forsøgsopstilling til bestemmelse af U-værdi.

Det er desuden vigtigt, at temperaturforholdene ved måling om dagen ikke forstyrres af evt. solstråling, hvorfor vinduet må afskærmes herfor fx med en presenning. For at undgå en temperaturstigning af udeluften i mellemrummet mellem vindue og presenning, er det vigtigt, at presenningen hænger i rimelig stor afstand fra vinduet. Presenningens bredde bestemmes af solens indfaldsvinkel til presenningen ved hhv. solopgang og solnedgang, som på måletidspunktet (slutningen af januar måned) er ca. 53° . Der gælder følgende formel:

$$B_p = B_v + 2 K_2$$

- hvor B_p : presenningens bredde [m]
 B_v : vinduets bredde = 0,99 m
 K_2 : et stykke af presenningen skal nå ud over vinduet på hver side heraf ($K_2 = K_1 \tan i$) [m]
 K_1 : afstand fra vindue til presenning [m]



Figur 30. Illustration af indgående størrelser ved beregning af presenningbredde.

Hvis presenningen hænges i en afstand af 0,5 m fra vinduet beregnes bredden til 2,4 m.

U-værdien beregnes nu ved hjælp af den målte samlede afgivne effekt minus det beregnede aktuelle randtab. Dette beregnes ved hjælp af førnævnte todimensionale program, der beregner det stationære temperaturfelt. Da vinduerne, som det kan ses på figur 28, er placeret med forskellige afstande til de omkringliggende vinduer og hjørner, er for hvert enkelt vindue udregnet tab gennem karm og vægttilslutning.

Tabel 20. Randtab i W/K.

	SGB - 2-lags rude	SGB - 3-lags rude	Alm. 3-lags rude
Randtab W/K	0,94	0,90	0,92

U-værdierne er bestemt ved gentagne målinger og resultaterne er behæftet med en del usikkerhed.

Tabel 21. Målte U-værdier i W/m²K.

	U-værdi (W/m ² K)
SGB - 2-lags rude	1,1 → 1,4
SGB - 3-lags rude	1,1 → 1,5
Alm. - 3-lags rude	1,7 → 2,0

Årsagen til variationen skal primært findes i den anvendte forsøgsopstilling, hvor klimavariationerne har en betydelig indflydelse på målingerne (i modsætning til målinger udført i laboratorieforsøg med "guarded hotbox"). Målemetoden baseres på, at der optræder en periode med stationære forhold på begge sider af ruden, hvilket er verificeret ved kontinuert registrering på linieskrivere af målte lufttemperaturer. Dette er imidlertid ikke en tilstrækkelig betingelse, idet frigivelse af akkumuleret varme i konstruktionerne ikke kan registreres med de anvendte målepunkter. Dette forhold sammen med variation i indvendig og især udvendig overgangsmodstand er den egentlige årsag til spredningen i de målte U-værdier.

Imidlertid varierer de målte værdier omkring de teoretiske værdier oplyst af fabrikanten eller hentet fra litteraturen.

7. ØKONOMISK VURDERING

Fra en privatøkonomisk synsvinkel kan energibesparende foranstaltninger som udskiftning til en bedre rude eller installering af isolerende skodder opfattes som investeringer, hvor forrentningen fremkommer ved en formindskelse af den årlige varmeregning. Forrentningen af den investerede kapital skal sammenlignes med den maksimalt opnåelige forrentning blandt alle andre investeringsmuligheder. Denne maksimale forrentning anvendes som den nominelle kalkulationsrente. Sammenligningen mellem forrentningen af investeringen i en energibesparende foranstaltning og den nominelle kalkulationsrente foretages i denne rapport ved hjælp af "Nuværdimetoden" /14/. Ved hjælp af denne metode får man et udsagn om investeringens positive eller negative virkning og virkningens værdi i form af nutidsværdien. Denne er et udtryk for gevinstens størrelse målt i nutidskroner, idet værdien af alle fremtidige udgifter og indtægter regnes tilbage til investeringstidspunktet.

Matematisk beregnes nutidsværdien af følgende formel:

$$Nu = b_o \frac{1 - \left(1 + \frac{r_n(1-s)-i_e}{1+i_e}\right)^{-n}}{\frac{r_n(1-s)-i_e}{1+i_e}} - u_o \frac{1 - \left(1 + \frac{r_n(1-s)-i_u}{1+i_u}\right)^{-n}}{\frac{r_n(1-s)-i_u}{1+i_u}} - I$$

hvor

Nu :	nutidsværdien [kr]
I :	investeringsudgift [kr]
b_o :	årlig energibesparelse [kr/år]
n :	økonomisk levetid [år]
r_n :	den nominelle kalkulationsrente angivet som brøk
s :	den marginale skatteprocent angivet som brøk
i_e :	den årlige energiprisstigningstakt angivet som brøk
u_o :	de årlige vedligeholdelsesomkostninger [kr/år]
i_u :	den årlige prisstigningstakt for vedligeholdelsesudgifter angivet som brøk

I nedenstående tabel er den økonomiske størst tilladelige rudeinvestering vist ved i stedet for at investere i en almindelig to-lags termorude at investere i dels en to-lags SGB-rude (coated plus gasfyldt som omtalt i kapitel 6.1) dels i en tre-lags termorude. Den økonomisk maksimale investering resulterer i en forrentning, der er lig med den nominelle kalkulationsrente.

Tabel 22. Den største rudeinvestering ift. en 2-lags rude beregnet under flg. forudsætninger:
 $r_n = 0,12$, $s = 0,50$, $n = 20$ år.

Årlig besparelse		Prisstigning på energi	Maksimal investering	
3-lags rude	2-lags SGB		3-lags rude	2-lags SGB
b_o	b_o	i_e		
kr/m ² år	kr/m ² år		kr/m ²	kr/m ²
35	60	0	403	690
35	60	0,05	606	1019
35	60	0,10	1068	1799

U-værdien for to-lagsruden er sat til 3,0 W/m²K, tre-lagsruden til 2,0 W/m²K og to-lags SGB-ruden til 1,3 W/m²K. Der er regnet med en energipris på 0,50 kr/kWh svarende til et oliefyrsanlæg med 80% nyttevirkning. Hvis opvarmningen sker ved hjælp af elektricitet, er energiprisen 1,00 kr/kWh, hvilket vil øge den maksimale investering med ca. 100%.

Nye termoruder forventes at have væsentlig bedre holdbarhed - i ovenstående tabel er regnet med, at ruden har en levetid på 20 år. Da det kun er selve ruden, der betragtes, påregnes ingen løbende udgifter. Priserne indhentet fra leverandør er for to-lagsruden 500 kr/m², for tre-lagsruden 800 kr/m² og for to-lags specialruden (coated og gasfyldt) 1000 kr/m².

I beregningerne er der kun regnet med de besparelser, der opnås i varmemæssig sammenhæng dvs. nedsættelse i U-værdier i forhold til to-lagsruden. Den lavere solstrålingstransmittans er således ikke medregnet i den økonomiske analyse.

Til vurdering af isolerende skodder er der i omstående tabel beregnet den maksimale skoddepris for forskellige økonomiske levetider. Der er regnet med samme energipris, skatteprocent, nominel kalkulationsrente og energiprisstigninger som i det foregående. Energibesparelsen ved brug af skodder i fyringssæsonen er ca. 100 kWh/m²år /29/.

Tabel 23. Den økonomisk størst tilladelige skoddeinvestering, beregnet under flg. forudsætninger:

$$r_n = 0,12, s = 0,50, i_u = 0,05$$

$$U\text{-værdi for vindue} = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

$$U\text{-værdi for skodde + vindue} = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

Årlig besp.	Årlig udg.	Prisstign. på energi	Maksimal skoddeinvestering		
b_o	u_o	i_e	n=5 år	n=10 år	n=15 år
kr/m ² år	kr/m ² år		kr/m ²	kr/m ²	kr/m ²
50	5	0	218	426	623
		0,05	218	428	627
		0,10	218	429	629
50	10	0	194	379	554
		0,05	194	380	557
		0,10	194	381	559

Det fremgår af tabellen, at den maksimale investering kun afhænger en smule af stigningstakten for energiprisen, medens en ændring i de årlige udgifter har en større effekt. Der er således en næsten lineær sammenhæng mellem den maksimale skoddeinvestering og differensen ($b_o - u_o$).

Til vurdering af rentabiliteten af isolerende skodder er den anslåede materialepris 170 kr for en indvendig skodde konstrueret af 1 m² 30 mm isoleringsplade med kantlister og tætningsprofil. En udvendig skodde opbygget af en simpel ramme med 50 mm mineraluld og beklædt med krydsfiner på begge sider vil i materialepriser koste ca. 220 kr/m². Hvis der anvendes en færdig vindueskonstruktion, hvor glasset erstattes af 50 mm mineraluld, øges skoddeprisen for materialerne til ca. 800 kr/m².

I ovenstående prisoverslag er der ikke medregnet arbejds løn undtagen for den færdige vindueskonstruktion. Det er muligt at fremstille simple skodder til såvel udvendig som indvendig brug, som er økonomisk rentable inden for en tidshorisont på 5 år. Skodderne vil være vanskelige at betjene og opmagasinere specielt for den udvendige skodde. Udformes skodden mere brugervenligt, stiger prisen kraftigt, hvorved den økonomiske fordel forsvinder.

8. KONKLUSION

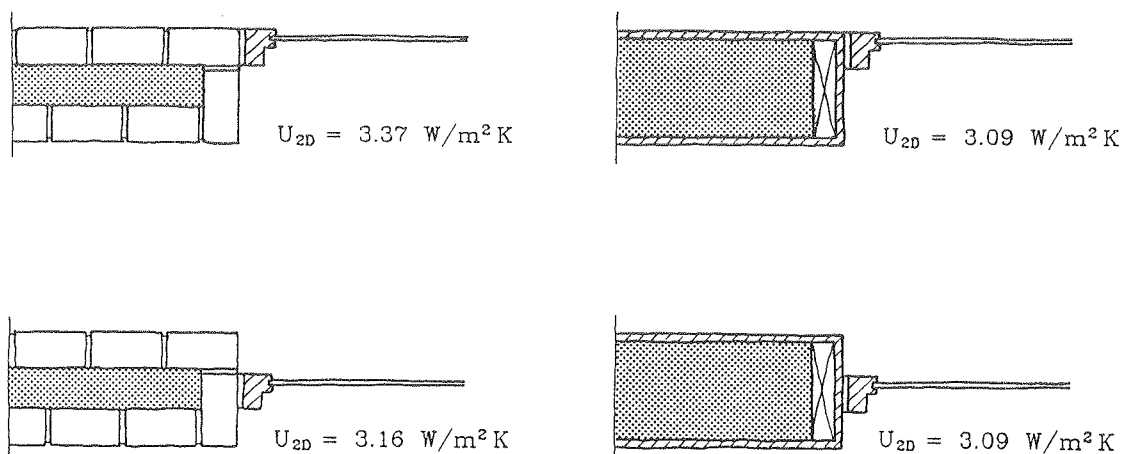
Den optimale placering og udformning samt valg af rudetype er fundet ved at betragte energibalancen for et 1,2 m x 1,2 m vindue med et glasareal på ca. 74% (1,06 m²) under hensyntagen til de todimensionale temperaturfelter ved vinduets tilslutning til den omgivende væg.

Ved beregning af energibalancer er det danske referenceår (TRY) benyttet, og fyringssæsonen er defineret som perioden oktober-april, begge måneder incl.

I de udførte beregninger er det ekstra varmetab pga. de flerdimensionale temperaturfelter henført til vinduet, idet alternativet er en ubrudt velisoleret væg. Isættelse af et vindue påvirker typisk varmetabet i væggen op til 0,5 m fra vindueshullet.

Vinduets placering i væggen:

Vinduer bør som hovedregel sidde midt ud for væggens isoleringslag, idet indflydelsen fra de flerdimensionale felter herved minimeres. I meget tykke vægge eller i vægge hvor isoleringen sidder i den inderste halvdel, kan det være en energimæssig fordel at placere vinduet længere ude i væggen af hensyn til udnyttelse af solindfaldet. Det er dog i denne sammenhæng særdeles vigtigt at analysere kuldebroforholdene omkring vinduet. I en vægkonstruktion bestående udelukkende af velisolerende materialer vil varmetabskoefficienten for vinduet ikke ændre sig syn-derligt, idet kuldebroforholdene vil være ens uafhængig af vinduets position. Derimod vil der kunne opstå betydelige forskelle i en væg bestående af materialelag med meget forskellig isole-ringsevne. Figur 31 viser dette forhold, illustreret ved en let væg og en traditionel muret vægkonstruktion.



Figur 31. Kuldebro omkring vinduet afhængig af vægkonstruktion og vinduets placering.

I den lette vægkonstruktion er varmetabskoefficienten for vinduet uafhængig af placeringen, medens der i den murede konstruktion sker en stigning på 4%, når vinduet flyttes fra midterpositionen til placeringen yderst i væggen. Derimod øges solindfaldet i fyringssæsonen med ca. 10% ved den udvendige placering af vinduet.

Vinduets orientering:

Det største solvarmetilskud opnås ved at orientere vinduerne mod syd, hvis der ikke er nogen generende skygger. Analyserne har vist, at det for at opnå en korrekt varmebalance for vinduet er meget væsentligt at analysere skyggeforholdene - der er i forbindelse med projektet udviklet et EDB-program til sådanne analyser. Med udgangspunkt i standardvinduet med en tolags termorude, viser beregning af energibalancen i fyringssæsonen, at hvis vinduet flyttes fra en sydvendt flade til en øst- eller vestvendt flade, forøges varmetabet med ca. 70%. Vender vinduet mod nord er nettovarmetabet ca. 100% større end for det sydvendte vindue.

Vinduets størrelse:

Størrelsen af vinduet har stor betydning for vinduets energibalance, idet ramme-/karmarealet for små vinduer udgør en meget stor andel af vinduets samlede areal. Ramme og karm isolerer bedre end en alm. termorude, men er til gengæld ikke transparent, hvorfor nettovarmetabet er større end for glasdelen af vinduet.

Tages igen udgangspunkt i et sydvendt standardvindue ($1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$), vil nettovarmetabet, regnet pr. arealenhed, for et sydvendt vindue på $0,6 \times 0,6 \text{ m}^2$ blive ca. 65% større.

Øges vinduets størrelse til $1,8 \times 1,8 \text{ m}^2$ viser varmebalancen en formindskelse af varmetabet på ca. 28% (pr. m^2). Forøges vinduets størrelse yderligere, vil varmebalancen nærme sig den varmebalance, der gælder for vinduets midte.

Vinduets form:

Den optimale vinduesform for et sydvendt vindue er kvadratisk, idet glasarealet ifht. det totale areal i dette tilfælde bliver størst, ensbetydende med at omkredsen af vinduet minimeres. Et højt smalt vindue vil have ca. 140% større nettovarmetab end et kvadratisk i fyringssæsonen (Tabel 11).

Betydningen af ramme-/karmarealet:

Ramme-/karmarealet er karakteriseret ved at være ikke-transparent og dårligt isolerende, hvorfor denne del af vinduet er den energimæssigt dårligste. Der er i de foregående beregninger anvendt en totalbredde for ramme og karm på 85 mm. Øges dimensionen til en bredde på 150 mm, stiger nettovarmetabet pr. m² med ca. 21 % for et to-lags vindue. Fjernes ramme og karm fuldstændigt, bliver varmebalancen næsten uændret ifht. til vinduet med 85 mm ramme-/karmbredde. Umiddelbart burde varmebalancen forbedres, idet solindfaldet i fyringssæsonen øges med ca. 38 %. Imidlertid øges vinduets varmetabskoefficient med ca. 21 %, da karmen trods alt er bedre isolerende end to-lags vinduet.

Betydning af brug af skodder

Brug af isolerende skodder (U-værdi af skodde plus 2-lags rude = 0,9 W/m²K) hver nat i fyringssæsonen gør nettovarmetabet for et sydvendt vindue negativt (-15 kWh/m²). Dette svarer til en energibesparelse på 120 kWh/m².

Andre rudetyper:

I det foregående er der udelukkende anvendt en almindelig tolags termorude med 12 mm glasafstand og en center U-værdi på ca. 3,1 W/m²K. Nye rudetyper med gasfyldning og coating af en glasside har en center U-værdi på ca. 1,2 W/m²K. Erstatte den alm. termorude med en af de nye ruder, forbedres varmebalancen for standardvinduet med ca. 66 % set over fyringssæsonen. I forhold til forskellen i center U-værdien er denne besparelse skuffende, men coatingen i den nye rudetype bevirker et fald i solenergitransmittansen på ca. 25 %. Dertil kommer, at varmetabet gennem ramme-/karmprofiler udgør en langt større del af vinduets samlede varmetab, når glassets U-værdi forbedres. Det vil med de nye rudetyper være en fordel at mindske ramme-/karmarealet eller forbedre isoleringsevnen af ramme og karm.

De nye rudetyper har, ud over en reduktion af varmetabet, den yderligere fordel, at de reducerer overophedningsproblemet om sommeren pga. den mindre solvarmetransmittans.

9. LITTERATURLISTE

- /1/ Bo Adamson m.fl.: Window design with respect to thermal performance, Swedish Council for Building Research, D15:1987, Stockholm 1987.
- /2/ Ole Albrechtsen: Varmetransmission, Laboratoriet for Varme- og Klimateknik, 1981.
- /3/ Ann-Charlotte Andersson: Köldbrygger i tilläggsisolerade ytterväggar, Statens råd for byggnadsforskning, R46, 1978.
- /4/ Gösta Brown og Engelbrecht Isfält: Solinstråling och solavskärmning, Byggforskningen, R19:1974, Stockholm.
- /5/ M. Byberg m.fl.: Insulated Shutters, Laboratoriet for Varmerisoleriing, Meddelelse nr. 144, 1983.
- /6/ Bygningsreglement 1982 (BR82), Byggestyrelsen, december 1982.
- /7/ Jørgen Erik Christensen: Noter til kursus i edb-beregninger af bygningers varmebalance. Laboratoriet for Varmerisoleriing, december 1987.
- /8/ Dansk ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab, NP-186-S (DS418), 5. udgave, Teknisk Forlag, november 1986.
- /9/ Folke Hagman: Fönster som energifaktor, Byggeforskningen, Rapport R43, 1973.
- /10/ Keld Helbig Hansen: Easyplot brugsvejledning, UNI-C, version 4.2, 1. udg. 1984, rev. 1985.
- /11/ Ingemar Höglund: Värmebalansproblem hos fönster, Kungliga Tekniska Högskolan, Meddelande nr. 140, Stockholm 1983.
- /12/ Niels Mejlhede Jensen: Solopvarmning gennem vinduer, Laboratoriet for Varmerisoleriing, Meddelelse nr. 124, november 1982.
- /13/ Lars Ravn Jensen: Vinduer og Energi, Laboratoriet for Varmerisoleriing, Meddelelse nr. 55, 1977.
- /14/ Kjeld Johnsen m.fl.: Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger, SBI-anvisning 132, 1982.
- /15/ Bertil Jonsson: Värmetransport genom fönster med låga k-värden, Tekniska och Naturvetenskapliga Högskolan, Rapport 1987:14, Lund 1987.
- /16/ Vagn Korsgaard og M. Byberg: El-modeller til beregning af flerdimensionale varme-strømme i bygningskonstruktioner, Laboratoriet for Varmerisoleriing, Meddelelse nr. 9, marts 1965.

- /17/ Alice Kjær og Thomas Pedersen: Vinduer som energifangere, SBI-rapport 182, Statens Byggeforskningsinstitut 1986.
- /18/ Henrik Lawaetz: Solindfald og solvarmeanlæg - Målt og beregnet, Laboratoriet for Varmeisolering, Meddelelse nr. 106, oktober 1980.
- /19/ Henrik Lawaetz og Carsten Nielsen: Sammenlignende målinger af solindfald, intern rapport, Laboratoriet for Varmeisolering, april 1978.
- /20/ Jens F. Madsen: Om beregning af stationære felter ved elektriske netværksanalogier. Publ.nr. 7307, Stærkstrømsafdelingen, DTH, 1973.
- /21/ Anker Nielsen: Valg af glastype i vinduer ud fra energisynspunkt, Byggeindustrien 6/7, 1982.
- /22/ Anker Nielsen: Vinduets betydning for enfamiliehusets energiforbrug, Laboratoriet for Varmeisolering, Meddelelse nr. 105, november 1980.
- /23/ Bent Lund Nielsen: Termogardiner, Jysk Teknologisk Institut, september 1987.
- /24/ Bent Lund Nielsen: Varmetab gennem vinduer, Jysk Teknologisk Institut, projekt nr. R10-08, februar 1982.
- /25/ Agneta Olsson-Jonsson: Förbättring af fönsters värmeisolering samt upplevelse af fönsterbyten, Statens råd för byggnadsforskning, R40, Stockholm 1988.
- /26/ Erwin Petersen: Solindfald gennem vinduer, Laboratoriet for Varmeisolering, Meddelelse nr. 13, 1966.
- /27/ Erwin Petersen, Solstråling og dagslys - målt og beregnet, Lysteknisk Laboratorium, 1982.
- /28/ Bjarne Saxhof: External insulating shutters in energy conservation houses, Laboratoriet for Varmeisolering, Meddelelse nr. 129, 1982.
- /29/ Jørgen M. Schultz: Isolerende skodder, Laboratoriet for Varmeisolering, Meddelelse nr. 202, december 1990.
- /30/ Jørgen M. Schultz: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader, Laboratoriet for Varmeisolering, Rapport 87-26, 1987.
- /31/ William A. Shurcliff: Thermal Shutters & Shades, Massachusetts 1980.
- /32/ Teknologisk Institut, Byggeteknik: Termoruders egenskaber og anvendelse, 1986.

- /33/ Kirsten E. Thomsen og Jørgen M. Schultz: Målinger og beregninger af solindfald gennem glaspartier under hensyntagen til skyggende genstande for lavenergihus G i Hjortekær, Laboratoriet for Varmeisolering, Rapport 87-24, 1987.
- /34/ Uyttenbroeck, J. m.fl.: Study for a Eurocode on the rational use of energy in buildings (final report), Commission of the European Communities, December 1986.
- /35/ Ragnhild Wintzell: Solinstråling genom skyggade fönster, HBS:S Riksförbund.
- /36/ Kim Wittchen og Jørgen M. Schultz: Varmetab gennem vinduer, Eksamensprojekt, Laboratoriet for Varmeisolering, februar 1985.

LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering, DTH

- 1 Bolet, B., Rasmussen, N.H. & Korsgaard, V.: Ressourcebesparende kassettebyggesystem til lavenergihuse. LfV, Meddelelse nr. 197, december 1988.
- 2 Byberg, M.R.: Fremtidens lavenergihuse, XII Nordiske VVS Kongres i København, VVS Vision 82, 2/6-4/6 1982, Særtryk, LfV, Rapport nr. 82-26, juni 1982.
- 3 Byberg, M.R.: Do Conservation Houses Require Sophisticated Technical Installations?, LfV, Meddelelse nr. 127, november 1982.
- 4 Byberg, M.R.: Forbedret bearbejdning af måledata fra nyt lavenergihus, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 125-133, maj 1984.
- 5 Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Kort beskrivelse af husene, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Low-Energy Houses at Hjortekær - Description of the Houses, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Niedrigenergiehäuser in Hjortekær, Dänemark - Kurze Beschreibung der Häuser, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.
- 6 Byberg, M.R. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Konstruktioner - arbejdsudførelse og erfaringer, LfV, Meddelelse nr. 120, november 1982.
- 7 Djurtoft, R.G.: Monitoring Energy Conservation Houses, ENERGEX 82, LfV, Rapport nr. 82-28, juni 1982.
- 8 Djurtoft, R.G.: Beregning og måling af mekanisk luftskifte i lavenergieksperimenthuset, LfV, Rapport nr. 82-65, december 1982.
- 9 Djurtoft, R.G.: Nordiske retningslinier for evaluering af byggeeksperimenter - Er noget sådant muligt?, Utvärdering av Experimentbyggnadsprojekt inom Energiområdet, Nordiskt Expertseminarium 6/9-7/9 1983 i Esbo, Finland, Særtryk, LfV, oktober 1983.
- 10 Djurtoft, R.G.: Tidskonstanter for huse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 40-56, maj 1984.
- 11 Djurtoft, R.G.: Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 73-82, maj 1984.
- 12 Djurtoft, R.G.: Must Energy Conservation Houses be Designed for Maximum Utilization of Solar Heat Gain?, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 167-173.

- 13 Engelund Poulsen, K.: Isolerende vinduesskodder, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 83-90, maj 1984.
- 14 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Målinger og beregninger af solindfald gennem glaspartier under hensyntagen til skyggende genstande for lavenergihus G i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 87-24, december 1987.
- 15 Gullev, J.: Lavenergihuse i Hjortekær, Byggeindustrien nr. 1, 1979, pp. 9-15.
- 16 Huusom, J. & Lund Madsen, T.: The Thermal Indoor Climate in six Low Energy Houses, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print, LfV, 1980.
- 17 Korsgaard, V., Byberg, M.R. & Hendriksen, P.: Experiences and Results from 2 Years Monitoring of the Energy Balance for Six Solar Assisted Low Energy Houses in Denmark, Solar 83 Conference, Palma de Mallorca 2/10-6/10 1983, Off-print, LfV, oktober 1983.
- 18 Kristensen, P.E.: Performance of Hjortekær House D and F - Internal report within the Performance Monitoring Group, LfV, Rapport nr. 83-48, december 1983.
- 19 Rasmussen, N.H.: En analyse af energibesparelser i etageejendom fra 1940 - foranstaltningernes energi- og pengeøkonomiske konsekvenser, LfV, Meddelelse nr. 111, juli 1981.
- 20 Rasmussen, N.H.: Trykprøvning af seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-69, december 1982.
- 21 Rasmussen, N.H.: Simultaneous Testing of Small Heat Pumps Under Actual Climate Conditions, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 6, pp. 147-153.
- 22 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: Experimental Low-Energy House at the Technical University of Denmark, description of a system for simultaneous testing of heating systems for conservation houses under actual climate conditions, LfV, Meddelelse nr. 128, november 1982.
- 23 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg, LfV, Meddelelse nr. 152, juni 1984.
- 24 Saxhof, B.: Transmissionskoefficienter og dimensionerende varmetab for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-11, juni 1982.
- 25 Saxhof, B.: Varmetabsramme og isoleringsgrad for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-12, juni 1982.
- 26 Saxhof, B.: Skøn over følsomhed af målte og beregnede transmissionstab for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-56, oktober 1982.

- 27 Saxhof, B.: External Insulating Shutters in Energy Conservation Houses, LfV, Meddelelse nr. 129, november 1982.
- 28 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Vejrstation, LfV, Rapport nr. 83-5, april 1983.
- 29 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Måling af rum- og jordtemperaturer, LfV, Rapport nr. 83-15, september 1983.
- 30 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Målinger i varme- og ventilationsanlæg m.v., LfV, Rapport nr. 83-16, september 1983.
- 31 Saxhof, B.: Skitse til målesystem til lavenergihus G i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 83-27, oktober 1983.
- 32 Saxhof, B.: Opstilling af nettoenergiregnskab efter BES-metoden for Lavenergihus G i Hjortekær (skitseprojekt), LfV, Rapport nr. 83-47, december 1983.
- 33 Saxhof, B.: Utilsigtede varmetab fra installationer i lavenergihuse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 91-102, maj 1984 (optrykt i VVS nr. 9, september 1985, pp. 17-21).
- 34 Saxhof, B.: Installationers betydning for klimaskærmens lufttæthed, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 103-115, maj 1984.
- 35 Saxhof, B.: The Seventh Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 255-262.
- 36 Saxhof, B.: Efficient Heating and Domestic Hot Water Systems: A Must for Low-Energy Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 319-324.
- 37 Saxhof, B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-8, 1987.
- 38 Saxhof, B.: Low-Energy Houses, 1st International Symposium on Energy Savings - Focussing on electricity savings, Copenhagen 1/9-4/9 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-21, september 1987.
- 39 Saxhof, B.: Summary on new materials, components and system concepts - Denmark, Monograph Part 2, IEA Workshop on Advanced Solar Building Design and Analysis, Watsonville, California, February 3-6 1988, LfV, januar 1988.

- 40 Saxhof, B.: The Thermal Envelope - An Integrated Part of the Heating System? Science and Technology at the Service of Architecture. 2nd European Conference on Architecture (SECA). Paris 4-8 dec. Off-print. 1989.
- 41 Saxhof, B.: Designing Detailed Monitoring Programmes (Questions and some Answers), Off-print af paper til IEA Workshop: Field Monitoring - For a Purpose, Göteborg 2-5 april 1990, LfV, marts 1990.
- 42 Saxhof, B., Djurtoft, R.G., Byberg, M.R. & Aasbjerg Nielsen, A.: Six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, Description of the Houses and Presentation of Energy Measurements during the first Winter, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print, LfV, 1980.
- 43 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Foundations for Energy Conservation Houses, LfV, Meddelelse nr. 130, november 1982.
- 44 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af en række fundamentskonstruktioner, LfV, Rapport nr. 83-45, december 1983.
- 45 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af varmebehov, LfV, Rapport nr. 83-46, december 1983.
- 46 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Parametric Studies and Monitoring Results from a Danish 2nd Generation Low-Energy House Project, Off-print af paper til CIB W67 Workshop: Low-Energy-Buildings 2nd generation, Heidenheim 31 May-1 June, 1990, LfV, maj 1990.
- 47 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Wittchen, K.B.: From the Zero Energy House to the 1st and 2nd Generation Houses at Hjortekær, Denmark, LfV, Meddelelse nr. 200, december 1988.
- 48 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Om Energiministeriets lavenergihusprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2.-generations lavenergihus, Supplerende materiale til Energiministeriets plakat-vandredstilling, LfV, 1986.
- 49 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Project Monitor: Low Energy House G, Hjortekaer, Denmark, Commission of the European Communities, Nr. 41, februar 1989.
- 50 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, i Example houses from the Participating Countries, IEA SH&CS Task XIII Working Document, (Proceedings from the 1st Workshop, Hinterzarten, Vesttyskland, 30 januar-1 februar 1989), EMPA, Dübendorf, Schweiz, Off-print, LfV, november 1989.

- 51 Saxhof, B. & Aasbjerg Nielsen, A.: Insulation and Air Tightness of six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, LfV, Meddelelse nr. 121, november 1982.
Kongresbidraget, som dannede grundlaget for Meddelelse nr. 121, er udgivet på engelsk og fransk i Building Research & Practice, May/June 1983, pp. 142-153.
- 52 Schultz, J.M.: Analysis of Insulating Window Shutters, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-9, 1987.
- 53 Schultz, J.M.: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader, LfV, Rapport nr. 87-26, december 1987.
- 54 Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Thermal Analysis of Window Design, Off-print af paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim 20-22 august 1990, LfV, juni 1990.
- 55 Wittchen, K.B.: Air-Supply in Airtight, Highly Insulated Buildings, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-10, 1987.
- 56 Wittchen, K.B.: Friskluftforsyning til tætte, velisolerede huse, LfV, Meddelelse nr. 192, december 1988.
- 57 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Dimensioning Heating Systems for Low-Energy Buildings, Considering the Influence of Fluctuating Temperatures, Off-print af paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim 20-22 august 1990, LfV, juni 1990.
- 58 Zachariassen, H.: H&S lavenergihus i Hjortekær, Arkitekten nr. 17, 1982, pp. B5-B8.
- 59 Aasbjerg Nielsen, A.: Energy Consumption in Buildings, Regression Models, Six Low-Energy Houses at Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-68, december 1982.
- 60 Aasbjerg Nielsen, A.: To økonomiprogrammer til TI-59, LfV, Rapport nr. 83-9, maj 1983.
- 61 Aasbjerg Nielsen, A.: En dynamisk test-metode til bestemmelse af småhuses termiske respons, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 57-72, maj 1984.
- 62 Aasbjerg Nielsen, A.: A Dynamic Test Method for the Energy Consumption of Small Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 2, pp. 533-541.
- 63 Aasbjerg Nielsen, A.: Dynamisk trykprøvning - En infrasonisk metode til måling af småhuses tæthed, LfV, Rapport nr. 87-1, 1987.

- 64 Aasbjerg Nielsen, A., Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær - Statusrapport 1, LfV, Meddelelse nr. 84, juni 1979.
- 65 Aasbjerg Nielsen, A. & Kjær Nielsen, B.: A Dynamic Test Method for the Thermal Performance of Small Houses, ACEEE Summer Study, Santa Cruz 1984, LfV, Rapport nr. 84-19, juli 1984.
- 66 2.-generations lavenergihus i Hjortekær, folder, LfV, 1984.

Findes også på engelsk: A Second-Generation Low-Energy House at Hjortekær.

Laboratoriets meddelelsseserie forhandles gennem Byggecentrums Boghandel.

Yderligere oplysninger kan fås ved henvendelse til:

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Bygning 118, DK-2800 Lyngby
Telefon (+45) 45 93 44 77
Fax (+45) 45 93 17 55

Thermal Analysis of Window Design. Off-print af paper præsenteret på Nordisk Symposium
om Bygningsfysikk, Trondheim, 20.-22. august 1990

THERMAL ANALYSIS OF WINDOW DESIGN

Jørgen M. Schultz
Kirsten E. Thomsen
Civil Engineers, M Sc

Thermal Insulation Laboratory
Technical University of Denmark
Building 118, DK-2800 Lyngby

DENMARK

1. INTRODUCTION

A great part of the heat loss through the thermal envelope of our houses occurs through the windows, which makes them the weakest point in new well insulated and airtight houses. In the recent years windows with U-values of 0.8-1.3 W/m²K have been developed, and in a few years windows with centre U-values as low as 0.4 W/m²K (eg windows insulated with slightly evacuated monolithic silica aerogel (AIRGLASS) or evacuated windows) will be available.

The net heat loss through windows is a combination of heat loss through the window frame, case and panes, and heat gain from solar radiation. The net heat loss is dependent of materials, component design, usability of the solar gain, the window size, position in the wall and the joint between wall and window. New window panes with low U-values make the heat loss through the rest of the window and the nearest part of the wall still more important.

In a project funded by the Danish Department of Energy, called "Optimum Design of Windows", THOMSEN and SCHULTZ 1990, a detailed theoretical investigation is carried out by use of computer calculations, to clarify the connections between window design and net heat loss. In this paper the main results are shown.

2. CALCULATION OF HEAT FLOWS AND ENERGY BALANCES

The calculation of the two-dimensional heat flow is performed with a computer program, an adapted version of an electric resistance program developed at another institute at the Technical University, MADSEN 1973. When calculating the U*-value the extra heat loss through the adjacent wall due to the two-dimensional heat flow is included under the heat loss of the window. The method of determining the U*-value is shown in figure 1.

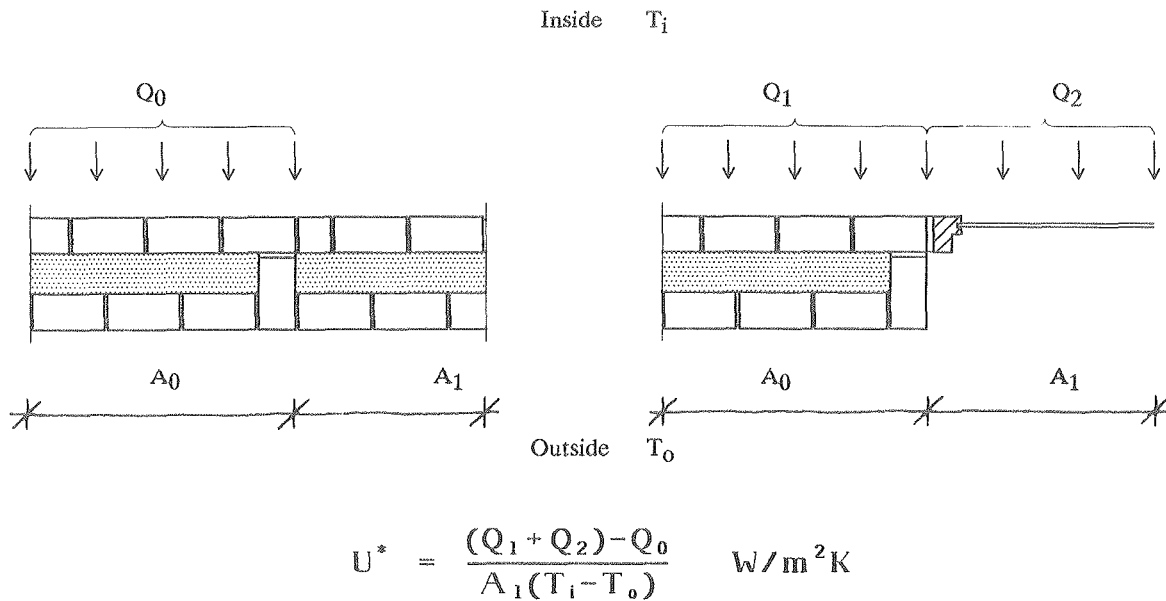


Figure 1. Calculation of the heat loss coefficient, U^* , for a window in a wall.

Q : heat flow [W]

T : temperature [$^{\circ}\text{C}$]

A_0 : area of wall [m^2]

A_1 : half the area of window opening [m^2]

The energy balances are based on the solar heat gains and the above mentioned U^* -values. The solar heat gains are calculated by use of a computer program developed at the Thermal Insulation Laboratory, SCHULTZ 1987. The program calculates the shadowed area on plane surfaces regarding the surroundings and the building itself, and calculates the incoming solar radiation regarding the angle of incidence.

For calculation of energy balances, defined as the net heat loss in kWh per m^2 total window area over the heating season, the Danish Test Reference Year (TRY), ANDERSEN et al 1986, is used with the heating season defined as the period from October to April inclusive (approximately 3000 heating degree days, base 17°C). The indoor temperature is kept at 20°C .

The energy balance is calculated with 100% utilization of the incoming solar radiation, which seems very optimistic, but anyway realistic in Denmark (dependent of eg the size and orientation of the windows and the thermal mass of the room, PETERSEN and THOMSEN 1990).

3. REFERENCE WINDOW

To quantify the difference between different window designs a reference window is chosen with a dimension of 1.2 m · 1.2 m, south orientated, positioned at the exterior of a 350 mm thick cavity insulated brick wall ($U\text{-value} = 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$). The transparent area (double glazed, air filled) makes up 74% of the total window area (1.06 m^2), and has a centre $U\text{-value}$ of $3.2 \text{ W/m}^2\text{K}$. The total solar transmittance is 73%. The total width of the frame and casing is 85 mm on each side of the transparent part and the $U\text{-value}$ is $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4. THE WINDOW POSITION RELATIVE TO THE WALL

As a main rule windows should be positioned in continuation of the insulation layer in the wall, as this leads to the most linear isotherms and therefore a minimisation of the multi-dimensional effects. However, if it is a thick wall or if the insulation is positioned in the inner part of the wall, it can be an advantage to position the window nearer to the outside of the wall for better utilization of solar energy (less shadowing from the wall). In this case it is very important to analyze the thermal bridge effect around the window/wall joint. If the wall construction is made of well insulating materials (eg wood and insulation) there will only be a small difference in U^* -value between windows in the middle and windows flush with the inner or outer side. On the other hand, important differences can occur if the wall is made of inhomogeneous materials, eg cavity insulated brick walls. Figure 2 shows the calculated U^* -values for a double pane window positioned at the face and in the middle of a light, well insulated wall ($U\text{-value} = 0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$) and an insulated brick wall ($U\text{-value} = 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$).

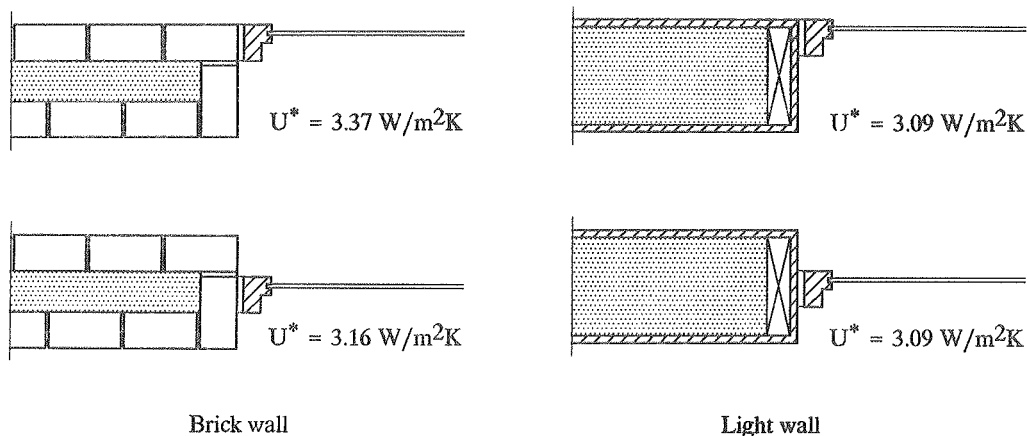


Figure 2. Thermal bridge effects at the wall-window joint for different wall constructions and reference window positioned at the face and in the middle of the walls, illustrated by the change in U^* -value.

In the light wall construction there is no difference in U^* between the different window positions, while in the brick wall there is a difference in U^* of about 7%. In the energy balances

the decrease in heat loss by placing the window in the middle instead of at the face of the wall is partly counteracted by a decrease in solar heat gains. Nevertheless the net heat loss for the reference window decreases by about 10 kWh/m² corresponding to a net heat loss decrease of 9%. In the light wall construction there will be an increase in net heat loss of 10% by the middle position relative to the outer position.

5. ORIENTATION OF THE WINDOW

South orientation of the windows gives the maximum solar heat gain. With the reference window as basis, calculations of the net heat loss in the heating season show, that moving the window from a south wall (net heat loss 105 kWh/m²), to an east or west wall increases the net heat loss by about 70% (75 kWh/m²). If the window is built into a north wall the net heat loss increases by about 110% (115 kWh/m²) relative to the south orientated window.

6. SIZE OF THE WINDOW

The size of the window is an important quantity with respect to the energy balance of the window, as the relative area covered by the window frame increases when the total window area decreases. Even though a wooden frame has a higher thermal resistance than a standard double pane window, the net heat loss per m² increases for small windows, even for north facing windows, because of the opaque window frames. The net heat loss per m² for a 0.6 m · 0.6 m window facing south is about 65% (70 kWh/m²) higher than for the reference window in the same position. If on the contrary the window size is increased to 1.8 m · 1.8 m the net heat loss per m² decreases by about 30% (30 kWh/m²).

7. AREA OF WINDOW FRAME AND CASING

As previously mentioned the window frame and casing are opaque and have a thermal resistance much lower than the surrounding walls, making this part of the window thermally inefficient. The previous calculations are based upon a total dimension of 85 mm on each side for the frame and casing. Table 1 shows the energy balances split into solar gains and heat losses, and furthermore the savings compared to the reference window.

Table 1. Energy balances (kWh/m²) for south orientated windows in the heating season, and savings compared to the reference window.

Size of frame and casing on each side	Solar gains	Heat losses	Net heat losses	Savings
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	%
None	260	350	90	14
85 mm	180	285	105	-
150 mm	140	275	130	-24

8. WINDOW WITH HIGHLY INSULATING GLAZING

The previous calculations are based upon an air filled double-glazed window with a centre U-value of 3.2 W/m²K. New gas filled and low-emissivity coated windows have centre U-values of 0.8-1.3 W/m²K, but also a reduction in the solar transmittance. If a window with a centre U-value of 1.3 W/m²K is selected, the U*-value for the window positioned at the face and in the middle of an insulated brick wall is 1.90 and 1.68 W/m²K respectively. In table 2 the energy balances are shown for this window positioned outside (total solar transmittance = 62%) and the reference window.

Table 2. Energy balances (kWh/m²) for south orientated windows in the heating season, and savings compared to the reference window.

Type of glazing	Solar gains	Heat losses	Net heat losses	Savings
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	%
Reference	180	285	105	-
Gas filled and coated	155	160	5	95

This calculation shows that it is impossible to obtain positive energy balances in this actual wall with the above-mentioned glazing. It must be emphasized that the calculations are performed with U*-values, which are of course higher than the centre U-values. To get a balance between solar gains and heat losses for the reference window (total solar transmittance = 73%) it is necessary to have a U*-value of 2.14 W/m²K.

Table 3 shows the net heat losses for windows orientated towards north, east, south and west respectively.

Table 3. Net heat losses (kWh/m²) in the heating season for north, east, south and west orientated windows. *) U = 1.3 W/m²K, U* = 1.90 W/m²K, T = 62%.

Orientation	North	East	South	West
Reference	220	180	105	180
Gas filled and coated *)	105	70	5	70

The thermal bridge effect of the window frame becomes more serious, when the U-value of the glazing is decreased. This problem will be even more serious when new windows with centre U-values of about 0.5 W/m²K are developed. To make the new well insulating window panes more efficient it is necessary to develop small frames and/or frames with a high thermal resistance.

9. WINDOW WITH MOVABLE INSULATION

Another way to minimize the heat loss through windows is to apply movable insulation, in this case a mobile and rigid opaque insulating panel with a U^* -value of shutter plus reference window about $0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$. The annual energy saving is depending on the individual user, but if shutters are used every night in the heating season in front of a normal double-glazed construction the annual savings are approximately 120 kWh/m^2 . The net heat loss for south orientated windows will then become negative (-15 kWh/m^2), ie the windows will contribute to a reduction of the auxiliary heat demand.

10. CONCLUSIONS

Windows should be south orientated. If the windows are moved from the south facade (net heat loss 105 kWh/m^2) to an east or west facade the net heat loss increases by 75 kWh/m^2 (70%) in the heating season.

As a main rule windows should be positioned in continuation of the insulation layer in the surrounding wall. Otherwise the net heat loss per m^2 window can increase by about 10% in the heating season. If it is possible to move the window outwards in the wall construction without creating serious thermal bridges around the joint between the window and the wall, the net heat loss will decrease by about 10% due to an increase in solar heat gains.

Use of insulating shutters (U^* -value of shutter plus reference window = $0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$) every night during the heating season makes the net heat loss for the reference window negative (-15 kWh/m^2).

From a thermal point of view, the total glass area of a house should be divided into as few windows as possible for reduction of the influence from the thermal bridge effect from the frame and case, eg the net heat loss per m^2 will increase by 65% if the $1.2 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m}$ window is exchanged with $0.6 \text{ m} \cdot 0.6 \text{ m}$ windows. The final design will be a compromise between energy savings and daylighting.

Use of gas filled and low emissivity coated window panes with low centre U-values will most often be preferable as there is a big reduction of the net heat loss in spite of a decrease in solar heat gains.

Further thermal improvements of windows will require a development of very small and/or highly insulated window frames. A project concerning this problem has started at the Thermal Insulation Laboratory, January 1990.

11. REFERENCES

- ANDERSEN B., EIDORFF S., HALLGREN L., LUND H., PEDERSEN E., ROSENØRN S. & VALBJØRN O. (1986) Danish Test Reference Year, TRY, Meteorological Data for HVAC and Energy. Report no. 174. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby.
- MADSEN J.F. (1973) Om beregning af stationære felter ved elektriske netværksanalogier. (On the Calculation of Stationary Fields by Electric Network Analogies). In Danish. Publ. no. 7307. Electric Power Engineering Department, Technical University of Denmark, Lyngby.
- SCHULTZ J.M. (1987) Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader. (General Program for Calculating Shadow-Areas on Plane Surfaces). In Danish. Report no. 87-26. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby.
- THOMSEN K.E. and SCHULTZ J.M. (1990) Optimal vinduesudformning - en varmeteknisk undersøgelse. (Optimum Window Design - A Thermal Analysis). In Danish, with an English summary. Report no. 201 (to be published shortly). Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby.
- PETERSEN E. and THOMSEN K.E. (1990) Varmeakkumuleringssevne for boliger (Thermal Capacity of Buildings). In Danish, with an English summary. (To be published shortly). Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby.

