



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R87:1985**

**Folier på befintliga och nya  
fönster**

**Energisparmöjligheter**

**Valdis Girdo**

R  
A/da

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

*su*

**Byggeforskningsrådet**

R87:1985

FOLIER PÅ BEFINTLIGA OCH NYA FÖNSTER

Energisparmöjligheter

Valdis Girdo

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 820836-2  
från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen  
för byggnadsteknik, KTH, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R87:1985

ISBN 91-540-4426-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1985



## INNEHÅLL

	Sid.
FÖRORD	5
1. INLEDNING	6
2. TEORETISK BERÄKNING AV VÄRMEGENOMGÅNGSKOEFFICIENTEN HOS FÖNSTERGLASNINGAR MED OCH UTAN LÅGEMISSIONSFOLIER	11 13
2.1 Metod för beräkning av glasningens k-värde	13
2.2 Beräkningar av k-värden för glasningsdelen hos 2-glas- fönster som kompletterats mitt i spalten med en tredje skiva vars egenskaper varierats enligt olika alternativ	20 21
2.2.1 Beräkningsförutsättningar	21
2.2.2 Beräkningsresultat	24
3. EXPERIMENTELL k-VÄRDESBESTÄMNING I KLIMATSIMULATOR	27
3.1 Försöksuppställning och metodik för mätning och utvärdering	27 38
3.2 Undersökta fönsterkonstruktioner	38
3.3 Experimentellt bestämda k-värden	39
4. TEORETISK BERÄKNING AV ENERGIBESPARING ELLER FÖRLUSTER FRÅN FÖNSTER I BYGGNADER	41 41
4.1 Exempel 1. Ateljéfönster i en vindsvåning	41
4.2 Exempel 2. Fönster i småhus	47
4.2.1 Några specialstudier av generellt intresse i anslutning till småhusexemplet	56 56
4.3 Generella besparings-/förlust-diagram för några olika fönsterkonstruktioner mot olika väderstreck i till 20°C uppvärmda byggnader med olika fördelning av uppvärmningsbehovet över året	59 66
4.3.1 Slutsatser av parameterstudien	66
Appendix 1: FELKALKYL FÖR EXPERIMENTELL k-VÄRDESBESTÄMNING	69 69
2-glasfönster med plastfolie av lågmissionstyp	69
2-glasfönster utan plastfolie	71
SAMMANFATTNING	74
LITTERATUR	77



## FÖRORD

Föreliggande rapport avser ett projekt vid Institutionen för byggnadsteknik, KTH, finansierat av Statens råd för byggnadsforskning under kontrakt nr 820836-2.

De teoretiska och experimentella undersökningarna som redovisas här av möjligheterna till energibesparingar i nya och befintliga byggnader genom en komplettering av vanliga fönsterkonstruktioner med manövrerbara, genomsynliga, värmespeglade folier i fönsterspalter, utgör ett av flera projekt tillhörande en forskningsinriktning vid institutionen inom området *byggnadsfysik och energiteknik*.

Projektet har kommit till stånd efter ett gemensamt planeringsarbete tillsammans med projektledaren professor Ingemar Höglund och projektkoordinatören vid institutionen TeknL Göran Ottoson.

Jag önskar rikta ett varmt tack till Ingemar Höglund och Göran Ottoson för givande diskussioner och idéuppslag. Under Göran Ottosons förtjänstfulla ledning och genom utmärkta insatser av laboratorieingenjörerna Christer Hägglund och Rolf Sundqvist har de experimentella undersökningarna av fönster kunnat genomföras helt efter min planering.

Civ.ing. Carl Gösta Troedsson har mycket förtjänstfullt hjälpt till med programmeringsarbete och beräkningar.

Genom direktör Rune Jonssons, Kema Nord, vänliga tillmötesgående har en fönsterfolie av speciallevererad kvalitet – vid leveranstidpunkten enligt uppgift den bästa i världen i sitt slag – kunnat utnyttjas för de experimentella undersökningarna.

Till dessa nämnda och övriga medarbetare vid institutionen och andra som medverkat till detta arbete framför jag ett stort tack.

Stockholm i maj 1984

Valdis Girdo

## 1. INLEDNING

Fönster utgör i vårt klimat en av de stora energiförlustkällorna i byggnader. Vi har ett mycket omfattande bestånd 2-glasfönster i den befintliga bebyggelsen. Värmeomgångskoefficienten för dessa är  $k \approx 2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Införandet av 3-glasfönster i stället för 2-glas i ny bebyggelse och konvertering till 3-glas vid ombyggnad innebär relativt sett en ganska stor energibesparing. Detta är ändå inte en tillräckligt god lösning att hålla som långsiktigt mål för hela landets bebyggelse. Värmeomgångskoefficienten för ett 3-glasfönster är  $k \approx 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , dvs. fortfarande betydligt större än för välisolerade väggar. Ekonomiska kalkyler visar dessutom oftast att konvertering av befintliga fönster från 2-glas till 3-glas tillhör fortfarande inte de klart lönsamma åtgärderna. Beståndet av 2-glasfönster i bebyggelsen kommer således sannolikt att vara dominerande under lång tid.

Solinstrålningens positiva inverkan på årsvärmebalansen för vanliga fönster är i flertalet fall inte av sådan betydelse att denna inverkan kan kompensera för de höga k-värdena hos fönster i jämförelse med ytterväggar. Det är därför en angelägen uppgift att på något enkelt sätt kraftigt minska k-värdet hos fönster i befintliga byggnader och i nyproduktionen.

Bland de koncept som har föreslagits och på försök provats tidigare kan nämnas manövrerbara fönsterluckor på utsidan, rullgardiner på insidan eller i spalter mellan glas med i vissa fall inbyggda möjligheter att i utrullat läge expandera i volym och anta höga värmemotstånd, isolerande kulor av cellplast som kan blåsas in i eller ut ur en spalt mellan rutor i ett fönster, värmeisolerande persiennor osv. Tillämpningen av sådana koncept har hittills begränsat sig till en experimentell skala och till några mycket specialiserade nischer. Orsaken till den blygsamma utbredningen av sådana tekniska lösningar, trots många gånger mycket goda uppvisade energibesparingsresultat, måste många gånger sökas i för hög grad av teknisk komplexitet medförande i dagsläget för höga kostnader för produkterna eller i för låg tillförlitlighet, dvs. driftsäkerhet och hållbarhet eller i kombinationer av sådana faktorer.

I en vanlig fönsterspalt utgör långvågig strålning ca 70 % av det totala värmeflödet. Det långvågiga strålningsutbytet mellan ytorna i en spalt kan kraftigt minska om minst den ena av begränsningsytorna ges låg emissivitet. (De flesta icke-metalliska ytor, däribland vanligt fönsterglas, har en hög emissivitet i närheten av den absolut svarta kroppens emissivitet.)

Låg emissivitet på glasytor kan åstadkommas genom en speciell kemisk ytbehandling av glaset vid framställningen eller genom en senare täckning av glasytan med en genomsynlig folie med de önskade egenskaperna. I det senare fallet kan således även befintliga fönster kompletteras i efterhand.

Tekniken att ge glasytan nya egenskaper utvecklades ursprungligen för att erhålla solavskärmning och skydda bakomvarande rum mot överhettning. Denna tillämpning är sedan många år kommersiell i stor skala framför allt i länder med utpräglat soligt klimat.

Ytskikten på glas har i praktiken både *solavskärmande* dvs. kortvågsreflekterande & kortvågsabsorberande och *långvågsreflekterande & långvågsabsorberande* egenskaper. Genom olika ytsammansättning kan den ena eller andra eller båda funktionerna framhävas.

I början på 1980-talet har både glaskvaliteter och folier kommit ut på marknaden för vilka den långvågsreflekterande egenskapen är den primärt viktiga. Ännu har dock ingen sådan produkt presenterats som enbart har långvågsreflekterande egenskaper men obetydlig solavskärmning. Sådana lär dock vara under utveckling.

I vissa fall finns önskemål att reducera k-värdet hos ett 2-glasfönster utan att därmed påverka solavskärmningen. I andra fall kan en tillkommande solavskärmning vara välkommen. Det finns utrymme således för olika produktvarianter.

Frågan är hur långvågsreflekterande egenskaper på lämpligaste sätt kan föras in i befintliga och nya fönster. I detta sammanhang måste några följande fundamentala problem beaktas.

Ytbehandlingar av glas vid tillverkningen kan uppnå ett utseendemässigt närmast perfekt utförande i förhållande till det förväntade. Så perfekt kan man knappast förvänta sig att i fält belägga befintliga fönsterglas med folier. Om behandlingen utgör en permanent förändring av glasytan kommer konsumenten att ställa mycket höga

krav på utseendet. De flesta kommer sannolikt inte att acceptera ytor som medför permanent förhöjd solavskärmning och färgning (kan vara svag eller stark) eller strukturfel på ytan. Färdigt ytbelagt glas kan i befintlig bebyggelse endast utnyttjas om det gamla glaset byts ut men detta torde vara svårt att motivera ekonomiskt enbart med det lägre k-värdet. För sydligt orienterade fönster måste i kalkylen dessutom vägas in värdet av förlorad solvärme till följd av en förhöjd solavskärmning.

Problemen blir i stort sett lösta om man inför mitt i spalten en fristående, långvägsreflekterande folie som enkelt kan rullas ut eller in. Nästan alla gamla och nya fönster kan på ett enkelt vis kompletteras med en sådan manövrerbar folie.

En sådan teknik har följande positiva egenskaper:

- \* kan anslutas till befintliga fönster i fält lika enkelt som en persienn
- \* fullständig valfrihet råder mellan att ha eller inte ha skiktet i fönstret. Olika önskemål vid olika tillfällen kan tillgodoses. Om skiktet har solavskärmande egenskaper kan solvärmeinläckningen regleras efter behov och önskemål. Man kan t.ex. kraftigt reducera förlusteffekten och -energin vintertid, utnyttja maximalt med solvärme vår och höst och avskärma då solinläckningen under sommarhalvåret annars kan bli besvärande hög. Under hela tiden är fönstret genomsynligt
- \* lägre krav på utseende än vid permanent beläggning. Man kan tolerera viss färgning, vissa reflexfenomen och vissa strukturfel i fönstret vid utrullad folie eftersom man vet att man när som helst har möjlighet att rulla in folien om denna vid något speciellt tillfälle skulle upplevas som störande
- \* in- och utrullning av folien kan utan stora krav på passning i tiden manövreras så att fönstret i vissa lägen kan lämna ett betydande nyttigt nettotillskott värme över året till byggnaden, till skillnad mot vad ytterväggar/yttertak och oftast vanliga fönster kan. Det nyttiga energitillskottet beror dock inte bara på fönstret utan i hög grad även på byggnadens uppvärmningsbehov
- \* servicevänlig konstruktion. Konstruktionen är mycket tillförlitlig men skulle något inträffa kan reparation ske snabbt genom enkelt komponentutbyte. Tål normal rengöring. Rengöringsbehovet blir i allmänhet nästan försumbart om väl applicerade dammlister finns mellan fönsterbågarna.

För att exemplifiera representativa k-värden för fönster försedda med folier, har några k-värden beräknats i tabell 1.1. Jämförelsen har utsträckts till att även omfatta fönster med flera folier.



(Fönster med en folie behandlas närmare i andra avsnitt som följer, varvid k-värdena där skiljer sig något från de i tabell 1.1 givna till följd av något olika givna förutsättningar.)

Tabell 1.1. Exempel på beräknade k-värden hos glasdelen av 2-glasfönster i olika kombinationer med värmereflekterande genomsynliga folier. I beräkningarna har bl.a. förutsatts att inget konvektionsutbyte äger rum mellan spalter eller mellan någon spalt och omgivningen.

2-glasfönster	k W/m <sup>2</sup> K
40 mm spalt	2,64
40 mm spalt med en enkelreflekterande folie i mitten	1,38
40 mm spalt med en dubbelreflekterande folie i mitten	1,12
60 mm spalt med två enkelreflekterande folier bildande tre 20 mm spalter	0,89
60 mm spalt med en enkelreflekterande och en dubbelreflekterande folie bildande tre 20 mm spalter	0,76
80 mm spalt med två enkelreflekterande och en dubbelreflekterande folie bildande fyra 20 mm spalter	0,57

Utetemperatur:  $-5^{\circ}\text{C}$

Innetemperatur:  $20^{\circ}\text{C}$

Yttre övergångsmotstånd:  $0,07 \text{ m}^2\text{K/W}$

Inre övergångsmotstånd:  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$

Glasens och foliernas värmemotstånd är försumbara

Emissivitet för glasyta och icke-reflekterande folieyta: 0,85

Emissivitet för reflekterande folieyta: 0,26

Transmission av långvågig strålning genom glas och folie antagen till 0

Det är kring denna teknik som det här redovisade projektet har utformats. Målsättningen har varit att genom teoretiska och experimentella studier undersöka möjligheterna till energibesparing i byggnader vars fönster utrustats med manövrerbara folier av det beskrivna slaget.



Den följande beskrivningen av detta genomförda projekt börjar med en teoretisk behandling och bestämning av k-värden hos fönster (glasningsdelen). Därefter följer en redogörelse för några experimentella k-värdesbestämningar för en i ett 2-glasfönster applicerad prototypkonstruktion som byggts efter idéer och anvisningar av Valdis Girdo. Experimenten har genomförts med en "Guarded hot box" i en klimatsimulator på institutionens laboratorium. Slutligen visas teoretiska beräkningar med institutionens datorprogram AUTSOL av hur mycket skilda fönster påverkar olika byggnaders värmebehov. En genomförd parameterstudie utgör underlag för generella diagram över detta. Beräkningarna har begränsats till att gälla klimatdata för enbart Stockholm. I ett par följande anslutande projekt ingår bl.a. att genomföra beräkningar med klimatdata från olika delar av landet.

## 2. TEORETISK BERÄKNING AV VÄRMEGENOMGÅNGSKOEFFICIENTEN HOS FÖNSTERGLASNINGAR MED OCH UTAN LAGEMISSIIONSFOLIER

Med ett  $k$ -värde för en fönsterkonstruktion vid givna lufttemperaturer på ömse sidor av fönstret kan man beskriva ett värmeflöde genom fönstret vid stationära förhållanden enligt

$$P = k \cdot (\theta_i - \theta_u) \cdot A \quad (1)$$

där  $P$  = värmeflödet genom fönstret,  $W$   
 $k$  = fönstrets värmegenomgångskoefficient,  $W/m^2K$   
 $\theta_i$  = lufttemperaturen inne,  $^{\circ}C$   
 $\theta_u$  = lufttemperaturen ute,  $^{\circ}C$   
 $A$  = fönsterarean,  $m^2$ .

Denna modell av värmeflödet är synnerligen enkel och ofta väl lämpad för ingenjörsmässigt projekteringsarbete. I sådant arbete är vanligtvis  $k$ -värdet givet för en viss fönsterkonstruktion. Bakom ett sådant  $k$ -värde döljer sig flera antaganden och approximationer som man vanligtvis inte reflekterar över vid tillämpningen men som man däremot måste ta ställning till då man önskar *bestämma*  $k$ -värdet genom antingen teoretiska beräkningar eller experimentella undersökningar. I verkligheten påverkas värmeflödet genom fönstret av en rad olika faktorer i fönstrets omgivning utöver nämnda temperaturer på ett sätt som inte låter sig beskrivas stringent genom  $k$ -värdet.

En sådan faktor som solinstrålning mot fönstret kan man ta hänsyn till genom att komplettera ekv. (1) med separata termer för inverkan av solinstrålningen samt eventuellt modifiera  $k$ -värdet något.

En annan faktor vars inverkan inte kan behandlas generellt på likartat enkla vis är värmeutbytet längs fönsterkonstruktionens ränder i gränsen mot omgivande konstruktionsdelar (väggar och tak). Ekvation (1) uttrycker strängt taget endast att det existerar ett värme-flöde  $P$  vinkelrätt genom ett betraktat plan inom begränsningsytan  $A$  av planet och att storleken av detta värme-flöde är proportionell mot skillnaden mellan lufttemperaturerna inne och ute. Man associerar till arean  $A$  vanligen en väldefinierad konstruktionsdel, t.ex. ett helt fönster eller ett glasparti, och tänker sig därvid arean vara

konstant densamma oberoende av vilket parallellplan vinkelrätt mot värmeflödet som man betraktar. Det naturligaste är kanske att välja planet i anslutning till innerytan eller ytterytan. Under det enkla antagandet att fönsterkonstruktionen är fullständigt aviserad från angränsande konstruktioner vid ränderna (s.k. adiabatiskt randvillkor), är värmeflödet konstant detsamma oberoende av genom vilket parallellplan man betraktar värmeflödet. Samma antagande kan samtidigt göras för mot fönstret angränsande konstruktionsdelar. Sådana förhållanden motsvarar närmast de antaganden under vilka ekv. (1) härletts teoretiskt att gälla för endimensionell ledning av värme genom en konstruktion. Ekv. (1) har därefter av praktiska skäl även lånats till fönsterkonstruktioner fastän förutsättningarna vid fönster avviker i väsentliga avseenden från de som härledningen bygger på.

Om man därefter släpper antagandet om adiabatiska ränder och tänker sig i stället ett värmeutbyte vid ränderna, spelar det genast en roll genom vilket parallellplan man betraktar värmeflödet genom var och en av de anslutande konstruktionerna. Resultatet av värmeutbytet vid ränderna kan bli att transmissionsförlusterna totalt ökar från rummet och man har att räkna med en successivt ökad överföring av värmeflödet från den ena till den andra av två angränsande konstruktioner allteftersom betraktelseplanet för värmeflödet förflyttas från konstruktionernas innerytor till deras ytterytor. Till denna ökning och omfördelning av transmissionsförlusterna kan man beräkningsmässigt ta en viss hänsyn genom att modifiera  $k$ -värdet något i förhållande till det  $k$ -värde som antas givet vid adiabatiska ränder. I vilken grad konstruktionernas  $k$ -värden på ömse sidor om en rand bör korrigeras beror, som framgår av det sagda, av genom vilket plan man väljer att betrakta värmeflödet. Frågan saknar kanske betydelse om man betraktar värmeflödet genom alla konstruktioner samtidigt men om man väljer ut att teoretiskt eller experimentellt undersöka  $k$ -värdet för t.ex. enbart fönstret kan frågan ha betydelse. Analogt är det väsentligt vid användning av ett givet  $k$ -värde vid en tillämpad beräkning att veta vad detta  $k$ -värde innefattar. Det som sagts om fönster och omgivande konstruktioner passar även in på fönsterkonstruktionens olika delar karm, båge och glasning.

Det måste i detta sammanhang på en gång påpekas att ovanstående diskussion har renodlats från enskilda detaljer för att framhäva

den allmängiltiga principiella funktionen. I tillämpningen på systemet vägg (parti närmast fönstret) - karm - båge - glasning förekommer så komplicerade geometriska former, att värmeflödet från rummet och ut genom detta system blir synnerligen komplicerat. Detta stör dock på intet vis den principiellt förda diskussionen.

I "Kommentarer till svensk byggnorm, Energihushållning m.m. 1977:3" anges under §33:248K en algoritm för att beräkna ett ekvivalent  $k$ -värde för karm och båge av trä. Utöver denna korrektion brukar man inte tillföra  $k$ -värdet hos vare sig omgivande vägg/tak eller inefattad glasning någon ytterligare korrektion. Vid teoretisk eller experimentell bestämning av en glasnings  $k$ -värde brukar man inte ta någon särskild hänsyn till inverkan från bågen utöver vad som följer av att studera värmeflödet genom en sluten spalt med ändlig utsträckning i plan, och så har även gjorts i föreliggande arbete. Fördelen med detta är att  $k$ -värdet för glasningen för de flesta praktiskt förekommande fall då är oberoende av glasningens storlek och kan användas för olika storlekar på fönster.

För speciella fall kan noggranna datorberäkningar av värmeflöden genom komplicerade konstruktioner genomföras med någon numerisk beräkningsmodell, men detta ligger utanför ämnet att arbeta med  $k$ -värden för fönster, dvs. bestämma och i beräkningar tillämpa  $k$ -värden.

Den förda diskussionen får tjäna som en inledande orientering om hur i allmänhet  $k$ -värden för fönsterglasningar, bl.a. som de är behandlade i det följande, ansluter till det större konstruktiva sammanhanget.

## 2.1 Metod för beräkning av glasningens $k$ -värde

En fönsterglasning består av ett antal parallella, för ljus transparenta, skivor med spalter emellan. Skivorna består vanligen av glas eller plast i tjocklekar från några millimeter ned till bråkdelar av millimeter för folier. Spalternas bredder brukar variera från någon centimeter till en halv decimeter, ibland ännu större. Glasningens utsträckning i plan kan variera inom vida gränser men denna variation påverkar värmeflödet per ytenhet genom glasningen i så ringa grad vid i praktiken förekommande glasningstorlekar, att man vanligtvis anser glasningens storlek vara betydelselös för  $k$ -värdesberäkningen och utesluter därför denna parameter ur beräkningarna.

Energiflödet genom en glasning består dels av strålning inom solspektrum dels av värmefflöde. Av den solstrålning som når glasningen transmittteras en del direkt in i rummet, en del reflekteras tillbaka ut och en del absorberas i glasningens skivor. (Man kan i normala fall helt bortse från absorption hos de gaser som utfyller en spalt.) Genom absorptionen får glasningens beståndsdelar förhöjda temperaturer jämfört med mörkerförhållanden vilket medför att en del av den absorberade energin tillförs sekundärt till rummet.

Värmefflöde sker genom ledning och värmestrålning i glasningens skivor och genom värmestrålning, ledning och konvektion i spalter och vid glasningens yttre begränsningsytor. Glasningens skivor har så litet värmeledningsmotstånd att man i allmänhet kan anta samma temperatur rakt igenom hela skivan, dvs. bl.a. är då yttemperaturerna på skivans ömse sidor lika.

Mekanismerna för värmeöverföring genom strålning är emission, absorption, reflexion och transmission. Vid en vanlig glasning, bestående av glasskivor och en eller flera luftspalter, kan man anse att strålningsutbytet sker isolerat inom varje enskild luftspalt. Man bortser då helt från den lilla transmission genom glaset som faktiskt finns. Den strålning som emitteras från var och en av spaltens begränsningsytor absorberas fördelad på båda spalptytorna, delvis efter reflexioner mot ytorna. (Något ofysikalisk beskrivs förmågan till emission, absorption och reflexion som rena ytegenskaper men detta förenklar beskrivningen och är i detta sammanhang helt tillfyllest.) Transmissionsförmågan i spalten antas vara 100 % dvs. ingen strålning absorberas av mediet som utfyller spalten (vanligen luft). Det förekommer dock hermetiskt slutna glasningar med sådana gasfyllnader i spalten som till en del absorberar och emitterar strålning.

För beräkning av värmefflödet på grund av strålning genom en spalt, som har strålningsutbytet isolerat inom spalten och innehåller en icke-absorberande gas, finns den etablerade algoritmen

$$p_s = \sigma \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2)$$

där  $p_s$  = överförd effekt genom strålning från yta 1 till yta 2 i spalten,  $W/m^2$



$T_1$  = temperaturen på yta 1, K

$T_2$  = temperaturen på yta 2, K

$\epsilon_1$  = emissivitet för yta 1

$\epsilon_2$  = emissivitet för yta 2

$\sigma$  = Stefan-Boltzmanns konstant,  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

I det fall att man behöver ta hänsyn till strålningstransmission genom skivorna, vilket är framför allt aktuellt då skivor av plastmaterial förekommer, bör inte ekv. (2) användas okritiskt. Det har visat sig att redan några få procents transmission hos en skiva kan påverka värmeflödet märkbart jämfört med om transmissionen är noll. Transmissionen medför att man måste studera strålningsförhållandena i hela glasningen på ett samlat vis i motsats till vad man gör då ekv. (2) utnyttjas. Beräkningarna blir med ens mycket mera invecklade. För glasningar med några få skivor kan beräkningarna genomföras så att varje emitterad kvantitet följs i en tänkt strålgång och uppdelas i ständigt allt flera och mindre delar absorberad, reflekterad och transmitterad strålning inom hela glasningen. Trots att strålningskvantiteterna bildar termer i oändliga geometriska serier, vars summor kan enkelt tecknas, förblir bilden av samspelet mellan spalterna vid två eller flera spalter komplicerad.

Det har presenterats en klart bättre beräkningsmetod med vars hjälp hela strålningsbalansen för alla glasningens skivor i valfritt antal och individuellt olika utföranden löses med ett linjärt ekvations-system (matrisformalism) (Rubin, 1982). I praktisk tillämpning av denna metod (datorprogram) arbetar man med hela energibalanser, dvs. förutom långvågig strålning ingår värmetransport genom ledning och konvektion och eventuellt inverkan av solstrålning. Mycket kortfattat kan metoden beskrivas så att för varje yta uppställs formellt summan av de energikvantiteter som lämnar ytan med riktning ut mot spalten (dvs. beträffande strålning: som emitteras, reflekteras eller transmitteras). Summan innehåller termer med bl.a. närliggande ytors motsvarande summor som faktorer. Alla dessa summor är till en början obekanta men kan lösas ut från det ekvationssystem som bildas då alla ytors summaekvationer sammanställs.

Strålningsutbytet med omgivningen vid glasningens yttre begränsningsytor är mycket komplicerat. Strålning från rummets ytor mot glasningen består dels av emitterad strålning från varje ytelement uti-

från yttemperaturen, dels av reflekterad strålning från andra ytelements emissioner. I den yttre miljön avges strålning mot glasningen från kroppar i närmiljön (mark, byggnader, vegetation etc.) och från atmosfären. För beräkningar av energibalanser kan man i de flesta fall anta att glasningen påverkar obetydligt sin omgivning i strålningsavseende dvs. från utsiktspunkter i glasningens omgivning upptar glasningen endast en liten eller obetydlig rymdvinkel. Då kan strålningen från omgivningen mot glasningen beräknas som direkt emitterad strålning vid omgivningens temperatur och med emissiviteten 1. På rumssidan kan omgivningens temperatur sättas lika med lufttemperaturen inne. På utsidan bör den infallande strålningen uppdelas på strålning från kroppar i närmiljön, varvid temperaturen sätts lika med uteluftens temperatur, och strålning från atmosfären, varvid den s.k. effektiva motstrålningstemperaturen hos atmosfären kan användas. Vid helt klar himmel kan denna temperatur ligga i storleksordningen 20 K under utelufttemperaturen medan vid mulen himmel är skillnaden betydligt mindre. Andelarna strålning från närmiljön resp. från atmosfären viktas i förhållande till rymdvinklarna betraktade från glasningen. Om en glasning ingår i ett horisontellt fritt beläget tak, får strålningen från atmosfären vikten 1. För en vertikal fritt belägen glasning får strålningen från närmiljön och från atmosfären båda vikten 0,5.

I praktiken förenklar man ofta beräkningarna kraftigt genom att räkna med de yttre och inre värmeövergångsmotstånden,  $m_u$ ,  $m_i$ , i vilka tagits viss hänsyn till strålningen.

Den principiella modellen för beskrivning av långvågig strålning i en glasning kan anses som mycket väldefinierad och allmänt vedertagen. Man kan dock som nämnts diskutera lösningsmetoder och noggrannhetskrav på givna materialdata.

Något annorlunda förhåller det sig med modeller för beskrivning av konvektion och ledning i spalter. Den fysikaliska bakgrunden till fenomenet konvektion/ledning i en spalt är så invecklad att många olika sammanfattande algoritmer för detta har genom åren presenterats i litteraturen. I allmänhet antar man att den spalt man betraktar kan anses vara sluten och oventilerad. Måste man ta hänsyn till ventilation, t.ex. genom otätheter, tillstöter härigenom ytterligare en svårighet. För ordningens skull bör här också nämnas det s.k. frånluftsfönstret. Genom en sådan fönsterkonstruktions luftspalt



låter man medvetet en luftström passera så att fönstret utgör en del av byggnadens installationssystem. För denna speciella konstruktion har särskilda beräkningsmodeller utvecklats som inte behandlas här (Södergren & Boström, 1973).

En utmärkt sammanställning över i litteraturen presenterade algoritmer för värmetransport i form av konvektion och ledning genom slutna, oventilerade, vertikala spalter har gjorts av Jonsson (1981). Av de tio olika algoritmerna som sammanställts betecknas en som rent teoretiskt härledd, sju som härledda från experimentella undersökningar och två som härledda från beräkningsresultat baserade på numeriska simuleringar enligt någon modell. En jämförelse av enligt de olika algoritmerna beräknade värden på Nu (Nusselts tal) för olika värden på Ra (Rayleighs tal) ger en bild av hur mycket beräknade värmefflöden i form av konvektion och ledning skiljer, eftersom värmefflödet beräknas

$$P_{k\&l} = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$Nu = f(Ra) \quad (4)$$

De olika beräkningsalgoritmerna har Ra som gemensam ingångsvariabel

$$Ra = Gr \cdot \frac{v}{a} \quad (5)$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_2) \cdot d^3}{v^2} \quad (7)$$

$P_{k\&l}$  = värmefflöde i form av konvektion och ledning,  $W/m^2$

$\lambda$  = gasens värmeledningsförmåga,  $W/m \cdot K$   
 {för luft:  $\lambda_{luft} = 2,72 \cdot 10^{-3} + 7,9 \cdot 10^{-5} \cdot (T_1 + T_2)/2$ }

$d$  = spalttjockleken,  $m$

$T_1$  = ena spaltytans temperatur, det högre värdet,  $K$

$T_2$  = andra spaltytans temperatur, det lägre värdet,  $K$

$Gr$  = Grashofs tal

$a$  = gasens värmediffusivitet,  $m^2/s$

$c$  = gasens specifika värmekapacitet, J/kg K

$\gamma$  = gasens densitet, kg/m<sup>3</sup>

$g$  = tyngdaccelerationen,  $\approx 9,81$  m/s<sup>2</sup>

$\beta$  = gasens volymsutvidgningskoefficient, K<sup>-1</sup>

$\nu$  = gasens kinematiska viskositet, m<sup>2</sup>/s

$$\left\{ \text{för luft: } \nu_{\text{luft}} = 654 \cdot \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right)^{1,768} \cdot 10^{-12} \right\}.$$

I en figur har Jonsson visat att beräknade Nu-värden med normala antaganden om fönstergeometrin enligt samtliga algoritmer sammantagna, ligger inom ett intervall vars undre och övre gränser förhåller sig som 1:2.

En ofta återopad algoritm är den som De Graaf & van der Held (1952) utarbetat utifrån experimentella undersökningar. För vanlig luft som gas lyder den

$$\text{Nu} = \begin{cases} 1 & \text{Gr} < 7 \cdot 10^3 & (8a) \\ 0,0384 \cdot \text{Gr}^{0,37} & 1 \cdot 10^4 < \text{Gr} < 8 \cdot 10^4 & (8b) \\ 0,0317 \cdot \text{Gr}^{0,37} & \text{Gr} > 2 \cdot 10^5 & (8d) \end{cases}$$

Diskontinuiteterna har Rubin (1982) efter närmare studium föreslagit utfyllas så att (8b) gäller ned till  $\text{Gr} = 7 \cdot 10^3$ . I området mellan (8b) och (8d) föreslås

$$\text{Nu} = 0,41 \cdot \text{Gr}^{0,16} \quad 8 \cdot 10^4 < \text{Gr} < 2 \cdot 10^5 \quad (8c)$$

Dessa ekvationer kan även skrivas generellare att gälla en valfri gas

$$\text{Nu} = \begin{cases} 1 & \text{Ra} < 5 \cdot 10^3 & (9a) \\ 0,0429 \cdot \text{Ra}^{0,37} & 5 \cdot 10^3 < \text{Ra} < 6 \cdot 10^4 & (9b) \\ 0,43 \cdot \text{Ra}^{0,16} & 6 \cdot 10^4 < \text{Ra} < 1,5 \cdot 10^5 & (9c) \\ 0,0354 \cdot \text{Ra}^{0,37} & \text{Ra} > 1,5 \cdot 10^5 & (9d) \end{cases}$$

Det visar sig att Nu-värden enligt algoritmen av De Graaf & van der Held ligger ungefär mitt i det nämnda jämförelseintervallet, vilket kan tolkas så att algoritmen kan ge ungefär riktigt resultat eller att felet inte kan bli allt för stora. Det ligger utanför ämnet att här genomföra en mera inträngande jämförelse. För de fortsatta beräkningarna har här valts den ovanstående algoritmen.

För spalter lutande mot horisontalplanet finns en algoritm, som bl.a. i handböcker om solenergitillämpningar (t.ex. Duffie & Beckman, 1980; Kreider & Kreith, 1981) brukar framhållas som den f.n. bästa, nämligen följande av Hollands et al. (1976)

$$\begin{aligned} \text{Nu} = & 1 + 1,44 \cdot \max\left(0, 1 - \frac{1708}{\text{Ra} \cdot \cos\beta}\right) \cdot \left\{1 - \frac{(\sin 1,8\beta)^{1,6} \cdot 1708}{\text{Ra} \cdot \cos\beta}\right\} + \\ & + \max\left[0, \left\{\left(\frac{\text{Ra} \cdot \cos\beta}{5830}\right)^{1/3} - 1\right\}\right] \\ & 0 < \beta < 75^\circ \end{aligned} \quad (10)$$

Hur Nu beräknas bäst för lutningar mellan  $75^\circ$  och  $90^\circ$  (vertikal yta) synes det råda något mera delade uppfattningar om i litteraturen. Av en diskussion i Duffie & Beckman (1980) kan man för detta intervall dra slutsatsen att antingen utnyttja algoritmen av Hollands et al. för  $75^\circ$  eller algoritmen av De Graaf & van der Held för vertikal spalt.

Det totala värmeflödet genom en spalt utgör summan värmetransporter i form av strålning och i form av konvektion/ledning.

Vid glasningens yttre begränsningsytor sker det konvektiva värmeutbytet i form av termisk konvektion, dvs. en luftrörelse av att varmare luft stiger och kallare sjunker, och i form av påtvingad konvektion, dvs. en luftströmning som underhålls av yttre krafter. Vanligtvis kan man anta att inomhus föreligger en termisk konvektion medan utomhus den påtvingade dominerar vid vindpåverkan.

I praktiken förenklar man ofta beräkningarna analogt med behandlingen av den långvågiga strålningen vid de yttre begränsningsytorna genom att räkna med de yttre och inre värmeövergångsmotstånd, genom vilka hänsyn tas till en sammantagen påverkan av strålning och konvektion.

En glasnings k-värde är definitionsmässigt

$$k = p / (\theta_i - \theta_u) \quad (11)$$

där  $p$  = värmeflödet genom glasningen vid stationära förhållanden,  $\text{W/m}^2$

$\theta_i, \theta_u$  = lufttemperaturen inne resp. ute,  $^\circ\text{C}$

Här ska påminnas om det tidigare diskuterade antagandet om att värme-  
 meflödet genom glasningen inte påverkas av glasningens ränder.

Definitionen ekv. (11) gäller generellt både vid teoretiska beräk-  
 ningar och vid experimentella bestämningar av  $k$ -värdet.

Vid beräkningar måste man bestämma skivornas temperaturer för att  
 kunna beräkna värmeflödet. Villkoret stationära förhållanden medför  
 att värmeflödet ska vara lika genom alla parallellplan vinkelräta  
 mot flödet. Baserat på detta förhållande kan temperaturerna och flö-  
 det beräknas efter ett antal iterationer. I praktiken används i be-  
 räkningarna ofta begreppet värmemotstånd i glasningens spalter

$$m = (\theta_1 - \theta_2) / p \quad (12)$$

där  $m$  = spaltens värmemotstånd,  $m^2 K/W$

$\theta_1, \theta_2$  = spaltyornas resp. temperaturer,  $^{\circ}C$ .

Värmemotståndet enl. ekv. (12) kan alltid användas som hjälpstorhet  
 under beräkningar men att använda det som beskrivning av en spalts  
 isolerade egenskaper är inte fysikaliskt riktigt. Givna värden på  
 värmemotstånd för spalter (t.ex. i SBN 1980, §33:245) är helt riktiga  
 endast om transmissionen av strålning genom spaltväggarna är noll.

## 2.2 Beräkningar av $k$ -värden för glasningsdelen hos 2-glasfönster som kompletterats mitt i spalten med en tredje skiva vars egenskaper varierats enligt olika alternativ

Dessa beräkningar av  $k$ -värden har de två syftena att dels jämföra  
 hur olika egenskaper hos en tredje skiva insatt mitt i ett ursprung-  
 ligt 2-glasfönsters spalt påverkar glasningens  $k$ -värde, dels jäm-  
 föra hur beräknade  $k$ -värden överensstämmer med de experimentellt  
 bestämda som redovisas i ett följande avsnitt.

Vid experimentella undersökningar är det nästan omöjligt att under  
 kontrollerade former simulera givna värmeövergångsmotstånd eller ens  
 bestämma dess värden med någon säkerhet. Därför bör som regel den  
 experimentella undersökningen syfta till att bestämma glasningens  
 värmemotstånd betraktat mellan glasningens yttre begränsningsytor.  
 Ett  $k$ -värde kan därefter uträknas efter att de givna schablonvärdena  
 på värmeövergångsmotstånden (enl. SBN 1980,  $m_i + m_u = 0,20 m^2 K/W$ ) adde-

rats till glasningens värmemotstånd. Jämförande beräkningar bör således utföras med de yttre begränsningsytornas uppmätta temperaturer som givna randvillkor. Trots detta kommer även lufttemperaturerna in i beräkningarna, men endast i ringa grad med uppgift att definiera långvågig strålning mot glasningen, av vilken endast den mycket lilla del som transmitteras genom glaset är av intresse för beräkningarna. Även de teoretiskt beräknade  $k$ -värdena uträknas efter att de givna schablonvärdena på värmeövergångsmotstånden adderats till glasningens i detta fall teoretiskt beräknade värmemotstånd. Att samtidigt använda givna lufttemperaturer och värmeövergångsmotstånd är i princip något inkonsistent men detta saknar här praktisk betydelse. Den principiella svårigheten sammanhänger med att definitionerna på värmeövergångsmotstånd och glasningens värmemotstånd kan inte tillämpas stringent i det fall att glasningens yttre skivor transmitterar värmestrålning. Problemet skulle kunna lösas vid behov, om de givna schablonvärdena på värmeövergångsmotstånden kompletterades med uppgifter om de temperaturförhållanden och vindhastigheter som de givna värmeövergångsmotstånden baserats på.

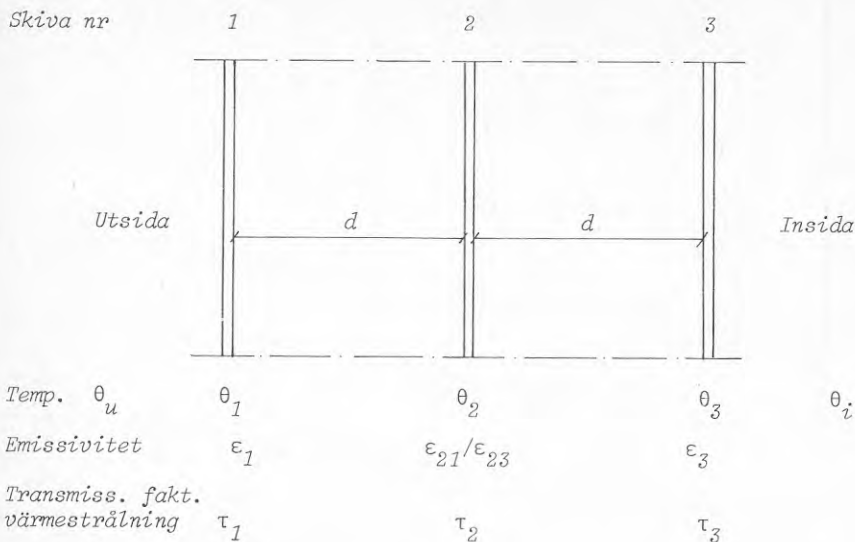
På ovan beskrivna vis har för  $k$ -värdesberäkningarna två olika uppsättningar temperaturvärden antagits. Den första uppsättningen avser att efterlikna de förhållanden under vilka de experimentella undersökningarna genomförts i klimatsimulatoren. Av försökstekniska skäl ligger temperaturerna i detta fall inom ett relativt begränsat intervall. Den andra uppsättningen innehåller temperaturer inom ett bredare intervall och återspeglar en typisk vintersituation i Stockholm.

### 2.2.1 Beräkningsförutsättningar

Beskrivningen av beräkningsförutsättningarna refererar till figur 2.1.

#### Temperaturförutsättningar:

	$\theta_u$	$\theta_1$	$\theta_3$	$\theta_i$	$^{\circ}\text{C}$
1.	5,3	6,7	15,2	18,6	
2.	-8,2	-5,2	9,8	19,8	



Figur 2.1. Varierade parametrar vid beräkningen av  $k$ -värden för en glasning ursprungligen bestående av de två glasskivorna 1 och 3, kompletterad med skiva 2.

Emissiviteter, hemisfäriska:

$\epsilon_1$	$\epsilon_{21}$	$\epsilon_{23}$	$\epsilon_3$
0,88	olika kombinationer		0,88
	0,16		
	0,26		
	0,35		
	0,63		
	0,88		

Emissiviteten hos vanligt glas är inte så självklart given i litteraturen som man kunde förvänta sig för detta vanliga material. Som framgår av nedan sammanställda värden på den hemisfäriska emissiviteten hos vanligt glas hämtade från 10 utvalda litteraturkällor, varierar uppgifterna betänksamt mycket, se tabell 2.1. Det förefaller osannolikt att så stora variationer skulle förekomma bland vanliga glaskvaliteter. Man kan därför förmoda att vissa litteraturreferenser som vidarebefordrat ett ursprungligt källmaterial har genom olika misstolkningar och missuppfattningar infört felaktiga värden. Tyvärr har det inte varit möjligt att genomföra en egen spektrometrisk mätning på det glas som ingick i den experimentellt



Tabell 2.1. Emissiviteten (hemisfäriska) hos vanligt glas enligt 10 utvalda litteraturkällor.

Vilket värde på totala hemisfäriska emissiviteten $\epsilon_h$ gäller för vanligt fönsterglas? Uppgifter från olika litteraturkällor	
Adamson, B, 1965, Byggnadsfysik. Inst. för byggnadskonstruktionslära, LTH, Lund. Kompendium, s. 40	$\epsilon_h = 0,93-0,94$
ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1981. Atlanta Ga, s. 2.8	$\epsilon_h \approx 0,93 \cdot 0,90 = 0,84$
s. 39.3	$\epsilon_h = 0,94$
Billington, N S, 1967, Building Physics: Heat Pergamon Press, s. 20	$\epsilon_h = 0,90-0,95$
Duffie, J A & Beckman, W A, 1980, Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons. New York. s. 204	$\epsilon_h = 0,88$
Granum, H & Aschehoug, Ø, 1969, Byggningsfysikk. Universitetsforlaget. Oslo. s. 62	$\epsilon_h = 0,94$
Isfält, E, 1974, Optiska och termiska egenskaper hos fönster och solskydd. Inst. för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH. Stockholm. s. 55	$\epsilon_h = 0,86$
Jonsson, B, 1981, Värmetransport genom fönster. Inst. för byggnadskonstruktionslära, LTH. Lund. Rapport BKL 1981:5, s.4	$\epsilon_h = 0,85$
Kondratyev, K Ya, 1969, Radiation in the Atmosphere. Academic Press. New York. s. 40	$\epsilon_h = 0,935$
Svensden, S, 1981, Solfangeres effektivitet mält og beregnet. Laboratoriet for varmeisolering, DTH. Lyngby. Meddelelse nr 109, s. 29	$\epsilon_h = 0,88$
VVS-handboken, 1974, Tabeller och diagram. Förlags AB VVS. Stockholm. s. 4:29	$\epsilon_h = 0,876$

undersökta glasningen. Efter konsultationer med institutet för optisk forskning, KTH, föreslås 0,88 som ett lämpligt värde baserat på institutets egna tidigare undersökningar av bl.a. "lime glas" (innehåll 10-20 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 70-80 %  $\text{SiO}_2$ , 5-10 %  $\text{CaO}$ ), som är en vanligt förekommande glaskvalitet.

De antagna emissivitetsvärdena för mittskivan (skiva 2) beskriver följande utföranden:

0,16 ett vanligt förekommande värde för ett lågemissionsskikt utan skyddsskikt, användes främst i hermetiskt slutet glasning



- 0,26 uppgivet värde av fabrikanter för ena sidan av den folie som använts i de experimentella undersökningarna
- 0,35, 0,63 från en spektrometrisk undersökning bestämda värden för de två sidorna hos den folie som använts i de experimentella undersökningarna. En sådan bestämning är dock förenad med stora osäkerheter av olika orsaker. En annan bestämning med ett annat instrument gav värdena 0,29, 0,66
- 0,88 skivan antas bestå av vanligt glas.

Transmissionsfaktorer för värmestrålning:

$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$
— olik kombinationer —		
0,00	0,00	0,00
0,02	0,02	0,02
	0,04	

Värdet 0,00 för samtliga transmissionsfaktorer har medtagits som alternativ för att i jämförelser motsvara vad som vanligen antas vid beräkningar av fönsterspaltens värmemotstånd.

Värdet 0,02 utgör ett normalt värde för vanligt glas.

Värdet 0,04 har bestämts från den tidigare omnämnda spektrometriska undersökningen för en polyesterfolie med lågemissionsskikt.

Spaltbredder hos glasningen:

d: 0,0150-0,0300 m

Glasningen i den experimentella undersökningen hade spaltbredden mellan glaset (ytterskivorna)  $2d \approx 0,035$  m. Vid inplacerad folie kan man anse att foliens läge var mitt i denna spalt, vilket närmast motsvaras av beräkningsalternativ med  $d = 0,0175$  m.

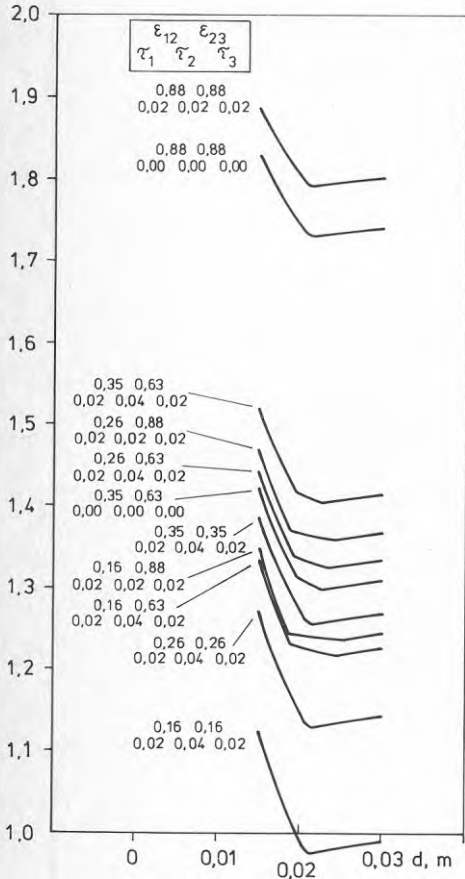
2.2.2 Beräkningsresultat

Beräknade k-värden för de genomgångna förutsättningarna finns återgivna i figur 2.2. Såväl förutsättningarna som resultaten varierar inom tämligen vida gränser. Några intressanta detaljer kan belysas närmare.

- \* Om den långvågiga transmissionen försummas, blir det beräknade k-värdet ca  $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  för lågt då mittskivan är en vanlig glasskiva och ca  $0,1 \text{ W/m}^2$  då mittskivan är en plastfolie av polyester med lågmissionsskikt.
- \* Det alternativ, som beskriver en glasning innehållande den plastfolie med enkelsidigt lågmissionsskikt som använts i de experimentella undersökningarna, ger resultatet  $k = 1,4-1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Speciellt för de temperaturförutsättningar och den spaltbredd ( $\sim 0,0175 \text{ m}$ ) som förekom vid de experimentella undersökningarna av k-värdet med Guarded hot box i klimatsimulator, har k-värdet beräknats till  $1,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- \* k-värdets variation med spaltbredden är i vissa fall större i andra fall mindre beroende av i vilken grad kombinationer av temperaturförhållanden och spaltbredder påverkar mekanismen konvektion/ledning.
- \* Som en intressant jämförelse kan nämnas att för en glasning av enbart två vanliga glasskivor har beräknats k-värdet  $2,66 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $2,59 \text{ W/m}^2\text{K}$  om den långvågiga transmissionen försummas) för det smalare temperaturområdet, och k-värdet  $2,73 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $2,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) för det bredare temperaturområdet.

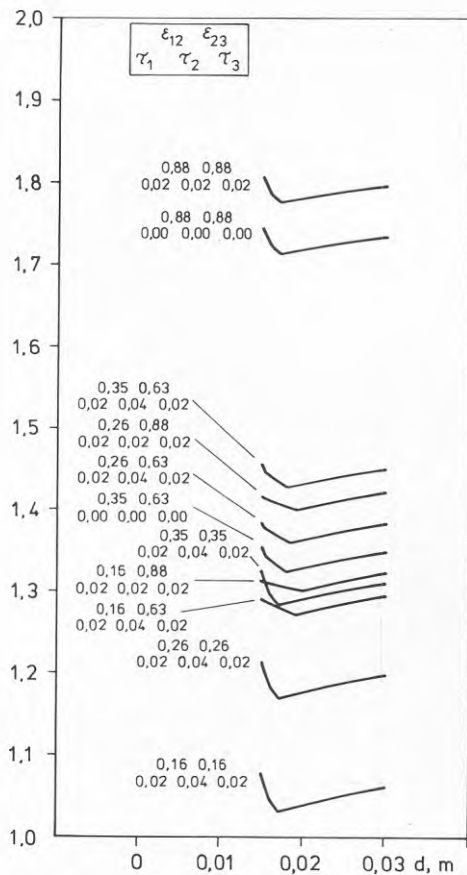
Temp. förutsätt. 1

$$\begin{pmatrix} \theta_u & \theta_1 & \theta_3 & \theta_i \\ 5,3 & 6,7 & 15,2 & 18,6 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ\text{C}$$

k-värde  
 $\frac{W}{m^2K}$ 

Temp. förutsätt. 2

$$\begin{pmatrix} \theta_u & \theta_1 & \theta_3 & \theta_i \\ -8,2 & -5,2 & 9,8 & 19,8 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ\text{C}$$

k-värde  
 $\frac{W}{m^2K}$ 

Figur 2.2. Beräknade  $k$ -värden för olika glasningsalternativ bestående av två glasskivor och något slag av tredje skiva (glasskiva eller plastfolie) mitt emellan de två glasskivorna. Glasningsalternativen beskrivs genom emissiviteterna  $\epsilon_{12}$  och  $\epsilon_{23}$  och genom transmissionfaktorerna för långvågig strålning  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  och  $\tau_3$ . Faktorerna förklaras i figur 2.1. Två temperaturförutsättningar antas, ett smalare och ett bredare temperaturområde som randvillkor, förklaringar, se figur 2.1.  $k$ -värdena har beräknats för olika spaltbredder,  $d$ . (Varje kurva är baserad på 100 beräknade punkter.)

### 3. EXPERIMENTELL K-VÄRDESBESTÄMNING I KLIMATSIMULATOR

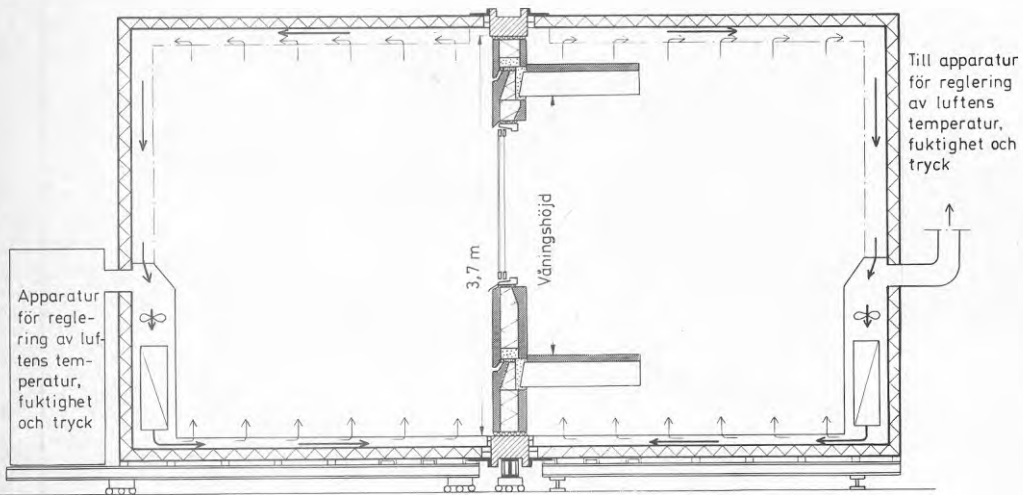
Ett antal experimentella bestämningar av k-värden har genomförts för några utvalda fönsterkonstruktioner och glasningar. Företrädesvis har undersökts ett ursprungligt 2-glasfönster som i vissa alternativ var kompletterat med en mellan glasen fristående plastfolie med lågemissionsegenskaper. Några försök har dessutom genomförts med ett ursprungligt 3-glasfönster, som även detta i vissa alternativ var kompletterat med en fristående plastfolie.

#### 3.1 Försöksupställning och metodik för mätning och utvärdering

I början av det föregående kapitel 2 har diskuterats de principiella huvuddragen hos de svårigheter som är förknippade med bestämningar av fönsters k-värden, såväl teoretiskt som experimentellt, bl.a. beroende på komplicerade randvillkor. I anslutning till det tidigare sagda kan man således konstatera att det i allmänhet är svårt att utforma en försöksmetod för fönsters och fönsterkomponenters k-värdesbestämning som kan förenas väl med k-värdets definition. Ett uttryck för detta är de förhållandevis breda osäkerhetsmarginaler som officiella provningsanstalter vanligtvis omger de hos sig bestämda k-värdena med (storleksordning  $\pm 15\%$ ).

I föreliggande undersökning genomfördes experimenten i den stora klimatsimulatoren på institutionens för byggnadsteknik laboratorium. Klimatsimulatoren innehåller två stora rumsmoduler anslutande mot varandra genom en gemensam vägg, vilken helt eller delvis kan utgöras av provobjektet, se figur 3.1. I det ena rummet simuleras uteklimat och i det andra inneklimat. I klimatsimulatoren kan stationära förhållanden upprätthållas under sträng kontroll.

För den huvudsakliga bestämningen av k-värden användes den s.k. Guarded hot box-tekniken (Eriksson et al, 1981). Det fönster som ska undersökas monteras in i en referensvägg med kända egenskaper. En mätlåda utan lock ansluts mot provväggen på varma sidan så att hela fönsterkonstruktionen kommer väl innanför lådan (provväggen med fönstret bildar lådans lock), figur 3.2. I lådans väggar finns ett inre och ett yttre elektriskt uppvärmt skikt så utformade att värmetransport mellan skikten kan undvikas, dvs. skikten kan hållas vid samma temperatur. Värmeflödet genom den mätyta som innesluts av



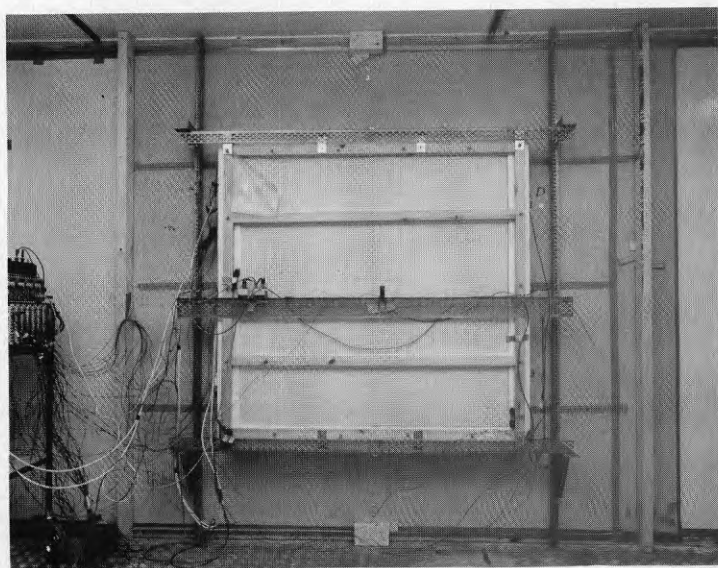
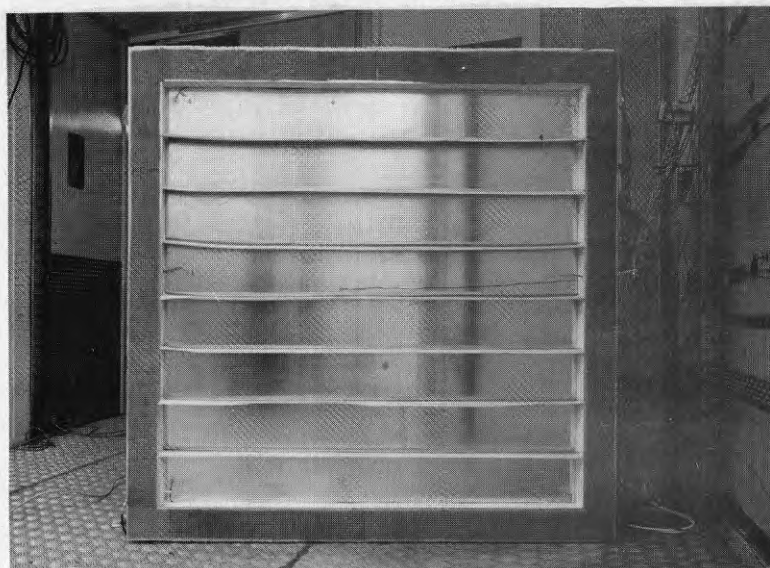
#### Utomhusklimat

Temperatur:  $-30 \rightarrow +75$  °C  
 Temperaturen kan programstyras  
 Lufttrycksskillnad mellan rummen:  $0 \pm 20$  mm vp

#### Inomhusklimat

Temperatur:  $+10 \rightarrow +30$  °C  
 Relativ luftfuktighet: 25%–75%  
 Temperaturen och relativa luftfuktigheten kan programstyras

Figur 3.1. Klimatsimulatorn vid institutionen för byggnadsteknik, KTH.  
 (Det visade provobjektet har inget samband med de experimentella undersökningarna som beskrivs i huvudtexten.)



*Figur 3.2. Den Guarded hot box som användes för mätning av värme-  
flödet genom en beskriven fönsterkonstruktion. Övre  
bilden visar den sida av lådan som appliceras mot mät-  
objektet. Den undre bilden visar lådan applicerad mot  
en provvägg.  
Foto: Bengt Vängstam, KTH.*



lådan är då lika med den uppmätbara elektriska effekt som tillförs det inre elektriskt uppvärmda skiktet i lådkonstruktionen. Temperaturförhållandena inuti lådan styrs så att dessa överensstämmer med förhållandena vid sidan av lådan, dvs. så att mätobjektet i det närmaste förblir ostört av mätlådans existens. Värmeflödet genom referensväggen vid anslutningsränderna mellan väggen och lådan måste av tidigare nämnda skäl kunna förutsättas vara endimensionellt. Detta uppnås om referensväggen består av ett homogent material (eller av homogena planparallella materialskikt) och om dessutom avståndet mellan fönsterkarmarna och ränderna är tillräckligt.

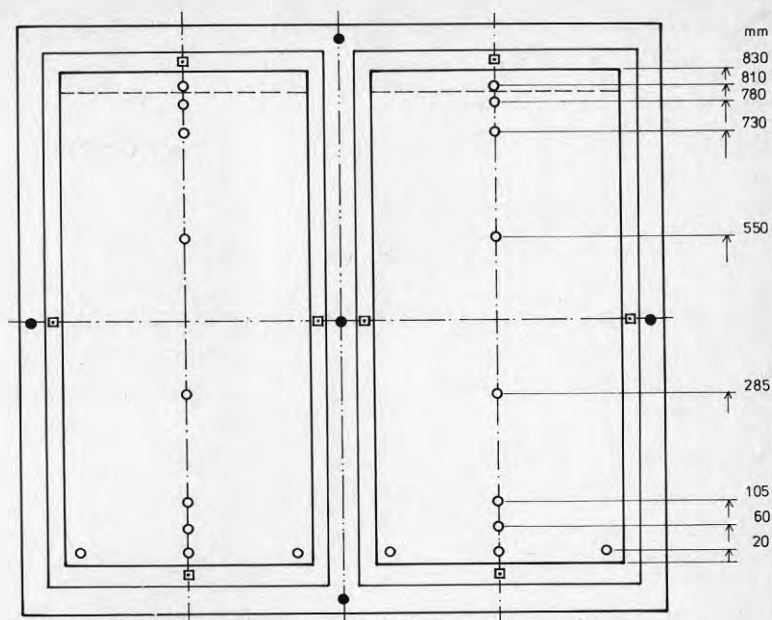
Den Guarded hot box som användes till dessa försök, täcker en mätyta med måtten  $1250 \times 1250$  mm. Det provfönster som Guarded hot box-tekniken tillämpades på, har karmyttermåtten höjd 11 M, bredd 10 M. Fönsterkonstruktionen (figur 3.3) är ett ursprungligt 2-glasfönster med 2 fönsterlufter. Bågar, karmar och post består av trä. Bågarna är kopplade med dammtättningslist emellan. Tättningslist (o-list) finns mellan båge och karm. Spaltbredden mellan glasen är ca 35 mm.

Med Guarded hot boxen mäts tillförd elenergi under en bestämd tid. Den medeleffekt som kan beräknas härur kan vid stationära förhållanden anses vara lika med värmeflödet genom provobjektet inom mätytan. Detta värmeflöde  $P$  behöver uppdelas för  $k$ -värdesbestämningen på följande delar:

Värmeflöde genom glasningen,	$P_G$
bågen	, $P_B$
karmen	, $P_K$
posten	, $P_P$
väggen	, $P_V$

Uppdelningen bjuder som tidigare nämnts på svårigheter p.g.a. flerdimensionellt värmeutbyte mellan anslutande komponenter och med omgivningen vid geometriskt komplicerade ränder. De enskilda värme-flödeskomponenterna är således inte klart definierade på detta vis. Man kan dock för bestämning av  $k$ -värdet för hela fönsterkonstruktionen och för glasningen separat arbeta med vissa godtagbara approximativa ansatser.





Figur 3.3. Förenklad principritning av fönsterkonstruktionen, sedd från insidan, med placeringen av temperaturmätpunkter. Varje markering betyder ett punktpar på ömse sidor av konstruktionen. Dessutom tillkommer mätpunkter på omgivande vägg och i luften på ömse sidor.

Värmeflödet genom hela fönsterkonstruktionen är  $P - P_V$ . Med en lämpligt utformad omgivande väggkonstruktion torde  $P_V$  kunna beräknas utifrån uppmätta temperaturer med godtagbar noggrannhet.

Värmeflödet genom glasningen är

$$P_C = P - (P_B + P_K) - P_P - P_V \quad (13)$$

Lämpligen behandlas  $(P_B + P_K)$  som en enhet. Beräkningen av  $(P_B + P_K)$  och  $P_P$  utifrån uppmätta temperaturer medför att vissa osäkerheter införs. Storleken på dessa effekter bör därför inte tillåtas få för stor andel av värmeflödet genom hela fönstret, vilket kan till en del uppfyllas genom att välja lämplig storlek på försöksfönstret.

#### Beräkning av $P_V$

Väggen bestod under experimenten av homogen styrencellplast. Väggtjockleken var  $d_V = 0,100$  m. Värmeledningsförmågan bestämdes med

Lang-apparat och med Guarded hot box för prover från samma leverans till  $\lambda_V = 0,046 \text{ W/m K}$ .

$$\text{Värmeflödet } P_V = A_V \cdot \Delta\theta_V \cdot \frac{\lambda_V}{d_V} \quad (14)$$

$$A_V = \text{väggarean, } \text{m}^2$$

$$\Delta\theta_V = \text{temperaturskillnaden över väggen, } \text{K}.$$

Temperaturskillnaden  $\Delta\theta_V$  har bestämts som medelvärde av skillnaden mellan uppmätta yttemperaturer i parvis motstående punkter på ömse sidor av väggen. Vägarean var  $0,497 \text{ m}^2$ . Med insatta värden erhålls

$$P_V = 0,229 \cdot \Delta\theta_V \text{ W} \quad (15)$$

Beräkning av  $P_B$ ,  $P_K$  och  $P_P$

Bågar, karmar och post består av trä. Värmeflödena i konstruktionsdelarna var i varierande grad flerdimensionella. Någon noggrann analys görs dock inte här av detta komplicerade förlopp. I stället utnyttjas en approximativ beräkningsmetod för värmeflödet genom systemet karm/båge, beskriven i SBN 1977:3, Kommentarer, §33:248 K. Värmeflödet genom karm och båge,  $P_{B\&K}$  beräknas enligt SBN

$$P_{B\&K} = A_{B\&K} \cdot k_{B\&K} \cdot (\theta_i - \theta_u) \quad (16)$$

$$k_{B\&K} = \left\{ 0,20 + \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \left( \frac{d_B}{\lambda_{\text{trä}}} + \frac{d_K}{\lambda_{\text{trä}}} \right) \right\}^{-1} \quad (17)$$

$$\lambda_{\text{trä}} = \text{värmeledningsförmågan hos trä, } 0,14 \text{ W/m K}$$

$$\left. \begin{aligned} d_B &= \text{tjocklek hos båge} \\ d_K &= \text{tjocklek hos karm} \end{aligned} \right\} \text{ enligt mätregler i SBN, fig. 33.248 K}$$

$$\theta_i = \text{lufttemperatur inne, } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_u = \text{lufttemperatur ute, } ^\circ\text{C}$$

$$\beta = \text{korrektionsfaktor för flerdimensionellt värmeflöde}$$

$$A_{B\&K} = \text{projicerad area av systemet båge/karm vid stängt fönster, } \text{m}^2.$$

I SBN omnämns inte hur posten ska beräknas. Här antas att posten kan beräknas på samma vis, dvs.

$$k_P = (0,20 + \beta \cdot \frac{d_P}{0,14})^{-1} \quad (18)$$

$\beta = 0,70$  vid öppningsbara fönster.  $\beta = 0,80$  vid fasta fönster.

I detta fall är fönstret öppningsbart men var under försöken tejpat längs anslutningen både - karm, varför ett mittvärde  $\beta = 0,75$  antages.

Som framgår av SBN antages värmeövergångsmotstånd  $m_i + m_u = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Detta kan inte med någon säkerhet antas gälla under experimenten med Guarded hot boxen. Beräkningsalgoritmen enligt SBN har därför omformulerats en smula så att i stället för k-värde bestäms värmemotstånd baserat på mätningar av yttemperaturer. Efter ren omskrivning erhåller man

$$m_{B\&K} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot (d_B/\lambda_B + d_K/\lambda_K) = \frac{1}{2} \cdot 0,75 \cdot (\frac{0,062}{0,14} + \frac{0,104}{0,14}) = 0,445 \quad (19)$$

$$m_P = \beta \cdot d_P/\lambda_P = 0,75 \cdot 0,104/0,14 = 0,557 \quad (20)$$

$$P_{B\&K} = A_{B\&K} \cdot \frac{\Delta\theta_{B\&K}}{m_{B\&K}} \quad (21)$$

$$P_P = A_P \cdot \frac{\Delta\theta_P}{m_P} = 0,049 \cdot \frac{\Delta\theta_P}{0,557} = 0,0880 \cdot \Delta\theta_P \quad \text{W} \quad (22)$$

$$A_P = \text{postens area, m}^2 \text{ (0,049).}$$

Det gäller att bestämma  $\Delta\theta_{B\&K}$  och  $\Delta\theta_P$  utifrån uppmätta yttemperaturer i parvis motstående punkter på ömse sidor av konstruktionerna.

Följande härledning görs:

Betrakta systemet både - karm

$$\text{Värmeflöden ut} \quad P_{uB} = A_{uB} \cdot \frac{\theta_{yyB} - \theta_u}{m_u} \quad (23a)$$

$$P_{uK} = A_{uK} \cdot \frac{\theta_{yyK} - \theta_u}{m_u} \quad (23b)$$

$$\text{Värmeflöde in} \quad P_{iB} = A_{iB} \cdot \frac{\theta_i - \theta_{iyB}}{m_i} \quad (23c)$$

$$P_{iK} = A_{iK} \cdot \frac{\theta_i - \theta_{iyK}}{m_i} \quad (23d)$$

B står för båge, K för karm

$A_u$  = projicerad area mot utsidan

$A_i$  = projicerad area mot insidan

$\theta_{yy}$  = yttemperatur, medelvärde längs ytan

$\theta_i, \theta_u$  = lufttemperatur inne resp. ute.

Antag  $m_i$  och  $m_u$  kan betraktas som konstanter.

Antag vidare att

$$P_{uB} + P_{uK} = P_{iB} + P_{iK} (= P_{B\&K}) \quad (24)$$

och  $A_{uB} = A_{iB} (= A_B)$

$$A_{uK} = A_{iK} (= A_K)$$

Härav följer

$$m_u = \frac{1}{P_{B\&K}} \{A_B \cdot \theta_{yyB} + A_K \cdot \theta_{yyK} - (A_B + A_K) \cdot \theta_u\} \quad (25)$$

$$m_i = \frac{1}{P_{B\&K}} \{(A_B + A_K) \cdot \theta_i - A_B \cdot \theta_{iyB} - A_K \cdot \theta_{iyK}\} \quad (26)$$

$$m_i + m_u = (A_B + A_K) \cdot \frac{(\theta_i - \theta_u)}{P_{B\&K}} - \frac{A_B}{P_{B\&K}} (\theta_{iyB} - \theta_{yyB}) - \frac{A_K}{P_{B\&K}} (\theta_{iyK} - \theta_{yyK}) \quad (27)$$

$$\left\{ \frac{(A_B + A_K)(\theta_i - \theta_u)}{P_{B\&K}} = m_{B\&K} + m_i + m_u \right\}$$

$$P_{B\&K} = \frac{A_B \cdot \Delta\theta_B + A_K \cdot \Delta\theta_K}{m_{B\&K}} \quad (28)$$

dvs.  $\Delta\theta_{B\&K} = \frac{A_B \cdot \Delta\theta_B + A_K \cdot \Delta\theta_K}{A_B + A_K} \quad (29)$

där  $\Delta\theta_B$  = temperaturskillnaden över bågen, K

$\Delta\theta_K$  = temperaturskillnaden över karmen, K

$A_B$  = bågens projicerade area,  $m^2$  (0,156)

$A_K$  = karmens projicerade area,  $m^2$  (0,164).

Värmeflödet genom karm och båge har beräknats baserat på ovanstående härledning enligt

$$P_{B\&K} = (0,156 \cdot \Delta\theta_B + 0,164 \cdot \Delta\theta_K) / 0,445 = 0,351 \cdot \Delta\theta_B + 0,369 \cdot \Delta\theta_K \quad W \quad (30)$$

Temperaturdifferenserna  $\Delta\theta_B$ ,  $\Delta\theta_K$  och  $\Delta\theta_P$  har bestämts som medelvärden av skillnader mellan uppmätta yttemperaturer i parvis motstående punkter på ömse sidor av resp. konstruktionsdel. Medelvärdena representerar de genomsnittliga förhållandena längs resp. konstruktionsdels hela utbredning i fönstrets plan. Antalet par mätpunkter valdes så att variationerna längs konstruktionerna blev beaktade på ett godtagbart vis, se figur 3.3.

Bestämning av glasningens värmemotstånd,  $m_G$ , och  $k$ -värde

Det bestämda värmeflödet genom glasningen är  $P_G$ . Följande härledning görs:

Värmeflödet mellan glaset antas förutsättningslöst vara flerdimensionellt. Värmeflödet genom ett ytelement av det ena glaset behöver inte överensstämma med värmeflödet genom det andra glasets motstående ytelement.

$$P_G = A_G \cdot \frac{(\theta_i - \theta_u)}{m_G + m_i + m_u}, \quad m_G = \frac{(\theta_i - \theta_u) \cdot A_G}{P_G} - (m_i + m_u) \quad (31)$$

$$A_G = \text{glasningsarean, } m^2(0,697).$$

Värmeflödet genom ett ytelement av vardera glaset är

$$dP_{Gu} = \frac{\theta_{yy} - \theta_u}{m_u} \cdot dA_u \quad (32a)$$

$$dP_{Gi} = \frac{\theta_i - \theta_{iy}}{m_i} \cdot dA_i \quad (32b)$$

Yttemperaturerna  $\theta_{yy}$  och  $\theta_{iy}$  är variabla över glasytorna. Övergångsmotstånden  $m_i$  och  $m_u$  antas vara konstanta. Integration över glasytan ger

$$P_G = \frac{1}{m_u} \int_{A_u}^{A_G} (\theta_{yy} - \theta_u) dA_u = \frac{1}{m_u} \left\{ \int_{A_u}^{A_G} \theta_{yy} dA_u - \theta_u \cdot A_G \right\} \quad (33a)$$

$$P_G = \frac{1}{m_i} \int_{A_i}^{A_G} (\theta_i - \theta_{iy}) dA_i = \frac{1}{m_i} \left\{ \theta_i \cdot A_G - \int_{A_i}^{A_G} \theta_{iy} dA_i \right\} \quad (33b)$$

$$m_i + m_u = \frac{A_G}{P_G} (\theta_i - \theta_u) - \frac{1}{P_G} \left\{ \int_{A_i}^{A_G} \theta_{iy} dA_i - \int_{A_u}^{A_G} \theta_{yy} dA_u \right\}$$

dvs. 
$$m_G = \frac{1}{P_G} \left\{ \int_{A_i}^{A_G} \theta_{iy} dA_i - \int_{A_u}^{A_G} \theta_{yy} dA_u \right\} = \frac{A_G}{P_G} (\overline{\theta_{iy}} - \overline{\theta_{yy}}) \quad (34)$$

där  $\overline{\theta_{iy}}$  och  $\overline{\theta_{yy}}$  är medeltemperaturerna på glasytorna.

$$\Delta\theta_G = \overline{\theta_{iy}} - \overline{\theta_{yy}} \quad (35)$$

$$m_G = A_G \cdot \Delta\theta_G / P_G \quad (36)$$

Glasytorna försågs med sådant antal mätpunkter att medelyttemperaturerna kunde bestämmas med godtagbar noggrannhet, se figur 3.3.

De k-värden som redovisas är beräknade utgående från bestämda  $m_G$ -värden och med  $m_i + m_u = 0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Mindre avvikelser från detta  $m_i + m_u$ -värde under experimenten har ingen praktisk inverkan på det bestämda  $m_G$ -värdet. k-värdet redovisas således beräknat enligt

$$k_G = 1/(m_G + 0,2) \quad (37)$$

Sammanfattning:

$$P_G = P - P_{B\&K} - P_P - P_V$$

$$P_{B\&K} = 0,351 \Delta\theta_B + 0,369 \Delta\theta_K$$

$$P_P = 0,0880 \Delta\theta_P$$

$$P_V = 0,229 \Delta\theta_V$$

$$m_G = A_G \cdot \Delta\theta_G / P_G$$

$$k_G = 1/(m_G + 0,2)$$



Temperaturerna uppmättes och medelvärdesbildades för varje mätperiod som omfattade en bestämning av k-värdet. Mätpunkter (se figur 3.3) var applicerade parvis på ömse sidor av fönstret på glasen, bågarna, karmarna, posten, väggen och i luften. Kalibrerad termoelementtråd av koppar/konstantan användes. Mätvärdesinsamlingen ombesörjdes av en datorstödd utrustning. Noggranna kontroller gjordes inför varje mätperiod att stationära förhållanden inställt sig.

Som nämnts är den Guarded hot box som användes så konstruerad att det inte föreligger något behov av att korrigera uppmätta värme-flöden p.g.a. egenförluster. Eftersom detta exemplar av Guarded hot box är konstruerat för i första hand mätning av värmefflöde genom väggar, och den maximala effektavgivningsförmågan enligt konstruktionskonceptet är begränsad till nivåer som kan vara aktuella vid mätning på väggar, fick temperaturskillnaden  $(\theta_i - \theta_u)$  begränsas till storleksordningen 15 K vid mätningarna på fönstret p.g.a. fönstrets relativt höga k-värde i jämförelse med vanliga väggar.

Med ett annat fönster, en ursprunglig 3-glaskonstruktion (isolerruta och kopplad båge, 2+1), gjordes i klimatsimulatorens några ytterligare k-värdesbestämningar. Värmefflöden mättes med termoelektrisk värmefflödesmätare enligt hjälpväggsprincipen genom en liten yta på glasningens varma sida. Yttertemperaturer på glasytan mättes med termoelement. Dessa mätningar ska ses som av enklare slag i jämförelse med de tidigare diskuterade.

k-värdet bestäms genom denna metod antingen enligt

$$k = \left( \frac{\Delta\theta_G}{P_G} + 0,2 \right)^{-1} \quad (38)$$

eller enligt

$$k = \frac{P_G}{(\theta_i - \theta_u)} \quad (39)$$

$P_G$  = värmefflödet mätt genom mätytan på glasningen,  $W/m^2$

$\Delta\theta_G$  = skillnaden mellan yttertemperaturerna på glasningens yttre begränsningsytor, K.

I det första fallet har antagits att värmeövergångsmotstånd  $m_i + m_u = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$ . I det andra fallet ingår de värmeövergångsmotstånd som bestämdes av förutsättningarna i klimatsimulatorens försök.

### 3.2 Undersökta fönsterkonstruktioner

Den experimentella undersökningen har syftat till att bestämma k-värden för vanliga fönster som på ett enkelt vis kompletterats med en fristående plastfolie av lågmissionstyp mitt i en spalt mellan två ursprungliga glas. Av stort intresse är naturligtvis även k-värdesförbättringen i förhållande till ursprungligt fönster.

Följande fönsteralternativ har undersökts:

#### A. 2-glasfönster undersökt med Guarded hot box-metod

1. 2-glasfönstret i ursprungligt utförande.
2. Fönstret kompletterat med en plastfolie av lågmissions-typ. Folien kan rullas ut från en rullanordning formad som en avlång låda, placerad högst upp mellan glasen. Den utrullade folien styrs längs bågens kanter genom fastsatta styrlister. Från en spektrometrisk undersökning har som tidigare nämnts foliens hemisfäriska emissivitet bestämts till 0,35 resp. 0,63 för de två sidorna. Från en annan spektrometrisk undersökning bestämdes värdena till 0,29 resp. 0,66. Foliefabrikantens uppgivna värde för den lågemitterande sidan är 0,26. Spektrometriska bestämningar baserade på folieprover är av olika orsaker mycket osäkra.
3. Som 2., men med folien tejpad i anslutning till bågen för att i jämförelse med 2. utröna eventuell påverkan på k-värdet av luftutbyte mellan de två spalterna som folien bildar med glasen.
4. Som 3., men utan rullanordning för folien. Folien var fastsatt med tejp runt om mot bågen. I jämförelse med 3. kan utrönas vilken betydelse rullanordningen har som köldbrygga för k-värdet.

#### B. 3-glasfönster undersökt med termoelektrisk värme-flödesmätare

1. 3-glasfönster i ursprungligt utförande.
2. Fönstret kompletterat med en homogen polyesterfolie tejp-pad mot bågen.
3. Fönstret kompletterat med en plastfolie av lågmissions-typ (samma typ som under A) tejp-pad mot bågen.

## 3.3 Experimentellt bestämda k-värden

Utvärderingen av de experimentella försöken har givit följande k-värden:

Fönsteralternativ		k-värde $\text{W/m}^2\text{K}$	
		glasning	helt fönster
A. 2-glasfönster			
1.	2 glas (2 skilda bestämningar)	2,70 2,68	2,19 2,19
2.	2 glas + plastfolie av lågemissions- typ med rullmekanism	1,51	1,51
3.	2 glas + plastfolie av lågemissions- typ med rullmekanism, tejpade folie- sidor	1,48	1,50
4.	2 glas + plastfolie av lågemissions- typ utan rullmekanism, tejpade folie- sidor	1,46	1,48
B. 3-glasfönster			
1.	3 glas (enl. ekv. 38) (enl. ekv. 39)	1,72 1,71	
2.	3 glas + homogen polyesterfolie, tejpade foliesidor (enl. ekv. 38) (enl. ekv. 39)	1,43 1,43	
3.	3 glas + plastfolie av lågemissions- typ, tejpade foliesidor (enl. ekv. 38) (enl. ekv. 39)	1,01 1,05	

En komplettering av glasningen med en polyesterfolie, framför allt en av lågemissionstyp, medför som väntat en betydande sänkning av k-värdet. För 2-glasfönstret är sänkningen  $\Delta k$  ca  $1,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . En intressant notering är att varken rullmekanismens köldbryggeeffekt eller en otät folieanslutning mot bågen visar sig ha någon betydande inverkan på k-värdet. Några mellanresultat från utvärderingen av försöksalternativen A (försöken med hjälp av Guarded hot box) finns sammanställda i tabell 3.1.

En felkalkyl, återgiven i appendix 1, visar att maximalfelet hos bestämt k-värde torde kunna uppskattas till ca  $\pm 0,1(2) \text{ W/m}^2 \text{ K}$  för fönsteralternativ A med folie, och ca  $\pm 0,1(6) \text{ W/m}^2 \text{ K}$  för fönsteralternativ A utan folie.

Tabell 3.1. Några mellanresultat från utvärderingen av fönsteralternativen A (försöken med hjälp av Guarded hot box). Försöken har utförts inom temperaturområdet 5-20°C.

		A1	A2	A3	A4	
Medeltemp.- diff., K	glas	2,89	2,96	7,63	7,66	7,92
	båge	5,3	5,3	9,2	8,8	9,3
	karm	6,9	6,9	10,9	10,6	11,0
	post	6,4	6,4	10,5	10,4	10,6
	vägg	7,5	7,7	11,5	11,8	12,0
Värmeflöde W	tot.	18,47	18,62	22,29	21,86	22,34
	vägg	1,72	1,76	2,63	2,70	2,75
	båge + karm	4,41	4,41	7,25	7,00	7,32
	post	0,56	0,56	0,92	0,92	0,93
	glas	11,78	11,89	11,49	11,24	11,34
Värmemot- stånd m <sup>2</sup> K/W	glasning	0,171	0,174	0,463	0,475	0,487
	fönster	0,256	0,257	0,461	0,468	0,474

En jämförelse för 2-glasfönstret mellan teoretiskt beräknade k-värden (se kapitel 2) och experimentellt bestämda k-värden enligt de alternativ som närmast motsvarar de teoretiska beräkningarna (A1 och A4) utfaller sålunda:

	k-värde, W/m <sup>2</sup> K	
	experimentellt bestämt	teoretiskt beräknat
2-glasfönster utan folie	2,69 ± 0,1(6)	2,66
2-glasfönster med folie	1,46 ± 0,1(2)	1,46

Överensstämmelsen är som framgår mycket god.

#### 4. TEORETISK BERÄKNING AV ENERGIBESPARING ELLER FÖRLUSTER FRÅN FÖNSTER I BYGGNADER

Här redovisas beräknade energibesparingar eller förluster från fönster med eller utan lågemitterande folie, betraktat över ett helt år. I samtliga beräkningar har klimatdata för Stockholm använts.

Två exempel får inleda. Det första exemplet behandlar ett ateljéfönster i en vindsvåning. Det andra exemplet har ett småhus som studieobjekt.

I anslutning till småhusexemplet följer några specialstudier av generell intresse.

Slutligen presenteras en parameterstudie som resulterat i generella besparings-/förlustdiagram för fönster i byggnader.

##### 4.1 Exempel 1. Ateljéfönster i en vindsvåning

En vindsvåning i Stockholm, latitud  $60^{\circ}\text{N}$ , har i riktning mot sydväst ett oskuggat ateljéfönster bestående av en  $5\text{ m}^2$  vertikal del och en  $5\text{ m}^2$   $45^{\circ}$  lutande del.

Fönstret ger under vissa tider värmeförluster och under andra tider värmeöverskott. Tidvis kan värmeöverskotten tillgodogöras för att täcka samtidigt förekommande värmeförluster från vindsvåningen.

Värmetillskotten och värmeförlusterna från fönstret kan till en del regleras genom att en genomsynlig lågemitterande mellanglasgardin (folie) kan rullas ut eller in. Här antas att regleringen sker vid behov en gång morgon och kväll. Vidare antas att som underlag för regleringen finns varje morgon och kväll för ett halvdygn framåt en säker väderprognos. Fönstrets avskärmningsfaktorer  $F_1$  och k-värden i de två reglerlägena är

- |    |                 |             |                                  |
|----|-----------------|-------------|----------------------------------|
| 1. | inrullad gardin | $F_1 = 0,9$ | $k = 2,7\text{ W/m}^2\text{K}$   |
| 2. | utrullad gardin | $F_1 = 0,6$ | $k = 1,5\text{ W/m}^2\text{K}$ . |

Fönstret ska regleras så att uppvärmningsbehovet ("köpt värme") för vindsvåningen blir så litet som möjligt under antagande om lagring endast inom dygnet av inkommande solenergi men dessutom så att onyttiga värmeöverskott från fönstret blir minsta möjliga.

Vindsvåningens genomsnittliga värmebehov per dygn för varje månad exklusive inverkan av fönstret antas givet (från en tänkt föregående beräkning):

Månad	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Värmebehov, kWh/d	18	18	15	10	5	0	0	0	2	7	12	14

I detta exempel bortses från att eventuella outnyttjade basvärmetillskott från beräkningen av de givna värmebehoven skulle kunna täcka delar av värmeförluster från fönstret.

Inomhusluften värms till 20°C. Utomhustemperaturen antas som normaltemperaturerna 1931-60:

Månad	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temp., °C	-3,5	-3,8	-1,2	4,2	10,0	14,7	17,6	16,4	12,0	6,8	2,5	-0,4

*Vilket läge ska mellanglasgardinen intaga under de olika månadernas typdagar?*

*Hur stor blir energibesparingen jämfört med att mellanglasgardinen ständigt är a) inrullad (dvs. utelämnas) b) utrullad?*

Fönstrets värmebalans för ett dygn kan skrivas

$$W = F_1(0,5 \cdot A \cdot w_{Vt1} + 0,5 \cdot A \cdot w_{45t1}) - (k_{\text{dag}} \cdot t_{\text{dag}} + k_{\text{natt}} \cdot t_{\text{natt}}) \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_u)$$

(positivt W betyder energitillskott, negativt betyder förlust)

med bivillkoret att reglera  $F_1$ ,  $k_{\text{dag}}$  och  $k_{\text{natt}}$  så att absolutbeloppet  $|W - \text{värmebehovet}|$  är minimum, dock om möjligt så att  $W > \text{värmebehovet}$ .

$w_{Vt1}$ ,  $w_{45t1}$  = dygnssumman av solvärmeinläckningen genom en 1 m<sup>2</sup> vertikal resp. 45° lutande 3 mm englasruta, Wh/m<sup>2</sup>

A = totala fönsterarean (glasdelen), 10 m<sup>2</sup>

t = antalet timmar, h

$\theta_i$ ,  $\theta_u$  = lufttemperaturen inne resp. ute, °C.



Beräkningarna återges i nedanstående tabeller. Till dessa följer här några förklaringar.

Antal timmar dagtid och nattid grundas på om solen befinner sig över eller under horisonten och värdena avläses från figur 4.1.

Värden för dygnssummor av transmitterad solstrålning genom en 3 mm englasruta hämtas från ett tabellverk av Höglund, Girdo & Troedsson (1984b), uppslag för latitud  $60^{\circ}\text{N}$ . Exempelvis avläses januari, helklart, vertikal yta ( $90^{\circ}$  lutning) mot SV  $w_{\text{Vt}1} = 1336 \text{ Wh/m}^2$  och för  $45^{\circ}$  lutande yta mot SV  $w_{45\text{t}1} = 1134 \text{ Wh/m}^2$ .

Antalet dagar av varje typ hämtas från tabell 4.1.

Energimängden som passerar genom fönstret under ett dygn,  $W$ , beräknas för de tre typtidagarna för varje månad.

Vid ständigt inrullad gardin är  $F_1 = 0,9$  och  $k = 2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vid ständigt utrullad gardin är  $F_1 = 0,6$  och  $k = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vid reglerad gardin innebär bivillkoret att "söka minimum av  $|W\text{-värmebehov}|$ ", att ett av fyra möjliga fall ska väljas för varje typtidag och månad. De fyra fallen är

Fall	1	2	3	4
$F_1$	0,9	0,9	0,6	0,6
$k_{\text{dag}}$	2,7	2,7	1,5	1,5
$k_{\text{natt}}$	2,7	1,5	2,7	1,5

Rätt fall avgörs genom prövning. I allmänhet är det i varje valsituation aktuellt med val mellan endast ett par av alternativen. Resultatet av sådana beräkningar har återgivits i form av reglerlägen dag och natt (ljusst fält  $F_1 = 0,9$ , skuggat fält  $F_1 = 0,6$ ) och värden på  $W$ .

Onyttig överskottsvärme räknas bort genom att för varje dagtyp och månad välja minimum av  $W$  och värmebehovet. De så erhållna värdena multiplicerade med resp. antal dagar av varje dagtyp ger månadssummor och årssummor sparad nyttig energi eller alternativt energiförlust.

Årsvärmebehovet för våningen inkluderat fönstret utan mellanglasgardin (inrullad gardin) är som framgår av beräkningarna  $3053 + 284 = 3337$  kWh.

Med ständigt utrullad gardin (fast montage) reduceras årsvärmebehovet till  $3053 - 263 = 2790$  kWh. Energibesparingen med gardinen är således  $284 + 263 = 547$  kWh, 16 %.

Med reglerad gardin på beskrivet vis reduceras årsvärmebehovet till  $3053 - 436 = 2617$  kWh. Energibesparingen med reglerad gardin är således  $284 + 436 = 720$  kWh, 22 %.

En reglerad gardin i stället för en fast gardin medför som framgår energibesparingen 173 kWh, 6 %.

Månad	Temp.-diff. $\theta_i - \theta_u$	Dagtid/natt-tid per dygn	$t_{\text{dag}} \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_u)$	$t_{\text{natt}} \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_u)$	$0,5 \cdot A \cdot (w_{vt1} + w_{45t1})$		
					helklar	halvklar	mulet
	K	h	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{h/d}$	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{h/d}$	kWh/d	kWh/d	kWh/d
J	23,5	6,5/17,5	1527	4113	12,35	7,80	2,12
F	23,8	9 / 15	2142	3570	26,58	17,70	5,53
M	21,2	11,5/12,5	2438	2650	40,73	28,69	10,19
A	15,8	14 / 10	2212	1580	51,44	38,38	15,39
M	10,0	17 / 7	1700	700	56,42	44,04	19,28
J	5,3	18,5/ 5,5	980	292	57,63	46,15	21,15
J	2,4	17,5/ 6,5	420	156	57,14	45,32	20,43
A	3,6	15 / 9	540	324	54,14	41,29	17,29
S	8,0	12,5/11,5	1000	920	45,73	33,10	12,48
O	13,2	9,5/14,5	1254	1914	32,66	22,34	7,43
N	17,5	7 / 17	1225	2975	17,77	11,43	3,27
D	20,4	5 / 19	1020	3876	8,80	5,46	1,41

Månad	Antal dagar/månad		
	hel-klara	halv-klara	mulna
J	2,9	9,1	19,0
F	3,2	8,6	16,2
M	6,6	10,9	13,5
A	4,9	14,2	10,9
M	7,3	14,7	9,0
J	5,8	16,1	8,1
J	5,9	16,8	8,3
A	5,3	16,4	9,3
S	4,3	14,9	10,8
O	3,6	11,8	15,6
N	2,0	7,6	20,4
D	1,9	8,0	21,1

Månad	W, ständigt inrullad gardin			Värme- behov	Minimum (W, värmebehovet)			D:o månads- summa	
	helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet		
	kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh
J	- 4,1	- 8,2	-13,3	18	- 4,1	- 8,2	-13,3	-339	
F	8,5	0,5	-10,4	18	8,5	0,5	-10,4	-137	
M	22,9	12,1	- 4,6	15	15	12,1	- 4,6	169	
A	36,1	24,3	3,6	10	10	10	3,6	230	
M	44,3	33,1	10,9	5	5	5	5	155	
J	48,4	38,1	15,6	0	0	0	0	0	
J	49,9	39,2	16,8	0	0	0	0	0	
A	46,4	34,8	13,2	0	0	0	0	0	
S	36,0	24,6	6,0	2	2	2	2	60	
O	20,8	11,6	- 1,9	7	7	7	- 1,9	78	
N	4,7	- 1,1	- 8,4	12	4,7	- 1,1	- 8,4	-170	
D	- 5,3	- 8,3	-12,0	14	- 5,3	- 8,3	-12,0	-330	
				Årsvärmebehov: 3053 kWh			Årssumma		-284

Månad	W, ständigt utrullad gardin			Värme- behov	Minimum (W, värmebehovet)			D:o månads- summa	
	helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet		
	kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh
J	- 1,1	- 3,8	- 7,2	18	-1,1	- 3,8	- 7,2	-175	
F	7,4	2,1	- 5,3	18	7,4	2,1	- 5,3	- 44	
M	16,8	9,6	- 1,5	15	15	9,6	- 1,5	183	
A	25,2	17,3	3,5	10	10	10	3,5	229	
M	30,3	22,8	8,0	5	5	5	5	155	
J	32,7	25,8	10,8	0	0	0	0	0	
J	33,4	26,3	11,4	0	0	0	0	0	
A	31,2	23,5	9,1	0	0	0	0	0	
S	24,6	17,0	4,6	2	2	2	2	60	
O	14,8	8,7	- 0,3	7	7	7	- 0,3	103	
N	4,4	0,6	- 4,3	12	4,4	0,6	- 4,3	- 74	
D	- 2,1	- 4,1	- 6,5	14	- 2,1	- 4,1	- 6,5	-174	
				Årsvärmebehov: 3053 kWh			Årssumma		263

Månad	Helklart regl.läge dag/natt	W kWh/d	Halvklart regl.läge dag/natt	W kWh/d	Mulet regl.läge dag/natt	W kWh/d	Värme- behov kWh/d	Minimum (W, värmebehovet)			D:o månads- summa kWh	
								helklart	halvklart	mulet		
								kWh/d	kWh/d	kWh/d		
J		0,8		- 3,3		- 7,2	18	0,8	- 3,3	- 7,2	-165	
F		12,8		4,8		- 5,3	18	12,8	4,8	- 5,3	- 4	
M		16,8		15,3		- 1,4	15	15	15	- 1,4	244	
A		23,3		15,4		5,5	10	10	10	5,5	251	
M		29,4		22,0		7,1	5	5	5	5	155	
J		32,3		25,4		10,4	0	0	0	0	0	
J		33,2		26,1		11,2	0	0	0	0	0	
A		30,8		23,1		8,7	0	0	0	0	0	
S		23,5		15,9		3,5	2	2	2	2	60	
O		12,5		8,6		0,4	7	7	7	0,4	114	
N		8,2		2,5		- 4,3	12	8,2	2,5	- 4,3	- 52	
D		- 0,6		- 3,6		- 6,5	14	- 0,6	- 3,6	- 6,5	-167	
							Årsvärmebehov: 3053 kWh			Årssumma		436

Tabell 4.1. Statistik över klara och mulna dagar enligt SMHI. Källa: Taester (1972).

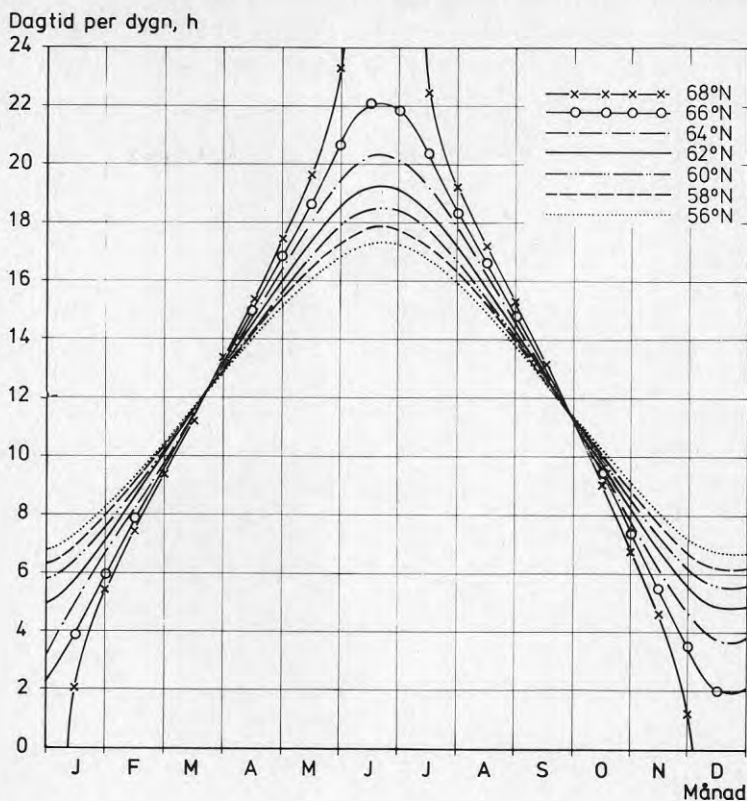
Medelantal klara dagar per månad, 1931-1960

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Karesuando	mv 4.4	3.5	5.0	4.1	3.3	2.2	2.9	2.1	1.3	3.5	2.9	3.4
	s 2.5	2.0	2.5	2.0	3.0	1.8	3.0	2.1	1.2	2.0	2.4	2.1
Kiruna	mv 4.5	3.5	5.6	5.3	3.9	3.3	3.3	2.9	2.4	3.9	3.4	3.4
	s 2.4	2.1	2.4	2.8	3.3	2.6	3.0	2.3	2.3	2.4	2.4	3.0
Stensäle	mv 3.4	4.6	6.3	4.4	5.5	3.6	3.7	3.3	2.3	3.0	2.9	3.5
	s 2.3	2.4	3.1	4.1	2.9	2.6	3.1	2.0	1.9	2.2	2.1	2.1
Haparanda	mv 2.6	2.1	7.1	5.6	5.2	4.8	6.4	4.5	3.8	4.4	3.4	3.8
	s 2.6	2.1	3.1	3.8	3.1	2.0	3.3	3.1	2.0	3.2	2.7	2.6
Umeå	mv 3.1	3.3	3.7	3.3	3.6	5.8	5.1	6.2	4.6	5.4	4.1	4.9
	s 3.1	3.3	3.7	3.3	3.6	5.8	5.1	6.2	4.6	5.4	4.1	4.9
Härnösand	mv 3.2	4.7	5.2	5.0	5.6	3.4	5.3	4.2	3.0	3.1	3.3	3.1
	s 3.2	4.7	5.2	5.0	5.6	3.4	5.3	4.2	3.0	3.1	3.3	3.1
Gävle	mv 4.0	5.5	8.0	6.9	9.8	7.2	7.6	6.9	6.3	5.2	3.8	2.7
	s 2.9	3.1	3.3	3.2	4.1	3.7	4.0	3.9	3.4	3.1	2.2	2.4
Ostersund	mv 4.5	4.0	6.0	4.8	6.3	5.2	4.7	4.6	3.2	3.4	1.5	2.2
	s 3.1	2.5	3.1	3.2	4.5	2.2	2.8	3.4	2.2	2.4	1.2	2.2
Sveg	mv 4.7	4.0	6.3	4.9	5.5	3.1	3.6	3.7	3.3	3.9	3.0	4.1
	s 2.4	2.6	3.8	3.1	3.7	2.6	2.9	3.3	2.4	2.3	2.2	2.1
Särna	mv 5.0	5.5	7.6	5.6	6.7	3.0	3.5	3.8	3.4	3.8	3.5	4.7
	s 4.0	3.6	3.1	2.8	3.4	2.3	2.4	3.4	1.9	3.0	2.7	2.6
Fällun	mv 4.2	3.9	5.1	4.0	4.6	2.9	3.2	3.3	2.4	3.0	2.2	2.7
	s 2.1	3.2	3.4	2.8	3.3	2.9	3.2	2.9	2.5	1.9	2.0	2.3
Kron	mv 3.8	4.0	7.3	5.8	7.8	5.7	6.0	5.6	5.5	4.6	2.7	2.9
	s 2.9	2.5	3.6	2.9	3.1	3.3	3.2	3.9	3.5	3.3	2.0	1.9
Västerås	mv 2.9	3.2	6.6	4.9	7.3	5.8	5.9	5.3	4.3	3.6	2.0	1.9
	s 2.9	3.2	6.6	4.9	7.3	5.8	5.9	5.3	4.3	3.6	2.0	1.9
Stockholm	mv 4.1	4.7	7.1	5.2	6.6	4.9	5.0	5.2	5.1	4.3	3.0	3.0
	s 2.7	3.0	3.7	3.4	3.9	3.1	3.3	4.3	4.0	3.0	2.1	2.1
Örebro	mv 3.6	3.3	5.1	4.3	6.3	4.3	3.7	4.6	4.2	3.1	2.4	2.9
	s 2.6	2.4	3.1	2.9	4.1	2.4	3.2	3.2	3.7	2.3	1.7	2.3
Karlstad flygplats	mv 2.6	3.1	5.9	4.6	5.9	4.1	4.2	4.3	4.0	3.1	1.7	1.7
	s 1.8	2.3	3.7	2.4	3.6	1.7	2.9	2.9	2.7	2.3	1.9	1.6
Skara	mv 3.0	3.1	5.8	4.6	7.6	5.5	5.0	4.8	4.6	3.8	1.8	2.4
	s 1.8	2.3	3.7	2.4	3.6	1.7	2.9	2.9	2.7	2.3	1.9	1.6
Göteborg	mv 3.1	3.1	2.8	3.2	4.5	3.6	3.5	3.6	3.2	2.5	1.4	2.1
	s 1.8	3.1	3.3	2.7	4.5	2.2	2.8	3.5	3.2	2.5	1.4	2.1
Helmså F14	mv 2.7	3.1	5.4	4.3	5.6	3.7	3.5	3.6	3.2	2.5	1.7	2.0
	s 1.8	3.1	3.3	2.7	4.5	2.2	2.8	3.5	3.2	2.5	1.4	2.1
Källnar	mv 3.1	3.0	6.0	5.0	7.6	6.3	6.1	5.3	4.2	2.0	2.5	2.0
	s 2.1	2.4	3.5	2.8	3.9	3.5	3.2	3.3	2.4	2.0	2.5	2.0
Västervik	mv 4.3	3.9	7.3	5.7	8.6	6.9	7.3	6.7	6.2	4.5	2.8	2.6
	s 3.1	2.7	4.4	2.9	4.4	4.1	4.5	4.5	3.0	2.6	2.2	2.0
Visby	mv 1.8	1.9	5.5	5.3	8.2	6.6	6.1	5.6	3.7	1.8	1.2	1.0
	s 1.5	1.7	3.9	2.1	4.0	2.9	3.0	3.8	3.2	1.0	1.1	1.0
Borås	mv 3.1	3.8	7.5	6.3	8.0	5.8	5.1	5.4	4.8	3.9	1.8	2.2
	s 2.0	3.0	3.8	3.7	3.9	3.9	3.3	4.3	3.2	2.7	2.1	2.2
Malmö flygplats	mv 2.1	3.0	6.2	5.5	7.6	6.5	5.2	5.2	5.6	3.8	1.8	2.0
	s 2.1	2.6	3.7	3.1	4.5	4.1	3.2	3.9	3.5	2.8	1.7	1.5
Kristianstad	mv 2.1	2.5	4.3	5.6	7.8	7.0	5.9	5.0	4.6	2.7	1.3	1.3
	s 1.6	2.1	3.1	3.3	3.9	4.3	3.1	3.5	2.9	2.1	1.8	1.5

mv = medelvärde (antal dagar)  
s = standardavvikelse (antal dagar)

Medelantal mulna dagar per månad, 1931-1960

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Karesuando	mv 14.1	12.2	12.3	13.2	14.6	15.5	13.8	15.1	18.0	15.5	17.6	16.3
	s 4.7	3.7	4.0	3.7	4.5	4.7	5.4	6.2	5.2	5.8	4.8	3.9
Kiruna	mv 14.1	12.5	12.7	12.9	14.1	15.3	14.5	15.2	18.1	15.3	16.7	15.8
	s 3.6	4.0	3.4	4.4	4.8	4.5	4.2	5.5	4.5	4.3	3.9	5.3
Stensäle	mv 14.6	12.5	12.8	13.4	12.2	13.7	13.3	14.2	14.9	16.8	19.2	17.4
	s 4.7	3.7	4.1	3.9	4.8	4.1	4.6	5.4	4.2	4.1	5.0	5.3
Haparanda	mv 15.4	14.2	12.3	12.5	9.4	9.7	9.2	11.5	13.9	15.9	18.8	18.5
	s 5.1	4.4	3.3	4.4	3.6	3.5	3.2	4.5	4.1	5.0	4.7	4.9
Umeå	mv 15.5	12.5	11.9	11.0	8.1	9.4	8.8	10.1	11.5	13.7	17.3	17.0
	s 4.8	5.4	3.8	2.9	4.4	3.7	4.1	3.6	5.5	5.7	5.2	5.2
Härnösand	mv 14.8	13.6	12.9	11.2	9.6	10.2	9.3	10.6	11.7	13.8	16.9	16.3
	s 5.1	5.1	3.9	3.6	3.6	3.4	4.1	3.0	4.9	5.3	5.9	5.9
Gävle	mv 16.1	13.1	11.1	9.4	6.7	6.1	6.5	8.1	8.6	12.8	16.6	17.0
	s 5.0	4.3	4.0	4.1	3.8	2.4	3.7	4.5	3.1	5.0	4.9	5.0
Ostersund	mv 14.5	12.6	12.4	11.3	10.4	11.6	11.3	11.5	13.6	15.0	18.0	15.9
	s 5.4	3.4	3.7	3.2	4.0	3.9	2.8	4.5	3.6	4.1	4.8	5.3
Sveg	mv 14.7	12.3	12.0	12.7	11.1	12.3	12.5	12.7	13.0	15.1	17.6	16.6
	s 4.5	4.4	3.6	2.9	4.6	4.4	4.6	4.9	4.5	3.8	5.4	4.8
Särna	mv 14.2	11.8	11.5	12.7	10.8	12.2	12.6	12.9	14.3	15.9	18.5	16.8
	s 5.2	4.8	3.9	4.0	3.6	2.9	4.0	4.3	4.2	4.3	5.1	5.1
Fällun	mv 16.5	14.2	12.2	12.1	10.3	10.7	10.5	11.6	12.7	16.0	19.1	18.9
	s 4.0	4.6	4.2	3.6	4.2	4.1	4.0	4.2	3.9	4.1	4.5	5.1
Kron	mv 17.8	14.9	13.4	14.8	12.8	13.7	13.3	14.8	15.0	18.0	20.8	20.3
	s 4.4	4.6	5.0	3.8	3.9	2.8	5.0	4.3	3.6	4.7	4.0	4.6
Västerås	mv 19.5	15.0	12.2	10.5	9.7	7.9	8.3	9.9	9.9	14.7	19.7	19.9
	s 4.6	5.5	4.6	3.4	3.7	2.7	3.4	4.5	3.8	4.7	4.5	4.9
Stockholm	mv 14.7	14.4	15.5	13.3	9.7	9.1	8.3	9.3	10.8	15.6	20.4	21.1
	s 4.7	4.4	4.5	3.9	3.7	2.9	3.3	4.1	4.0	5.0	3.8	5.1
Örebro	mv 18.3	14.8	13.3	13.6	9.6	9.2	8.1	9.2	10.8	14.9	19.5	19.8
	s 4.1	4.6	4.8	3.9	4.3	4.2	3.1	3.1	4.2	4.8	4.5	4.1
Karlstad flygplats	mv 17.5	14.8	13.0	13.2	10.6	9.0	9.2	10.6	11.1	14.2	20.2	20.0
	s 4.7	4.3	4.2	4.0	4.0	3.3	3.6	3.6	4.1	4.2	4.2	4.2
Skara	mv 19.9	16.2	14.2	13.3	10.9	11.0	11.1	12.1	12.4	16.1	20.7	21.3
	s 4.0	3.8	4.9	4.1	4.1	3.7	3.4	4.7	4.4	4.0	3.5	4.3
Göteborg	mv 18.1	14.7	13.7	12.5	10.2	11.0	11.2	12.1	13.0	16.3	20.1	20.5
	s 3.6	4.2	5.2	4.3	4.3	4.6	4.6	4.8	4.8	3.2	3.6	4.3
Helmså F14	mv 18.9	16.7	14.6	13.1	10.5	10.7	12.2	13.5	14.0	17.2	21.4	22.6
	s 3.8	4.9	5.4	3.8	3.4	3.6	4.0	5.3	4.6	3.9	3.8	3.8
Källnar	mv 19.3	16.8	14.4	11.5	9.7	8.3	8.5	9.6	10.3	15.0	18.8	21.2
	s 4.1	4.2	5.4	4.1	4.0	2.9	2.6	3.4	3.2	3.9	4.1	4.0
Västervik	mv 17.8	15.5	12.8	10.4	9.0	7.5	8.2	8.7	9.1	13.8	18.0	19.8
	s 4.2	4.8	5.9	3.6	4.0	3.0	3.6	3.8	2.8	4.6	4.3	5.1
Visby	mv 22.4	17.8	15.5	11.3	8.6	7.3	8.0	9.4	10.9	15.7	20.7	23.0
	s 4.4	4.4	4.8	3.7	3.4	2.7	2.8	3.7	3.4	3.6	3.9	4.1



Figur 4.1. Dagtid per dygn på olika latituder.

#### 4.2 Exempel 2. Fönster i småhus

Två bredvid varandra i Stockholm belägna småhus med rektangulär planform är identiskt lika så när som på fönsterareornas fördelning på de fyra fasaderna. Fönsterfördelningen är

Orientering	S	O+V	N
Glasarea hus 1, m <sup>2</sup>	7,5	6	1,5
Glasarea hus 2, m <sup>2</sup>	3	9	3

Avsikten är att den ursprungliga fönsterkonstruktionen 2-glasfönster ska kompletteras till något av alternativen

3-glasfönster

2-glasfönster med fast lågemissionsfolie mitt i spalten

2-glasfönster med manövrerbar lågemissionsfolie mitt i spalten.

Frågeställningen är: *Vilka energibesparingar eller förluster uppstår med var och en av de fyra fönsterkonstruktionerna jämfört med en yttervägg som har k-värde 0,3 W/m<sup>2</sup>K?*

Totala transmissions- och ventilationsförlusterna per år med fönsterarean 0 m<sup>2</sup> (fönsterarean ersatt med vägg, k = 0,3 W/m<sup>2</sup>K) är 20 000 kWh. Fasaderna och taket antas vara ljusa så att man kan bortse från absorberad solstrålning i ytterkonstruktionerna.

Husen antas ha värmelagringskapacitet för dygnsutjämning av genom fönstren infångad solvärme.

Husens värmebehov erhålles efter att basvärmertilskotten subtraherats från transmissions- och ventilationsförlusterna. Beräkningen utförs för varje månad. Inom månaden antas alla dygn ha samma värmebehov. Basvärmeavgivningen antas vara 16 kWh/d under hela året. Nyttiggjord basvärme får dock inte räknas till högre värde än att värmebehovet är lägst 0.

Fönstrens värmebalans ett dygn

$$W = F_1 \{ A_S \cdot w_{St1} + (A_O + A_V) \cdot w_{\ddot{O},Vt1} + A_N \cdot w_{Nt1} \} - (\Delta k_{\text{dag}} \cdot t_{\text{dag}} + \Delta k_{\text{natt}} \cdot t_{\text{natt}}) (\theta_i - \theta_u) (A_S + A_O + A_V + A_N)$$

W = energitransporten genom fönstrens glasdel (positiv = tillskott, negativ = förlust), Wh/d

F<sub>1</sub> = avskärmningsfaktorn, referens 3 mm englasruta

A = glasarea fönster, m<sup>2</sup>

w<sub>Xt1</sub> = transmitterad solvärme genom en 3 mm englasruta, orienterad mot X, Wh/m<sup>2</sup>d

k = värmegenomgångstal, W/m<sup>2</sup>K

Δk = k<sub>fönster</sub> - k<sub>vägg</sub>, W/m<sup>2</sup>K

t = antal timmar dagtid eller nattid, h/d

θ<sub>i</sub> = inneluftens temperatur, °C

θ<sub>u</sub> = uteluftens temperatur, °C

Orienteringar (X) S söder, Ö öster, V väster, N norr.

I alternativen med manövrerbara fönsterfolier antas i detta exempel alla fönster regleras lika.



Onyttiga värmestillskott från fönstren beräknas genom att välja minimum ( $W$ , värmebehovet).

I detta exempel ska inte onyttiga värmestillskott minimeras genom reglering med fönsterfolier. Skyddet mot övertemperaturer förutsätts löst på annat vis (lämpliga takutsprång, markiser etc.). I beräkningarna väljs således det reglerläge som maximerar  $W$ .

Fönsterkonstruktionerna beskrivs med följande avskärmningsfaktorer och värmeegenomgångstal:

Fönster	$F_1$	$\Delta k$ , $W/m^2K$
2-glas, vanligt. 2-glas med inrullad folie	0,9	2,4
2-glas, med fast folie. 2-glas med utrullad folie	0,6	1,2
3-glas, vanligt	0,8	1,5

Beräkningarna av energibesparing eller förluster återges nedan i tabellform.

Temperaturförutsättningar och antal timmar dagtid resp. nattid är samma som i det föregående exempel 1.

Värden för dygnssummor av transmitterad solstrålning genom en 3 mm englasruta hämtas från i exempel 1 omnämnda tabellverk av Höglund, Girdo & Troedsson (1984b), uppslag för latitud  $60^{\circ}N$ .

I alternativet med manövrerbara fönsterfolier är det enkelt att hitta rätt reglerläge under givna förutsättningar.

Med de tillfälliga beteckningarna

$$\alpha = \sum_{Xt1} A_X \cdot 10^{-3} \quad \text{och} \quad \beta = t_{\text{dag}} \cdot \sum A_X \cdot (\theta_i - \theta_u) \cdot 10^{-3}$$

gäller att folien ska vara inrullad då

$$\alpha \cdot 0,9 - \beta \cdot 2,4 > \alpha \cdot 0,6 - \beta \cdot 1,2$$

dvs.  $\alpha > 4\beta$

och i annat fall vara utrullad. I tabellen där energitransporten genom fönstret per dygn beräknas ( $W$ ) har dagar med inrullad folie markerats med en punkt efter värdet ( $\bullet$ ).

Månad	Temp.- diff. $\theta_i - \theta_u$ K	Dagtid/nattid per dygn h	$24 \cdot \Sigma A_X \cdot (\theta_i - \theta_u) \cdot 10^{-3}$ Kh $m^2 \cdot 10^{-3}$	$t_{\text{dag}} \cdot \Sigma A_X \cdot (\theta_i - \theta_u) \cdot 10^{-3}$ Kh $m^2 \cdot 10^{-3}$	$t_{\text{natt}} \cdot \Sigma A_X \cdot (\theta_i - \theta_u) \cdot 10^{-3}$ $\Delta k = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ kWh
J	23,5	6,5/17,5	8,46	2,29	7,40
F	23,8	9 /15	8,57	3,31	6,43
M	21,2	11,5/12,5	7,63	3,66	4,77
A	15,8	14 /10	5,69	3,32	2,84
M	10,0	17 / 7	3,60	2,55	1,26
J	5,3	18,5/ 5,5	1,91	1,47	0,53
J	2,4	17,5/ 6,5	0,86	0,63	0,28
A	3,6	15 / 9	1,30	0,81	0,58
S	8,0	12,5/11,5	2,88	1,50	1,66
O	13,2	9,5/14,5	4,75	1,88	3,45
N	17,5	7 /17	6,30	1,84	5,35
D	20,4	5 /19	7,34	1,53	6,98

Månad	Antal dagar/månad		
	hel- klara	halv- klara	mulna
J	2,9	9,1	19,0
F	3,2	8,6	16,2
M	6,6	10,9	13,5
A	4,9	14,2	10,9
M	7,3	14,7	9,0
J	5,8	16,1	8,1
J	5,9	16,8	8,3
A	5,3	16,4	9,3
S	4,3	14,9	10,8
O	3,6	11,8	15,6
N	2,0	7,6	20,4
D	1,9	8,0	21,1

Månad  $w_{Xt1}$ , transmitterad solvärme genom en 3 mm enkelglasruta, Wh/m<sup>2</sup>d, latitud 60°N

	helklart			halvklart			mulet		
	S	O,V	N	S	O,V	N	S	O,V	N
J	1925	291	90	1171	217	99	273	92	70
F	3753	1061	270	2379	785	317	625	323	235
M	4752	2216	551	3200	1665	671	987	697	509
A	4655	3432	932	3431	2651	1141	1299	1153	868
M	4228	4370	1679	3399	3431	1790	1518	1526	1216
J	3972	4782	2296	3357	3793	2265	1628	1713	1425
J	4058	4647	2082	3365	3667	2095	1584	1643	1346
A	4427	3940	1260	3404	3059	1433	1402	1338	1031
S	4749	2758	706	3326	2100	867	1126	895	662
O	4301	1506	382	2795	1125	457	785	470	344
N	2694	548	147	1660	401	166	403	164	120
D	1399	180	57	841	132	60	190	55	42

$\Sigma w_{Xt1} \cdot A_X \cdot 10^{-3}$   
h u s 1

$\Sigma w_{Xt1} \cdot A_X \cdot 10^{-3}$   
h u s 2

	helklart			halvklart			mulet		
	kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d	kWh/d
J	16,3	10,2	2,7	8,7	5,8	1,9			
F	34,9	23,0	7,0	21,6	15,2	5,5			
M	49,8	35,0	12,3	35,9	26,6	10,8			
A	56,9	43,4	18,0	47,6	37,6	16,9			
M	60,4	48,8	22,4	57,1	42,9	21,9			
J	61,9	51,3	24,6	61,8	51,0	24,6			
J	61,4	50,4	23,8	60,2	49,4	23,6			
A	58,7	46,0	20,1	52,5	42,0	19,3			
S	53,2	38,8	14,8	41,2	31,5	13,4			
O	41,9	28,4	9,2	27,6	19,9	7,6			
N	23,7	15,1	4,2	13,5	9,1	3,0			
D	11,7	7,2	1,8	6,0	3,9	1,2			

Areor:  
hus 1      S      Ö+V      N  
              7,5      6      1,5      m<sup>2</sup>  
hus 2      3      9      3      m<sup>2</sup>

2-GLAS

 $F_1 = 0,9; \Delta k = 2,4$ 

Hus 1	Månad	W, ständigt inrullad gardin			Värme- behov kWh/d	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa kWh
		helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	- 5,6	-11,1	-17,9	78,3	- 5,6	-11,1	-17,9	-457	
F	10,8	0,1	-14,3	79,4	10,8	0,1	-14,3	-196	
M	26,5	13,2	- 7,2	69,0	26,5	13,2	- 7,2	222	
A	37,6	25,4	2,5	47,3	37,6	25,4	2,5	572	
M	45,7	35,3	11,5	24,1	24,1	24,1	11,5	634	
J	51,1	41,6	17,6	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	53,2	43,3	19,4	0	0	0	0	0	
A	53,9	38,3	15,0	0	0	0	0	0	
S	41,0	28,0	6,4	16,1	16,1	16,1	6,4	378	
O	26,3	14,2	- 3,1	36,9	26,3	14,2	- 3,1	214	
N	6,2	- 1,5	-11,3	54,2	6,2	- 1,5	-11,3	-230	
D	- 7,1	-11,1	-16,0	65,8	- 7,1	-11,1	-16,0	-440	
								$\Sigma$ 856	

Hus 2	Månad	W, ständigt inrullad gardin			Värme- behov kWh/d	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa kWh
		helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	-12,5	-15,1	-18,6	78,3	-12,5	-15,1	-18,6	-527	
F	- 1,1	- 6,9	-15,6	79,4	- 1,1	- 6,9	-15,6	-316	
M	14,0	5,6	- 8,6	69,0	14,0	5,6	- 8,6	37	
A	29,2	20,2	1,6	47,3	29,2	20,2	1,6	447	
M	42,8	30,0	11,1	24,1	24,1	24,1	11,1	630	
J	51,0	41,3	17,6	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	52,1	42,4	19,2	0	0	0	0	0	
A	44,1	34,7	14,2	0	0	0	0	0	
S	30,2	21,4	5,1	16,1	16,1	16,1	5,1	364	
O	13,4	6,5	- 4,6	36,9	13,4	6,5	- 4,6	53	
N	- 3,0	- 6,9	-12,4	54,2	- 3,0	- 6,9	-12,4	-311	
D	-12,2	-14,1	-16,5	65,8	-12,2	-14,1	-16,5	-484	
								$\Sigma$ 52	

2-GLAS, FAST FOLIE.  $F_1 = 0,6$ ;  $\Delta k = 1,2$ 

Hus 1	Månad	W, ständigt			Värme- behov	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa
		helklart	halvklart	gardin mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	- 0,4	- 4,0	- 8,5	78,3	- 0,4	- 4,0	- 8,5	-199	
F	10,7	3,5	- 6,1	79,4	10,7	3,5	- 6,1	- 34	
M	20,7	11,8	- 1,8	69,0	20,7	11,8	- 1,8	241	
A	27,3	19,2	4,0	47,3	27,3	19,2	4,0	450	
M	31,9	25,0	9,1	24,1	24,1	24,1	9,1	612	
J	34,8	28,5	12,5	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	35,8	29,2	13,2	0	0	0	0	0	
A	33,7	26,0	10,5	0	0	0	0	0	
S	28,5	19,8	5,4	16,1	16,1	16,1	5,4	367	
O	19,4	11,3	- 0,2	36,9	19,4	11,3	- 0,2	200	
N	6,7	1,5	- 5,0	54,2	6,7	1,5	- 5,0	- 77	
D	- 1,8	- 4,5	- 7,7	65,8	- 1,8	- 4,5	- 7,7	-202	
							$\Sigma$	1517	

Hus 2	Månad	W, ständigt			Värme- behov	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa
		helklart	halvklart	gardin mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	- 4,9	- 6,7	- 9,0	78,3	- 4,9	- 6,7	- 9,0	-246	
F	9,2	- 1,2	- 7,0	79,4	9,2	- 1,2	- 7,0	- 94	
M	12,4	6,8	- 2,7	69,0	12,4	6,8	- 2,7	120	
A	21,7	15,7	3,3	47,3	21,7	15,7	3,3	365	
M	29,9	21,4	8,8	24,1	24,1	21,4	8,8	570	
J	34,8	28,3	12,5	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	35,1	28,6	13,1	0	0	0	0	0	
A	29,9	23,6	10,0	0	0	0	0	0	
S	21,3	15,4	4,6	16,1	16,1	15,4	4,6	348	
O	10,9	6,2	- 1,1	36,9	10,9	6,2	- 1,1	95	
N	0,5	- 2,1	- 5,8	54,2	0,5	- 2,1	- 5,8	-133	
D	- 5,2	- 6,5	- 8,1	65,8	- 5,2	- 6,5	- 8,1	-233	
							$\Sigma$	951	

2-GLAS, MANÖVRERBAR FOLIE.

 $F_1 = 0,9; \Delta k = 2,4$   
 $0,6 \quad 1,2$ 

Hus 1	Månad	W, dag/natt reglerad gardin			Värme- behov kWh/d	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa kWh
		helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	1,8*	- 3,7*	- 8,5	78,3	1,8	- 3,7	- 8,5	-190	
F	17,3*	6,6*	- 6,1	79,4	17,3	6,6	- 6,1	13	
M	31,3*	17,9*	- 1,8	69,0	31,3	17,9	- 1,8	377	
A	40,4*	28,3*	5,4*	47,3	40,4	28,3	5,4	659	
M	47,0*	36,5*	12,8*	24,1	24,1	24,1	12,8	645	
J	51,7*	42,1*	18,1*	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	53,5*	43,6	19,6*	0	0	0	0	0	
A	50,3*	38,9*	15,6*	0	0	0	0	0	
S	44,3*	29,7*	8,1*	16,1	16,1	16,1	8,1	397	
O	29,7*	17,6*	0,3*	36,9	29,7	17,6	0,3	319	
N	11,6*	3,8*	- 5,0	54,2	11,6	3,8	- 5,0	- 50	
D	- 0,1*	- 4,2*	- 7,7	65,8	- 0,1	- 4,2	- 7,7	-196	
							$\Sigma$	2133	

En punkt efter värdet markerar inrullad folie

Hus 2	Månad	W, dag/natt reglerad gardin			Värme- behov kWh/d	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa kWh
		helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	- 5,7	- 6,7	- 9,0	78,3	- 5,7	- 6,7	- 9,0	-248	
F	5,3*	- 0,5*	- 7,0	79,4	5,3	- 0,5	- 7,0	-101	
M	18,8*	10,4*	- 2,7	69,0	18,8	10,4	- 2,7	201	
A	32,0*	23,0*	4,4*	47,3	32,0	23,0	4,4	531	
M	44,0*	31,2*	12,3*	24,1	24,1	24,1	12,3	641	
J	51,6*	41,8*	18,1*	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	52,4*	42,7*	19,4*	0	0	0	0	0	
A	44,7*	35,3*	14,8*	0	0	0	0	0	
S	31,8*	23,1*	6,8*	16,1	16,1	16,1	6,8	383	
O	16,9*	9,9*	- 1,1*	36,9	16,9	9,9	- 1,1	160	
N	2,4*	- 1,6*	- 5,8	54,2	2,4	- 1,6	- 5,8	-126	
D	- 5,2	- 6,5	- 8,1	65,8	- 5,2	- 6,5	- 8,1	-233	
							$\Sigma$	1367	

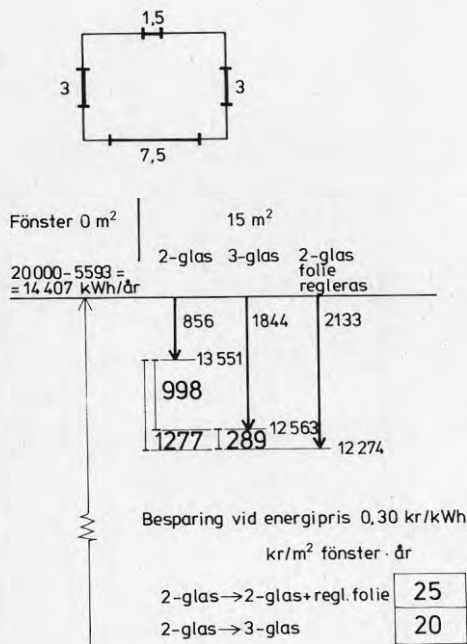
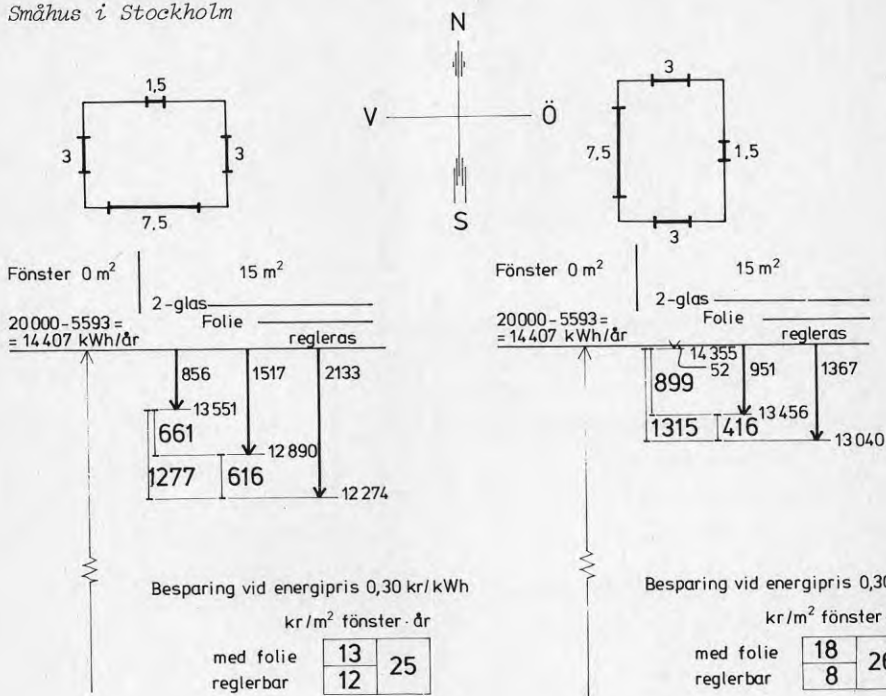
3-GLAS  $F_1 = 0,8; \Delta k = 1,5$ 

Hus 1	Månad	- W -			Värme- behov kWh/d	Min. (W, värmebehov)			D:o månads- summa kWh
		helklart	halvklart	mulet		helklart	halvklart	mulet	
		kWh/d	kWh/d	kWh/d		kWh/d	kWh/d	kWh/d	
J	0,4	- 4,5	-10,5	78,3	0,4	- 4,5	-10,5	-239	
F	15,1	- 5,5	- 7,3	79,4	15,1	5,5	- 7,3	- 23	
M	28,4	16,6	- 1,6	69,0	28,4	16,6	- 1,6	347	
A	37,0	26,2	5,9	47,3	37,0	26,2	5,9	618	
M	42,9	33,6	12,5	24,1	24,1	24,1	12,5	643	
J	46,7	38,2	16,8	5,3	5,3	5,3	5,3	159	
J	47,8	39,0	17,8	0	0	0	0	0	
A	45,0	34,8	14,1	0	0	0	0	0	
S	38,2	26,7	7,5	16,1	16,1	16,1	7,5	390	
O	26,4	15,6	0,2	36,9	26,4	15,6	0,2	282	
N	9,5	2,6	- 6,1	54,2	9,5	2,6	- 6,1	- 86	
D	- 1,6	- 5,2	- 9,6	65,8	- 1,6	- 5,2	- 9,6	-247	
								$\Sigma$ 1844	



Beräkningsresultaten sammanfattade

Småhus i Stockholm



#### 4.2.1 Några specialstudier av generellt intresse i anslutning till småhusexemplet

I föregående två beräkningsexempel har beräkningarna genomförts manuellt och med hjälp av nya tabeller (från institutionen för byggnadsteknik, KTH) över totalt transmitterad solvärme per dygn genom ett 3 mm enkelglas. Förutom det primära syftet, att med jämförelser mellan några olika fönsterkonstruktioner i ett par exemplifierade situationer visa möjliga energibesparingar med fristående lågemissionsfolier i fönsterspalten, har de genomgångna exemplen även demonstrerat den manuella beräkningsgången och tillämpningen av nämnda solinstrålningstabeller.

Beräkningar av energibesparingar eller förluster från fönster i byggnader kan även utföras med det vid institutionen för byggnadsteknik, KTH, utvecklade datorprogrammet AUTSOL, av vilket det nu bl.a. finns en vidareutvecklad s.k. fönsterversion.

Resultat från manuella beräkningar och datorberäkningar har använts här i några intressanta jämförelser. Den första jämförelsen avser beräkning av total transmitterad solstrålning per dygn genom fönster under helklara, halvklara och mulna dagar, med manuell metod och med dator. Ingen nämnvärd skillnad mellan resultaten är att vänta eftersom beräkningsalgoritmerna är så snarlika. I den manuella metoden är avskärmningsfaktorn oberoende av fördelningen mellan riktad och diffus instrålning medan datorprogrammet särskiljer riktad och diffus transmitterad solvärme.

Samma jämförelser har gjorts för två olika fönsterkonstruktioner, vanligt 2-glasfönster och 2-glasfönster med fast lågemissionsfolie i spalterna, vertikalt riktade mot söder, öster/väster och norr. Resultatet av jämförelserna kan sammanfattas med att en mycket god överensstämmelse råder. Största avvikelserna är endast några få procent. Med andra ord kan *manuella beräkningar och datorberäkningar i kvalitetsavseende anses vara ungefär likvärdiga.*

Nästa frågeställning lyder: Hur mycket i besparad eller förlorad energi kan det skilja mellan tillämpningar av några olika reglerinstruktioner? Utgående från småhusexemplet har tre olika reglerinstruktioner behandlats. Dessa är

- A. alla folier regleras samtidigt och lika, reglering sker endast morgon och kväll vid behov

- B. varje folie regleras individuellt, reglering sker endast morgon och kväll vid behov
- C. varje folie regleras individuellt, reglering sker timme för timme vid behov (kontinuerlig reglering).

I tabell 4.2 har sammanställts resultaten för hus 1 och 2 och reglerinstruktionerna A och C. Skillnaderna är små, som framgår av tabellen, ca 5 % eller ca 5 kWh per m<sup>2</sup> fönster och år. Rent logiskt följer att alternativ B måste skilja mindre från A och C.

Av detta kan man dra följande slutsatser:

- \* Det ger ingen större vinst att i stället för den enkla reglerinstruktionen A eller B välja en mera komplicerad. Man kan även tolka detta så att det inte krävs någon perfektion hos regleringen vilket passar väl för manuell manövrering. Naturligtvis förutsätts att reglerinstruktionerna verkligen följs även om dessa kan utformas som enkla tumregler refererande till dagtyp med avseende på solinstrålning, årstid och fönsterorientering.
- \* Vid beräkning av förväntade energibesparingar eller förluster spelar det ingen större roll för resultatet enligt vilken modell regleringen antas. Programmet AUTSOL räknar f.n. endast enligt modell C. Tidigare när nämnts att beräkningar av total transmitterad solvärme genom fönster skiljer inte nämnvärt mellan manuell beräkning och datorberäkning. Detta har gjort det möjligt att här jämföra manuellt beräknad modell A med datorberäknad modell C. Således kan *beräkningar med AUTSOL accepteras gälla generellt* för alla tre reglermodellerna.

Den sista specialstudien behandlar inverkan på energibalansen av transmitterad solvärme genom fönster med manövrerbara folier i reglerläget "utrullad folie".

Total transmitterad solstrålning per dygn genom ett 2-glasfönster med manövrerbar folie har med AUTSOL-programmet beräknats dels med riktiga soltransmissionsdata för den studerade folien och dels med antagen soltransmission 0 vid utrullad folie. Beräkningarna har omfattat de tre dagtyperna helklara, halvklara och mulna dagar för varje månad vid fönsterorienteringarna vertikal söder, öster/väster och norr. Jämförelser av beräkningsresultaten visar att *soltransmissionen vid utrullad folie har en mycket liten betydelse i det fall att solavskärmningen vid utrullad folie skiljer sig så mycket från solavskärmningen vid inrullad folie* som i dessa beräkningar. Perioder med låg men ej försumbar solinstrålning i kombination med reglerläget utrullad folie synes av beräkningarna ha mycket liten varaktighet.

Tabell 4.2. *Energibesparingar eller förluster från fönster med reglerinstruktionerna A och C för hus 1 (dominerande fönsterorientering söder) och hus 2 (dominerande fönsterorientering öster/väster).*

*Reglerinstruktion A: Alla folier regleras samtidigt och lika, reglering sker endast morgon och kväll vid behov.*

*C: Varje folie regleras individuellt, reglering sker timme för timme vid behov (kontinuerlig reglering).*

Månad	H u s 1		H u s 2	
	Regl. A	Regl. C	Regl. A	Regl. C
J	-190	-173	-248	-236
F	13	28	-101	- 83
M	377	396	201	218
A	659	662	531	539
M	645	646	641	642
J	159	159	159	159
J	0	0	0	0
A	0	0	0	0
S	397	396	383	383
O	319	328	160	170
N	- 50	- 43	-126	-116
D	-196	-188	-233	-227
	<u>2133</u>	<u>2211</u>	<u>1367</u>	<u>1449</u>

Eftersom de beräknade värdena av total transmitterad solstrålning per dygn skiljer så lite mellan de två antagandena, följer logiskt att även fortsatta beräkningar av energibesparingar eller förluster ger nästan samma resultat.

Det kan vid energibalansberäkningar vara underlättande att inte behöva bestämma soltransmissionsdata för fönstret med utrullad folie då sådana inte är givna, utan antaga fullständig solavskärmning, eftersom bestämningen av dessa data kan vara besvärlig. Man måste dock känna till så pass mycket om folien att man kan avgöra om en sådan förenkling är godtagbar. Man kan då t.ex. göra ett par provberäkningar med olika antagna soltransmissionsdata, så valda att data för fönstret med den aktuella folien innesluts, och studera skillnader mellan beräkningsresultaten.

#### 4.3 Generella besparings-/förlust-diagram för några olika fönsterkonstruktioner mot olika väderstreck i till 20°C uppvärmda byggnader med olika fördelning av uppvärmningsbehovet över året

I detta avsnitt visas beräkningar av energibesparingar eller förluster från fönster under varierande förutsättningar. Samtliga resultat baseras på klimatdata för Stockholm. I denna parameterstudie har hela fönsterarean alternativa orienteringar mot söder, öster/väster och norr. Fönstren är alltid vertikala.

De tillgodogjorda solvärmemängderna är beräknade med antagen värmelagringskapacitet i byggnaden för endast dygnsutjämning av den inkommande energin. En konsekvens av detta antagande är att tidpunkten på dygnet då en viss mängd energi kommer in saknar betydelse, och således kan av symmetriskäl orienteringarna öster och väster behandlas som lika. Här bortses från eventuella systematiska olikheter av molnighetsförhållanden osv.

Beräkningarna för de tre nämnda orienteringarna beskriver väl det möjliga variationsområdet med fönster mot samtidigt flera olika riktningar i en byggnad.

Själva byggnaden behöver för beräkningarna inte specificeras mera än att ett värmebehov kan fastställas. Man kan dessutom inse att om värmebehovet ändras med en skalfaktor och fönsterarean med samma skalfaktor så ändras även energibesparingen eller förlusten med denna skalfaktor. I redovisningen har därför värmebehoven och fönsterareorna uttryckts per MWh årsvärmeförluster för byggnaden. 1 MWh årsvärmeförluster motsvaras av byggnadens förlustkoefficient 8,35 W/K i Stockholm med normalårets utetemperaturer (1931-60) och inomhustemperaturen 20°C. Transmissions- och ventilationsförlusterna antas vara proportionella mot gradtímetalet varvid förlustkoefficienten antas vara konstant under hela året (utnyttjad byggnadsvolym, ventilationsgrad osv. oförändrad). Byggnadens yttertor antas vara ljusa med försumbar absorption av solstrålning. Därför har ingen minskning av förlusterna förutsatts av solinstrålning mot tak och ytterväggar.

Förlusten per dygn antas under månaden vara konstant. Följande värden ger årsvärmeförlusten 1 MWh:



mån.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
förlust kWh/ dygn	4,71	4,77	4,25	3,17	2,01	1,06	0,48	0,72	1,60	2,65	3,51	4,09

Värmebehovet erhålles efter att från värmeförlusten subtrahera basvärmetillskottet (värmetillskott från verksamhet i byggnaden t.ex. hushållsel, personvärme osv.). Dock får värmebehovet lägst ha värdet 0. Basvärmetillskottet per dygn antas vara konstant över hela året uttryckt per MWh årsvärmeförluster.

3 olika alternativa basvärmenivåer har antagits: mycket låg, 0,4 kWh/d/MWh; medelhög, 1,0 kWh/d/MWh och mycket hög, 2,5 kWh/d/MWh.

De så bestämda värmebehoven får gälla vid fönsterarean 0. I förhållande till dessa värmebehov har beräknats värmebesparing eller förluster från ett fönster med arean  $A \text{ m}^2/\text{MWh}$ , som antas ersätta en vägg med k-värdet  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Arean  $A$  har i beräkningarna varierats från 0 till  $3,5 \text{ m}^2/\text{MWh}$ . Hänsyn har tagits till att basvärmeöverskott kan vid behov minska värmeunderskott från fönster. Valet av referensväggs k-värde utgör en kompromiss som kan motiveras så att för en annan vägg med högre k-värde förbättras fönstrets relativa värmebalans varvid de här beräknade värdena utgör resultat på den s.k. säkra sidan. Mycket lägre värmemotstånd än 0,3 förekommer inte. De bästa väggarna har k-värden  $0,15$  à  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Den lilla skillnaden till  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  kan försummas i detta sammanhang.

Genom att på beskrivet vis variera fönsterorienteringar och basvärmenivåer har praktiskt taget alla typer av byggnader uppvärmda till  $20^\circ\text{C}$  i stockholmsklimat täckts in.

Sju olika fönsterkonstruktioner har behandlats. Var och en av dessa beskrivs med tre faktorer varav en utgör k-värdet. De övriga två är:

- A1 andel absorberad riktad kortvågig strålning (solstrålning) vid vinkelrätt infall som tillförts rummet
- A2 andel absorberad diffus kortvågig strålning som tillförts rummet.

För manövrerbara fönsterkonstruktioner behövs två uppsättningar av dessa faktorer för var sitt reglerläge. Följande värden på dessa faktorer har bestämts och använts i de fortsatta beräkningarna:



Fönsterkonstruktion	läge 1	A1	läge 2	A1	
		A2		A2	
		k, W/m <sup>2</sup> K		k, W/m <sup>2</sup> K	
① 2-glas, vanligt		0,80			
		0,71			
		2,7			
② 2-glas med fast folie mitt i spalten, folie- ytornas emissivitet $\epsilon = 0,35$ resp. $0,63$		0,55			
		0,49			
		1,5			
③ 2-glas med manövrerbar folie mitt i spalten, folieytornas emissivi- tet $\epsilon = 0,35$ resp. $0,63$		0,55		0,80	
		0,49		0,71	
		1,5		2,7	
④ 3-glas, vanligt		0,73			
		0,65			
		1,8			
⑤ 2-glas med manövrerbar folie mitt i spalten, folieytornas emissivi- tet $\epsilon = 0,26$ resp. $0,26$		0,43		0,80	
		0,40		0,71	
		1,2		2,7	
⑥ 2-glas med manövrerbar tilläggsisolering som ger referensväggens k-värde		0		0,80	
		0		0,71	
		0,3		2,7	
⑦ 3-glas med manövrerbar folie mitt i ena spalten, folieytornas emissivitet $\epsilon = 0,35$ resp. $0,63$		0,47		0,73	
		0,43		0,65	
		1,1		1,8	

De givna värdena är att betrakta som typiskt representativa även om andra i varierande grad avvikande värden kan vara aktuella i andra sammanhang.

Normalt förekommande glaskvaliteter i vanliga 2-glas- och 3-glasfönster medför värden på faktorerna A1 och A2 i nära anslutning till de här beräknade. k-värdena kan variera någon tiondel beroende på spaltbredder och temperaturförhållanden.

Materialdata för folier kan skilja en del mellan olika produkter. A1, A2 och k-värdena för fönsteralternativen nr ②, ③ och ⑦ med en vald folie är beräknade utgående från vissa givna materialdata för folien kompletterade med egna experimentella bestämningar (se föregående kapitel). Till materialdata hör uppgifter om emissiviteten. De

ovan givna värdena på emissiviteten, 0,35 resp. 0,63, har erhållits efter en egen spektrometrisk undersökning på institutet för optisk forskning, KTH. I en annan egen spektrometrisk undersökning med annan utrustning på institutionen för fysikalisk kemi, KTH, har erhållits värdena 0,29 resp. 0,66. Fabrikanten har endast angivit värdet på den lågemitterade sidan, 0,26. De olika värdena visar på en viss osäkerhet i bestämningen men det visar sig att denna osäkerhet inte på något avgörande vis påverkar beräkningen av  $k$ -värdena.

Folien i fönsteralternativ (5) är en tänkt produkt med lågemissions-skikt på båda sidor. Beräkningen av faktorerna  $A_1$  och  $A_2$  är här något osäkrare än för den förstnämnda folien men detta har praktiskt taget ingen inverkan på beräkningsresultatet.

Några ytterligare förutsättningar vid beräkningarna av energibesparingar eller förluster:

Latituden har satts vara  $60^{\circ}\text{N}$  vid solinstrålningsberäkningar.

Markens reflexionsfaktor har för hela året antagits vara 0,20, ett allmänt accepterat genomsnittsvärde.

Horisontavskärmningen har antagits till  $10^{\circ}$  över horisonten. Detta märks mest under tiden nov.-jan. men har endast liten inverkan på årsresultatet.  $10^{\circ}$  kan anses som ett typiskt värde i mera tätbebyggda områden.

Molnighetsförhållandena som bestämmer antalet helklara, halvklara och mulna dagar per månad har valts för perioden 1931-60 från "Klimatdata för Sverige", Taesler (1972). Som alternativ kunde perioden 1958-71 valts. Denna period har analyserats i ett tidigare arbete (Girido, 1982). Jämförelser av beräknad solinstrålning under de två perioderna visar att under uppvärmningssäsongen spelar det en mindre roll vilken period som väljs. Eftersom data för utelufttemperaturen valts för perioden 1931-60 har även molnigheten valts för samma period.

Vid beräkningen av värmeförluster från fönster har ingen hänsyn tagits till utelufttemperaturens variation under dygnet.

Beräkningarna av energibesparingar eller förluster har genomförts med institutionens datorprogram AUTSOL (en fönsterversion från dec. 1983) på Energimätcentralens dator vid KTH. Beräkningsmetoden och tillämpningar har beskrivits i tidigare arbeten (Girido, 1978; Girido, 1981; Girido, 1983).

Beräkningsresultaten framgår av figur 4.2.

Storheterna i figuren kan översättas genom en skalfaktor för att passa en bestämd byggnad på följande vis.

För den betraktade byggnaden måste förlustkoefficienten  $F$  bestämmas. Den kan t.ex. beräknas enligt

$$F = \sum k_v \cdot A_v + c \cdot \gamma \cdot n \cdot V, \quad \text{W/K}$$

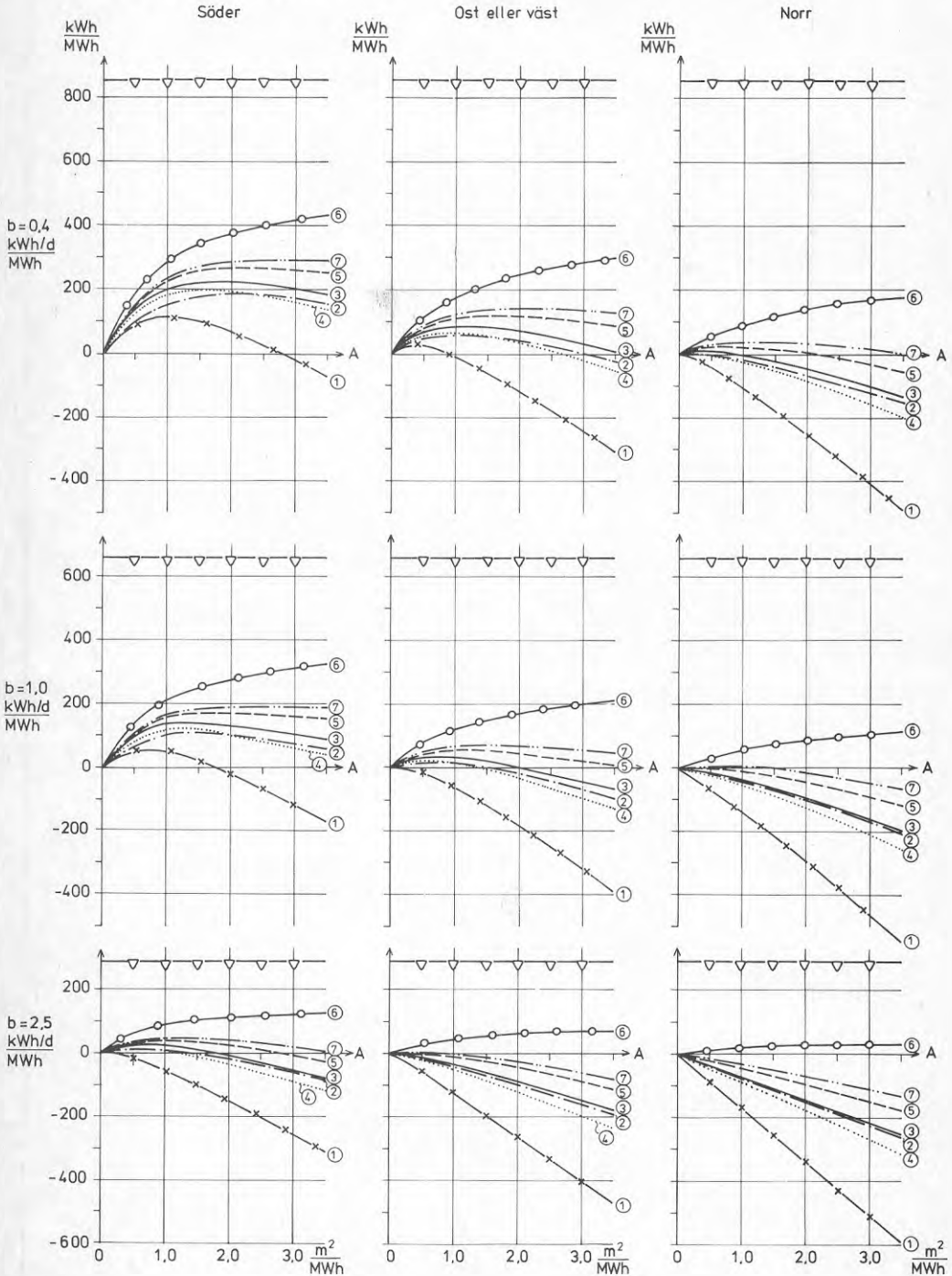
där första termen betyder produktsumman av byggnadens samtliga ytterkonstruktioners  $k$ -värden ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) och areor ( $\text{m}^2$ ) och den andra termen står för luftomsättningen i byggnaden ( $c \cdot \gamma =$  luftens värmekapacitet ( $\approx 0,36 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ ),  $n =$  antalet luftomsättningar ( $\text{h}^{-1}$ ),  $V =$  byggnadens inre volym ( $\text{m}^3$ )). Totala fönsterarean antas här ersatt med vägg,  $k$ -värde  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Skalfaktorn är antalet MWh transmissions- och ventilationsförluster som beräknas:  $F/8,354$ .

Samtliga storheter uttryckta per MWh transmissions- och ventilationsförluster under året, motsvarande byggnadens förlustkoefficient 8,354 W/K.

Dygnsutjämnning av infångad solvärme. Därutöver ingen lagring.

Horisontavskärning  $10^{\circ}$ .



## FÖNSTERTYPER

- ① -x-x- 2-glas
- ② ----- 2-glas med fast folie mitt i spalten, folieytornas emissivitet  $\epsilon = 0,35$  resp.  $0,63$
- ③ ——— 2-glas med manövrerbar folie mitt i spalten, folieytornas emissivitet  $\epsilon = 0,35$  resp.  $0,63$
- ④ ..... 3-glas
- ⑤ ---- 2-glas med manövrerbar folie mitt i spalten, folieytornas emissivitet  $\epsilon = 0,26$  resp.  $0,26$
- ⑥ ○-○- 2-glas med manövrerbar tilläggsisolering som ger referensväggens  $k$ -värde  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ⑦ ----- 3-glas med manövrerbar folie mitt i ena spalten, folieytornas emissivitet  $\epsilon = 0,35$  resp.  $0,63$

## VÄRMEBEHOV VID FÖNSTERAREAN 0



Figur 4.2. Beräknad värmebesparing eller värmeförlust från olika fönster relativt en vägg ( $k = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) i en byggnad i Stockholm. Hela fönsterarean  $A$  är riktad mot något av de fyra alternativa huvudväderstrecken. Eftersom dygnsutjämning av infångad solenergi antages, täcker de givna resultaten in variationsbredden från valfritt fördelade och orienterade fönster. Skilda fördelningar av värmebehovet över året hos olika byggnader representeras av tre olika basvärmenivåer ( $b$ ). Samtliga storheter är uttryckta per MWh transmissions- och ventilationsförluster under året. 1 MWh motsvarar byggnadens förlustkoefficient  $8,354 \text{ W/K}$ . Återstående värmebehov kan avläsas som skillnaden mellan kurvorna för värmebehov vid fönsterarean 0 och för en vald fönstertyp.

#### 4.3.1 Slutsatser av parameterstudien

- \* Om utgångsläget är nyprojektering av en byggnad, ska fönster väljas med avseende på orientering, konstruktion och areor och jämföras med referensväggen.

Fönsterarean bör begränsas till liten storlek mot nordliga orienteringar samt överhuvudtaget vid hög basvärmenivå.

Vilken av de olika fönsterkonstruktionerna som bör väljas kan avgöras i en kalkyl innehållande energikostnaden t.ex. utifrån figurens kurvor och antaget energipris samt kapital- och underhållskostnader.

- \* Om utgångsläget är en befintlig byggnad, är fönstrens orienteringar givna. Även fönsterareorna är givna men man kan dock överväga att lägga igen onödigt stora fönster. Befintlig fönsterkonstruktion är vanligtvis ett 2-glasfönster eller ett 3-glasfönster. Av kurvorna i figuren kan utläsas under vilka förutsättningar en acceptabel energibesparing kan förväntas efter kompletterande åtgärd av fönsterkonstruktionen. Som ett grovt riktmått torde kunna anges ca  $80 \text{ kWh/m}^2$  år som en lägsta acceptabel besparing för att en kompletterande åtgärd ska ha någon möjlighet att betala sig utan exceptionellt goda finansieringsvillkor.
- \* För ett ursprungligt 2-glasfönster överstiger besparingen  $80 \text{ kWh/m}^2$  år vid övergång till valfri konstruktion av de medtagna vid orienteringarna ost/väst och norr. Mot söder når besparingen inte upp till mer än ca  $60 \text{ kWh/m}^2$  år vid övergång till alternativet 3-glasfönster. Vid låg basvärmenivå och riktning mot söder uteblir nämnvärd besparing vid liten fönsterarea efter komplettering med fast folie av typen enligt nr (2). Den fasta folien enligt nr (2) är bättre än 3-glasalternativet mot norr, vid hög basvärmenivå även i övriga orienteringar och dessutom allmänt vid stora eller mycket stora fönsterareor. Mot söder understiger besparingen dock åtskilligt den målsatta nivån  $80 \text{ kWh/m}^2$  år.
- \* Betydelsen av att folien är manövrerbar i stället för fast framgår efter jämförelse mellan nr (2) och nr (3). Regleringen av folien ger störst besparing vid små och måttligt stora fönsterareor mot söder vid låg basvärmenivå. Vid hög basvärmenivå samt allmänt vid orientering mot norr är skillnaden liten och utan betydelse. Regleringen av folien medför att besparingen i förhållande till ett ursprungligt



2-glasfönster når upp till ca 80 à 90 kWh/m<sup>2</sup> år mot söder. Även i övriga fall uppnås godtagbar besparing, dock som nämnts med liten skillnad i förhållande till fast folie nr (2).

- \* Ett alternativ med en förbättrad folie med dubbelsidiga lågemissions-egenskaper, nr (5), i stället för nr (3), ger en ytterligare besparing av ca 20 kWh/m<sup>2</sup> år.
- \* Ungefär samma prestanda eller något bättre visar alternativet nr (7) med 3-glasfönster försett med en manövrerbar folie av det förstnämnda slaget (enkelsidigt lågemitterande). Utgående från ett vanligt 3-glasfönster, alt. (4), blir besparingen efter komplettering med folien till alt. (7) inte större än 40 à 60 kWh/m<sup>2</sup> år. De högre värdena återfinnes vid låg basvärmenivå och nordlig orientering, de lägre vid hög basvärmenivå och sydlig orientering.
- \* Alternativ nr (6) representerar här inte någon konkret konstruktionslösning till skillnad mot de övriga alternativen. Detta alternativ ska främst uppfattas som en övre teoretisk gräns för möjlig besparing hos 2-glasfönster. Jämfört med besparingen enl. alt. (6) uppnås med alternativ (3) ungefär halva denna besparing.

Sammanfattningsvis framstår manövrerbarhet hos en fönsterfolie som betydelsefull från energibesparingssynpunkt främst vid kombinationen låg basvärmenivå och sydlig orientering. I övriga orienteringar spelar manövrerbarheten mera en psykologisk roll genom att den som vistas i rummet har valmöjlighet att rulla in folien om den för tillfället skulle upplevas som störande.

Komplettering av ett ursprungligen vanligt 2-glasfönster med en manövrerbar folie ger en acceptabel energibesparing medan det är mera tveksamt med den energibesparing som uppnås då ett vanligt 3-glasfönster kompletteras med samma folie.

Förbättrade emissivitetsegenskaper hos en folie ger en jämförelsevis liten ökning av energibesparingen. En sådan folie får således inte vara märkbart dyrare än en enklare. Någon större utseendemässig försämring (förmörkning) kan därför inte heller accepteras.

I alla beräkningar har förutsatts att fönstren har ett fritt läge. Vid fönster nära hörn i vinklade byggnader eller med avskärmande

byggnader m.m. framför spelar naturligtvis solinstrålningen en mindre roll. I sådana situationer uppnås energibesparingar eller -förluster ungefär så som resultaten visas för nordliga orienteringar.

Om intresset fokuseras mot 2-glasfönster, kan man för detta konstatera att besparingen efter en komplettering med en manövrerbar folie generellt kan sammanfattas med 80-90 kWh per  $m^2$  fönster och år. Om energipriset antas till 0,30 kr/kWh, utgör besparingen således ca 25 kr/ $m^2$  fönster och år. Vid jämförelse med alternativet en tredje glasruta synes det rimligt att antaga lägre investeringskostnader för foliealternativet och eftersom foliealternativet dessutom ger större energibesparing, framstår detta som en möjlig konkurrenskraftig lösning.

Till de energibesparingar som kan utläsas från figur 4.2 bör i en ekonomisk kalkyl fogas den energibesparing som följer av att rumstemperaturen kan sänkas utan att rumskomforten (riktade operativa temperaturen) försämras. Samtidigt kan i många fall den utnyttjbara vistelsezonen i rummet utvidgas mot fönstren eftersom fönstrens yttemperaturer mot rummet blivit högre.

## FELKALKYL FÖR EXPERIMENTELL K-VÄRDESBESTÄMNING

2-glasfönster med plastfolie av lågmissionstypTemperaturer, KAreor, m<sup>2</sup> (proj. i fönstrets plan)

Typiska värden	Bedömda maximalfel	Värden	Bedömda maximalfel
$\Delta\theta_G = 7,63$	$\delta\Delta\theta_G = 0,3$	$A_G = 0,697$	$\delta A_G = 0,01$
$\Delta\theta_B = 9,2$	$\delta\Delta\theta_B = 0,7$	$A_B = 0,156$	$\delta A_B = 0,02$
$\Delta\theta_K = 10,9$	$\delta\Delta\theta_K = 0,7$	$A_K = 0,164$	$\delta A_K = 0,02$
$\Delta\theta_P = 10,5$	$\delta\Delta\theta_P = 0,5$	$A_P = 0,049$	$\delta A_P = 0,01$
$\Delta\theta_V = 11,5$	$\delta\Delta\theta_V = 0,2$	$A_V = 0,497$	$\delta A_V = 0,02$

Konstruktionstjocklekar, mVärmeledningsförmåga, W/m K

Värden	Bedömda maximalfel	Värden	Bedömda maximalfel
$d_B = 0,062$	$\delta d_B = 0,001$	$\lambda_B = 0,14$	$\delta\lambda_B = 0,005$
$d_K = 0,104$	$\delta d_K = 0,001$	$\lambda_K = 0,14$	$\delta\lambda_K = 0,005$
$d_P = 0,104$	$\delta d_P = 0,001$	$\lambda_P = 0,14$	$\delta\lambda_P = 0,005$
$d_V = 0,100$	$\delta d_V = 0,002$	$\lambda_V = 0,046$	$\delta\lambda_V = 0,001$

Värmeflöde, Guarded hot box, WÖvrigt

Typiskt värde	Bedömt maximalfel	Värde	Bedömt maximalfel
$P = 22,29$	$\delta P = 0,2$	$\beta = 0,75$	$\delta\beta = 0,1$

Värmeflöde genom vägg, P<sub>V</sub>

$$P_V = A_V \cdot \Delta\theta_V \cdot \lambda_V / d_V = 2,63 \text{ W}$$

$$\left[ \frac{\delta P_V}{P_V} \right]^2 = \left[ \frac{\delta A_V}{A_V} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \Delta\theta_V}{\Delta\theta_V} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \lambda_V}{\lambda_V} \right]^2 + \left[ \frac{\delta d_V}{d_V} \right]^2$$

$$\left[ \frac{\delta P_V}{P_V} \right]^2 = \left[ \frac{0,02}{0,497} \right]^2 + \left[ \frac{0,2}{11,5} \right]^2 + \left[ \frac{0,001}{0,046} \right]^2 + \left[ \frac{0,002}{0,100} \right]^2$$

$$\delta P_V^2 = 0,0193 \quad , \quad \delta P_V = 0,14 \text{ W}$$

Värmefflöde genom bäge och karm,  $P_{B\&K}$ 

$$P_{B\&K} = (A_B \cdot \Delta\theta_B + A_K \cdot \Delta\theta_K) \cdot 2 \cdot \beta^{-1} \cdot (d_B \cdot \lambda_B^{-1} + d_K \cdot \lambda_K^{-1})^{-1} = 7,25 \text{ W}$$

$$\left[ \frac{\delta P_{B\&K}}{P_{B\&K}} \right]^2 = (A_B \cdot \Delta\theta_B + A_K \cdot \Delta\theta_K)^{-2} \cdot \left\{ (\Delta\theta_B \cdot \delta A_B)^2 + (A_B \cdot \delta \Delta\theta_B)^2 + (\Delta\theta_K \cdot \delta A_K)^2 + (A_K \cdot \delta \Delta\theta_K)^2 \right\} +$$

$$+ \left[ \frac{\delta \beta}{\beta} \right]^2 + \left[ \frac{d_B}{\lambda_B} + \frac{d_K}{\lambda_K} \right]^{-2} \cdot \left\{ \left[ \frac{\delta d_B}{\lambda_B} \right]^2 + \left[ \frac{d_B \cdot \delta \lambda_B}{\lambda_B^2} \right]^2 + \left[ \frac{\delta d_K}{\lambda_K} \right]^2 + \left[ \frac{d_K \cdot \delta \lambda_K}{\lambda_K^2} \right]^2 \right\}$$

$$\left[ \frac{\delta P_{B\&K}}{P_{B\&K}} \right]^2 = (0,156 \cdot 9,2 + 0,164 \cdot 10,9)^{-2} \left\{ (9,2 \cdot 0,02)^2 + (0,156 \cdot 0,7)^2 + (10,9 \cdot 0,02)^2 + \right.$$

$$\left. + (0,164 \cdot 0,7)^2 \right\} +$$

$$+ \left[ \frac{0,1}{0,75} \right]^2 + \left[ \frac{0,062}{0,14} + \frac{0,104}{0,14} \right]^{-2} \cdot \left\{ \left[ \frac{0,001}{0,14} \right]^2 + \left[ \frac{0,062 \cdot 0,005}{0,14^2} \right]^2 + \left[ \frac{0,001}{0,14} \right]^2 + \left[ \frac{0,104 \cdot 0,005}{0,14^2} \right]^2 \right\}$$

$$\delta P_{B\&K}^2 = 1,51 \quad , \quad \delta P_{B\&K} = 1,23 \text{ W}$$

Värmefflöde genom post,  $P_P$ 

$$P_P = A_P \cdot \Delta\theta_P \cdot \beta^{-1} \cdot \lambda_P \cdot d_P^{-1} = 0,92 \text{ W}$$

$$\left[ \frac{\delta P_P}{P_P} \right]^2 = \left[ \frac{\delta A_P}{A_P} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \Delta\theta_P}{\Delta\theta_P} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \beta}{\beta} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \lambda_P}{\lambda_P} \right]^2 + \left[ \frac{\delta d_P}{d_P} \right]^2$$

$$\left[ \frac{\delta P_P}{P_P} \right]^2 = \left[ \frac{0,01}{0,049} \right]^2 + \left[ \frac{0,5}{10,5} \right]^2 + \left[ \frac{0,1}{0,75} \right]^2 + \left[ \frac{0,005}{0,14} \right]^2 + \left[ \frac{0,001}{0,104} \right]^2$$

$$\delta P_P^2 = 0,053 \quad , \quad \delta P_P = 0,23 \text{ W}$$

Värmefflöde genom glasdelen,  $P_G$ 

$$P_G = P - P_V - P_{B\&K} - P_P = 11,49 \text{ W}$$

$$\delta P_G^2 = \delta P^2 + \delta P_V^2 + \delta P_{B\&K}^2 + \delta P_P^2$$

$$\delta P_G^2 = 0,2^2 + 0,02 + 1,5 + 0,05 = 1,61 \quad , \quad \delta P_G = 1,3 \text{ W}$$

Glasningens värmemotstånd,  $m_G$

$$m_G = A_G \cdot \Delta\theta_G / P_G = 0,46$$

$$\left[ \frac{\delta m_G}{m_G} \right]^2 = \left[ \frac{\delta A_G}{A_G} \right]^2 + \left[ \frac{\delta \Delta\theta_G}{\Delta\theta_G} \right]^2 + \left[ \frac{\delta P_G}{P_G} \right]^2$$

$$\left[ \frac{\delta m_G}{m_G} \right]^2 = \left[ \frac{0,01}{0,697} \right]^2 + \left[ \frac{0,3}{7,63} \right]^2 + \frac{1,61}{11,49^2}$$

$$\delta m_G^2 = 2,95 \cdot 10^{-3} \quad , \quad \delta m_G = 0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Glasningens k-värde,  $k_G$

$$k_G = (m_G + 0,2)^{-1} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\delta k_G^2 = (m_G + 0,2)^{-4} \cdot \delta m_G^2$$

$$\delta k_G^2 = (0,46 + 0,2)^{-4} \cdot 2,95 \cdot 10^{-3} = 0,016 \quad , \quad \underline{\delta k_G = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

2-glasfönster utan plastfolie

Temperaturer, K

Typiska värden    Bedömda maximalfel

$$\Delta\theta_G = 2,9 \quad \delta\Delta\theta_G = 0,3$$

$$\Delta\theta_B = 5,3 \quad \delta\Delta\theta_B = 0,7$$

$$\Delta\theta_K = 6,9 \quad \delta\Delta\theta_K = 0,7$$

$$\Delta\theta_P = 6,4 \quad \delta\Delta\theta_P = 0,5$$

$$\Delta\theta_V = 7,5 \quad \delta\Delta\theta_V = 0,2$$

Värmefflöde, Guarded hot box, W

Typiskt värde    Bedömt maximalfel

$$P = 18,5 \quad \delta P = 0,2$$

Övriga förutsättningar lika som i det föregående.

Värme flöde genom vägg,  $P_V$

$$P_V = 1,72 \text{ W}$$

$$\left[ \frac{\delta P_V}{P_V} \right]^2 = \left[ \frac{0,02}{0,497} \right]^2 + \left[ \frac{0,2}{7,5} \right]^2 + \left[ \frac{0,001}{0,046} \right]^2 + \left[ \frac{0,002}{0,100} \right]^2$$

$$\delta P_V^2 = 0,0095 \quad , \quad \delta P_V = 0,10 \text{ W}$$

Värme flöde genom båge och karm,  $P_{B\&K}$

$$P_{B\&K} = 4,41 \text{ W}$$

$$\left[ \frac{\delta P_{B\&K}}{P_{B\&K}} \right]^2 = (0,156 \cdot 5,3 + 0,164 \cdot 6,9)^{-2} \left\{ (5,3 \cdot 0,02)^2 + (0,156 \cdot 0,7)^2 + (6,9 \cdot 0,02)^2 + (0,164 \cdot 0,7)^2 \right\} + \left[ \frac{0,1}{0,75} \right]^2 + \left[ \frac{0,062}{0,14} + \frac{0,104}{0,14} \right]^{-2} \left\{ \left[ \frac{0,001}{0,14} \right]^2 + \left[ \frac{0,062 \cdot 0,005}{0,14^2} \right]^2 + \left[ \frac{0,001}{0,14} \right]^2 + \left[ \frac{0,104 \cdot 0,005}{0,14^2} \right]^2 \right\}$$

$$\delta P_{B\&K}^2 = 0,64 \quad , \quad \delta P_{B\&K} = 0,8 \text{ W}$$

Värme flöde genom post,  $P_P$

$$P_P = 0,56 \text{ W}$$

$$\left[ \frac{\delta P_P}{P_P} \right]^2 = \left[ \frac{0,01}{0,049} \right]^2 + \left[ \frac{0,5}{6,4} \right]^2 + \left[ \frac{0,1}{0,75} \right]^2 + \left[ \frac{0,005}{0,14} \right]^2 + \left[ \frac{0,001}{0,104} \right]^2$$

$$\delta P_P^2 = 0,021 \quad , \quad \delta P_P = 0,14 \text{ W}$$

Värme flöde genom glasdelen,  $P_G$

$$P_G = 11,8 \text{ W}$$

$$\delta P_G^2 = 0,2^2 + 0,01 + 0,64 + 0,02 = 0,71 \quad , \quad \delta P_G = 0,8 \text{ W}$$



Glasningens värmemotstånd,  $m_G$

$$m_G = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\left[ \frac{\delta m_G}{m_G} \right]^2 = \left[ \frac{0,01}{0,697} \right]^2 + \left[ \frac{0,3}{2,9} \right]^2 + \frac{0,71}{11,8^2}$$

$$\delta m_G^2 = 4,6 \cdot 10^{-4} \quad , \quad \delta m_G = 0,022 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Glasningens k-värde,  $k_G$

$$k_G = 2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\delta k_G^2 = (0,17 + 0,2)^{-4} \cdot 4,6 \cdot 10^{-4} = 0,025 \quad , \quad \underline{\delta k_G = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

## SAMMANFATTNING

Vanliga fönster utgör en av de stora energiförlustkällorna i byggnader i vårt klimat. I den befintliga bebyggelsen i Sverige finns ett mycket omfattande bestånd 2-glasfönster. Genom den höga värmege-nomgångskoefficienten hos dessa fönster,  $k \approx 2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  eller högre vid mera otäta fönster, utgör dessa fönster en betydande energibesparingspotential. Med sådana fönster kan det dessutom uppstå komfortolägenheter bl.a. p.g.a. låg yttemperatur på fönsterytan mot rummet. Av denna anledning, för att i någon mån kompensera för den låga yttemperaturen, hålls ofta lufttemperaturen inomhus på en högre nivå än vad annars hade erfordrats, med ökade energiförluster som följd.

Detta arbete behandlar ett intressant koncept för att kraftigt nedbringa  $k$ -värdet i vanliga befintliga och nya fönster. Genom att införa en fristående genomsynlig plastfolie med lågemissionsegenskaper för värmestrålning mitt i spalten mellan två glas, kan  $k$ -värdet för t.ex. ett 2-glasfönster nedbringas till ca  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  eller ännu lägre. Förbättringen blir således  $\Delta k \approx 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  eller mera för 2-glasfönstret. Såväl teoretiska beräkningar som experimentella undersökningar i detta arbete visar samstämmigt detta resultat.

Det är närmast ofrånkomligt att en sådan fönsterfolie har en viss solavskärmande verkan. Vissa reflexioner i folien kan under speciella förhållanden dessutom verka störande inför en kritisk betraktare. Om folien görs manövrerbar, dvs. så att den kan rullas in eller ut, vinner man dels i effektivitet genom bättre solutnyttjande i vissa situationer, dels en klart högre acceptans hos brukaren genom att folien då upplevs som likställd med t.ex. en persienn.

Andra beräknade  $k$ -värden inom variationsområdet ca  $1-1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , för varierande egenskaper hos plastfolien (alternativt en glasskiva), olika spaltbredder och temperaturområden finns återgivna i huvudtextens figur 2.2. Bland intressanta detaljer kan nämnas att fastän transmissionen av värmestrålning för här betraktade glas och plastfolier är endast några få procent, kan om transmissionen försummas felet härav hos beräknat  $k$ -värde uppgå till i detta fall  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Beräkningen kompliceras i hög grad om inverkan av transmissionen ska beaktas.

Ett 2-glasfönster med karmyttermåttan 10 M × 11 M och med 2 fönsterluffer utvaldes som objekt för noggranna experimentella undersökningar av k-värdet för alternativ med och utan fönsterfolie. Till dessa försök utnyttjades en vid institutionen konstruerad Guarded hot box.

Några enklare bestämningar av k-värden har dessutom genomförts för ett större 3-glasfönster med och utan fönsterfolie.

Samtliga dessa experiment ägde rum i den stora klimatsimulatorn vid institutionen för byggnadsteknik, KTH. Försöken genomfördes härigenom under mycket stabila stationära förhållanden.

De experimentellt bestämda k-värdena kan sammanfattas:

	k-värde, $W/m^2K$
2-glasfönster	2,7
2-glasfönster med lågmissionsfolie	1,5
3-glasfönster	1,7
3-glasfönster med homogen polyesterfolie	1,4
3-glasfönster med lågmissionsfolie	1,0

Några fönsterkonstruktioner, för vilka k-värden bestämts som beskrivet, utökade med ytterligare ett par andra fönsterkonstruktioner, har utvalts som representativa för några huvudsakliga konstruktionsalternativ i en teoretisk beräkning av den årliga energibesparing eller förlust som resp. fönsterkonstruktion ger upphov till, med bl.a. hänsyn till solinstrålning, relativt en yttervägg med k-värde  $0,3 W/m^2K$ . Ett par inledande räkneexempel visas detaljerat. Med hjälp av institutionens datorprogram AUTSOL har generella besparings- eller förlustdiagram framställts avseende sju olika fönsterkonstruktioner, olika fönsterareor, fönsterorienteringar mot de fyra huvudväderstrecken (vertikal yta) och byggnader med olika stor basvärmeavgivning (påverkar uppvärmningssäsongens längd), se figur 4.2 i huvudtexten. Byggnadens storlek är valfri eftersom diagrammen är utformade i en relativ skala. Klimatdata har antagits för Stockholm 1931-60. AUTSOL-programmet räknar med de tre dagtyperna helklart, halvklart och mullet. Med hjälp av nya solinstrålningstabeller för de tre dagtyperna från institutionen för byggnadsteknik, KTH, finns även möjlighet att räkna manuellt enligt de visade exemplen, men den manuella beräkningskapaciteten kan naturligtvis aldrig mäta sig med datorberäkningar.

Av de omfattande beräkningsresultaten återgivna i huvudtextens figur 4.2 kan man t.ex. utläsa att den årliga energibesparingen, efter komplettering av ett vanligt 2-glasfönster med en manövrerbar fönsterfolie av det slag som undersökts experimentellt, kan förväntas vara av storleksordningen 80-90 kWh per m<sup>2</sup> fönster. Med ett antaget energipris av 0,30 kr/kWh skulle besparingen således bli ca 25 kr/m<sup>2</sup> fönster och år. Det synes rimligt att antaga att en komplettering av ett tvåglasfönster med en tredje glasruta inte kan bli billigare än en komplettering med en manövrerbar fönsterfolie. Eftersom det sistnämnda alternativet medför större energibesparing än alternativet med en tredje glasruta, framstår foliealternativet som en möjlig konkurrenskraftig lösning.

Till en besparingskalkyl bör utöver ovan nämnda besparingar dessutom fogas den energibesparing som följer av att rumstemperaturen kan sänkas efter att fönstrens yttemperaturer blivit högre. Samtidigt kan i många fall den utnyttjbara vistelsezonen i rummet utvidgas eftersom rumskomforten närmast fönstren blivit väsentligt förhöjd.

## LITTERATUR

*Duffie, J A & Beckman, W A*, 1980, Solar Engineering of Thermal Processes. (John Wiley & Sons.) New York, Chichester, Brisbane, Toronto.

*Eriksson, I, Mattsson, B & Ottoson, G*, 1981, Uppbyggnad av Guarded hot box. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) Rapport till Byggeforskningsen, forskningsanslag 780290-4. Stockholm.

*Girido, V*, 1978, Grundläggande förutsättningar för soluppvärmning av byggnader i Skandinavien. Beräkningsmetod, parameteranalys, effektivitet och optimering. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) Medd. nr 119. (Byggeforskingen.) Rapport R108:1978. Stockholm.

*Girido, V*, 1981, Passiv solvärme för byggnadsuppvärmning – metod för beräkning av energibesparing och självförsörjningsgrader. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) Medd. nr 131. Stockholm.

*Girido, V*, 1982, Bestämning av molnighetsfaktorer (Cloud Cover Factor, CCF) för helklara, halvklara och mulna typdagar ur klimatdata för Stockholm 1958-1971. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) Arbetsrapport 1982:1. Stockholm.

*Girido, V*, 1983, Solinstrålningstabeller för helklara, halvklara och mulna typdagar. I Beräkningar och diskussion. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) Arbetsrapport 1983:1. Stockholm.

*Hollands, K G T, Unny, T E, Taithby, G D & Konicek, L*, 1976, Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Heat Transfer, Vol. 98, pp 189-193.

*Höglund, I*, 1983, Värmebalansproblem hos fönster. (Särtryck ur Byggmästaren 2/83 och 3/83.) (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) Medd. nr 140. Stockholm.

*Höglund, I, Girido, V & Troedsson, C G*, 1984a, Solinstrålningstabeller för helklara, halvklara och mulna typdagar. II Fullständiga tabeller. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) BFR-rapport under publicering. Stockholm.

*Höglund, I, Girido, V & Troedsson, C G*, 1984b, Solinstrålningstabeller för helklara, halvklara och mulna typdagar. III Transmitterad strålning genom fönster. (Inst. för byggnadsteknik, KTH.) BFR-rapport under publicering. Stockholm.

*Jonsson, B*, 1981, Värmetransport genom fönster. (Inst. för byggnads-konstruktionslära, LTH.) Rapport BKL 1981:5. Lund.

Kommentarer till svensk byggnorm, Energihushållning m.m. 1977:3. Statens Planverk.

*Kreider, J F & Kreith, F*, 1981, Solar Energy Handbook. (Mc Graw-Hill.) New York.

*Rubin, M*, 1982, Calculating Heat Transfer through Windows. Energy Research, Vol. 6, pp 341-349.

*Södergren, D & Boström, T, 1973, The Vent-Window, a Principle for Conditioning the Thermal Environment. The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers. March 1973. London.*

*Taesler, R, 1972, Klimatdata för Sverige. (Byggforskningen.) Stockholm.*







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 820836-2  
från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen  
för byggnadsteknik, KTH, Stockholm.**

**R87: 1985**

**ISBN 91-540-4426-X**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6705087**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Installationer**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**Cirkapris: 35 kr exkl moms**