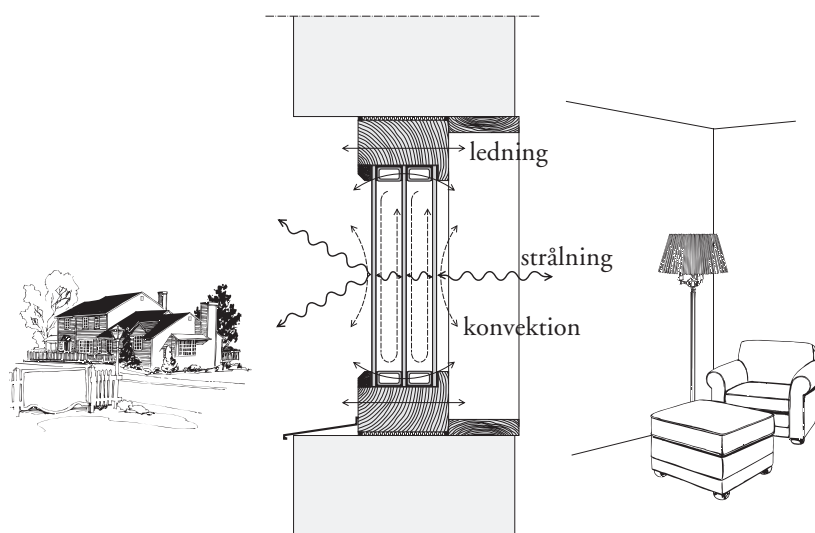


Fönsterfysik och energitransport genom fönster

Helena Bülow-Hübe, Avd f Energi och ByggnadsDesign, LTH
046-222 73 56 / helena.bulow-hube@ebd.lth.se

Värmetransporten genom ett fönster är en komplicerad process. Rumsvärme transporteras utåt genom fönsterkonstruktionen när det är varmare inne än ute, se figur 1 som visar principerna för långvågig strålning, konvektion och ledning.

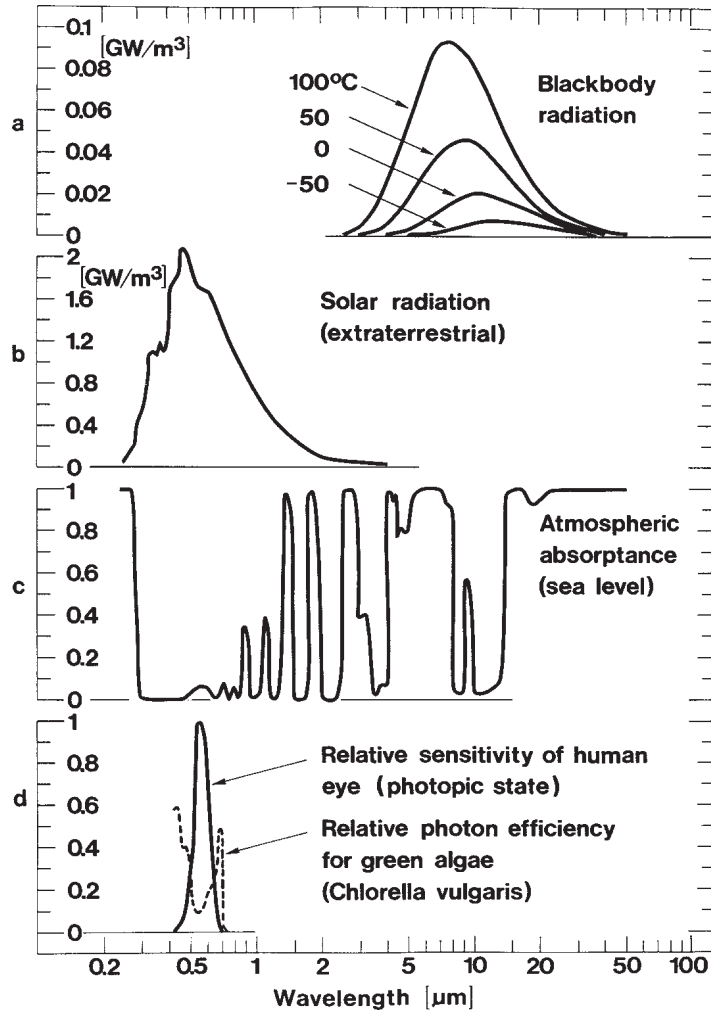


Figur 1 Principer för värmetransport (i mörker) genom ett treglasfönster visande principerna för ledning, strålning, och konvektion.

Under dagtid transporteras kortvågig solstrålning inåt. Huvuddelen sker förstås när det finns direkt solstrålning, men även den diffusa delen från himmel och mark ger betydelsefulla bidrag. En del av denna strålning är "synlig" och förser oss med dagsljus inomhus. Det är därför av intresse att dela upp det elektromagnetiska spektrat i olika våglängsområden (Roos, 1994), se även figur 2:

- 1) $\lambda < 380$ nm (UV-strålning). Icke-synlig ultraviolett strålning som har liten betydelse för energibalansen i byggnader. Den är viktig för D-vitaminproduktion och kalciumupptag i kroppen, men kan i höga doser vara skadlig för människor, växter och textilier.
- 2) 380 nm $< \lambda < 780$ nm (synligt ljus). Det viktigaste våglängsområdet vilket innehåller ca 50 % av energiinnehållet från solen. Vanligt fönsterglas har en hög transmission i detta område.

- 3) $780 \text{ nm} < \lambda < 2500 \text{ nm}$ (nära-infraröd strålning). Den del av solstrålningen som når markytan och som inte är synlig. Ungefär 40 % av energiinnehållet från solen finns i detta intervall.
- 4) $\lambda > 2500 \text{ nm}$ (IR-strålning). Alla ytor vid rumstemperatur utsänder strålning i detta område. Vanligt fönsterglas är opakt (ogenomskinligt) för dessa våglängder. Strålningen absorberas dock och strålas sedan vidare både utåt och inåt. Huvuddelen av energiförlusten i ett vanligt fönster sker på detta sätt.



Figur 2 Spektrum för a) en svart kropp vid fyra temperaturer b) solstrålningen utanför jordatmosfären, c) typisk absorption av atmosfären d) ögats relativa känslighet (efter Grankvist, 1981). (1000 nm = 1 μm).

1 Transmissionsegenskaper för glas

1.1 UV-transmission

Transmissionen för UV-strålning, T_{uv} , är relativt låg för vanligt glas. Det brukar exempelvis sägas att det inte är möjligt att bli solbränd bakom fönsterglas. Även om transmissionen är låg så är energiinnehållet i dessa korta våglängder högt och kan orsaka

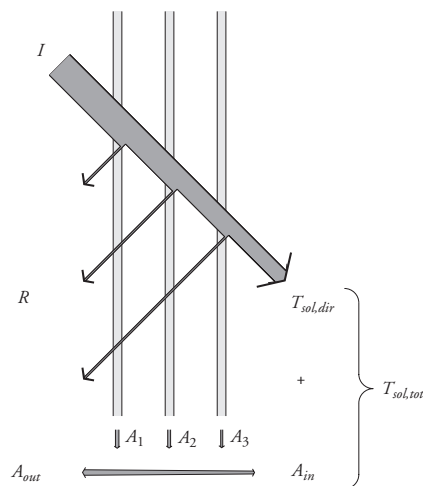
blekning av textilier och tavlor. Om det är viktigt att undvika detta kan ett speciellt UV-filtrerande glas lamineras till det vanliga glaset. Viss blekning kan ändå förekomma eftersom solljus ändå upp till den röda delen av spektret är känt för att orsaka blekning (IESNA, 1993).

1.2 Ljustransmission

Transmissionen för solljus i den synliga delen, viktat mot ögats relativa känslighet kallas för ljustransmission, T_{vis} , men termen LT förekommer också i litteraturen. Ungefär 90 % av det ljus som träffar ett vanligt fönsterglas vid vinkelrätt infall transmitteras. Ungefär 8 % av ljuset reflekteras ($R = 4\%$ vid varje yta), och de återstående 2-3 % absorberas som värme i glaset. Ju fler glas som används i ett fönster, desto lägre blir förstås transmissionen.

1.3 Solenergitransmission

Transmissionen av solstrålning inom våglängsområde 1-3 kallas solenergitransmission. Här skiljer man vidare på den direkt transmitterade strålningen, *direkt (primär) solenergitransmission* $T_{sol,dir}$ (vilken är jämförbar med ljustransmissionen) och energi som tillförs rummet genom sekundära värmeöverföringsprocesser. Den sekundära delen består av den andel av den i glaset absorberade energin som transporteras mot rummet, A_{in} , se figur 3. När den sekundära delen A_{in} läggs till den direkta delen kallas detta för den *totala solenergitransmissionen*, $T_{sol,tot}$. Uttryckt som en kvot betecknas den som g -värde (g för engelskans gain) eller SHGC (solar heat gain coefficient). $T_{sol,tot}$ är vanligtvis bara något lägre än ljustransmissionen, men för speciella belagda solskyddsglas kan den vara avsevärt lägre, se kapitel 6. För enkelt klarglas är $T_{sol,dir}$ ungefär 83 % och $T_{sol,tot}$ är 86 %.



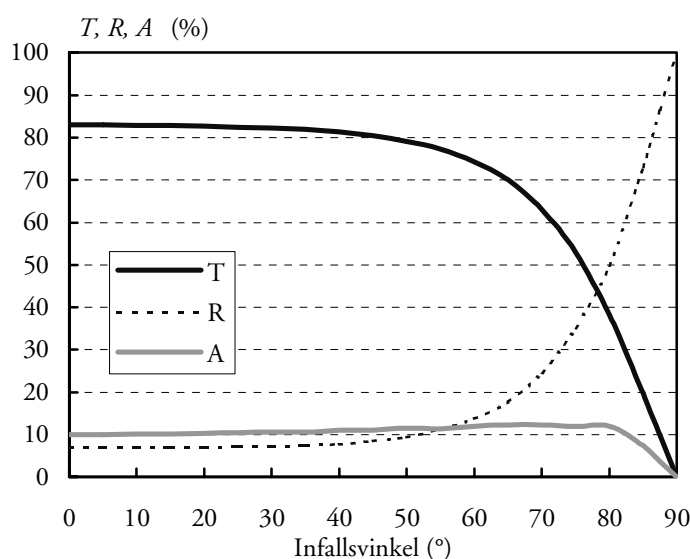
Figur 3 Principskiss över direkt transmitterad, reflekterad och absorberad solstrålning i en treglasruta. Multipelreflexerna visas ej.

1.4 Vinkelberoende egenskaper och effekt av flera glas

För att kunna beräkna transmissionen genom ett fönster med flera glas måste man ta hänsyn till multipelreflexer mellan rutorna. Polarisering av ljus måste också beaktas. Beräkningsmetoden för transmissionen för de olika våglängdsområdena 1-3 finns beskrivet i ISO 9050:1990.

En grov uppskattning av transmissionen kan fås genom att multiplicera transmissionen för de enskilda rutorna med varann. En ordinär tvåglasruta (klarglas) kommer därmed att få en ljustransmission på ca 80 % och en treglasruta ca 72-73 %.

Transmissionen beror också på infallsvinkeln: Den är störst för vinkelrätt infall (0°), är relativt konstant till ca $50-60^\circ$, för att sedan snabbt avta till 0 % vid 90° infallsvinkel, se figur 4. Om de fysikaliska egenskaperna för glaset är kända (tjocklek, brytningsindex och extinktionskoefficient) kan de vinkelberoende egenskaperna beräknas genom Fresnels ekvationer och Snells lag.

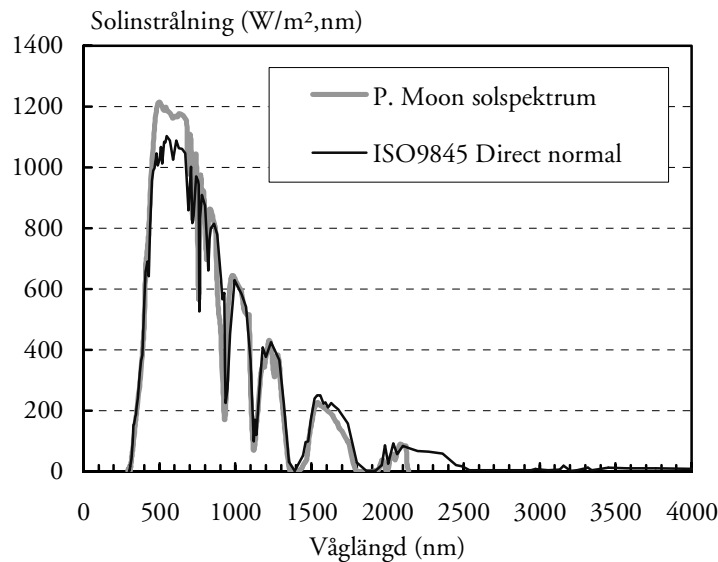


Figur 4 Vinkelberoende transmission, reflektion och absorption för vanligt klart floatglas för infallsvinkeln θ (från ytans normal).

För särskilda glastyper som absorberande och belagda glas, kan de vinkelberoende egenskaperna vara något annorlunda än för vanligt klarglas. De kan beräknas om alla materialparameterar (tjocklek, brytningsindex) för beläggningarna mm är kända, men det är ett drygt arbete. Materialparameterarna måste även vara kända spektralt, dvs för varje våglängd. Eftersom sådana data inte finns allmänt tillgängliga blir det ett arbete för en materialfysiker. Några försök har gjorts att passa polynom till de vinkelberoende kurvorna för g -värdet för att underlätta denna beräkning (Roos, 1997; Karlsson & Roos, 2000; Karlsson, Rubin & Roos, 2001). Dessa metoder kräver ändå en del kunskap om vilka material som ingår i beläggningarna, men detta skulle antagligen kunna byggas in i ett expertsystem beroende på förhållandet mellan g , T_{vis} , emittansen, etc.

Så snart som transmissionen mäts eller beräknas för ett enskilt glas måste resultaten för varje våglängd vägas gentemot ett "standardiserat" solspektrum. För ljustransmissionen används vanligtvis ett spektrum som kallas D65. För solenergitransmissionen refereras i ISO 9050 till två olika solspektrum (Perry Moon air mass 2 och CIE 85), och båda dessa används flitigt av glastillverkare i Europa. I USA används ett annat

spektrum, ASTM E87-891, vilket motsvarar ISO 9845-1:1992, se figur 5. Standardiseringsarbete pågår med målsättningen att ändra från de två spektrerna som ISO 9050 refererar till, till det som ges i ISO 9845. Industrin motsätter sig dock denna ändring eftersom g -värdet kan bli så mycket som 3-4 % högre då det beräknas med ISO 9845 spektret (Arne Roos, Uppsala Universitet, personlig komm., 2000). Man måste därför vara uppmärksam på detta då data mellan olika glastillverkare jämförs. Förhoppningsvis kommer detta problem att försvinna när alla börjar använda samma beräkningsmetod.



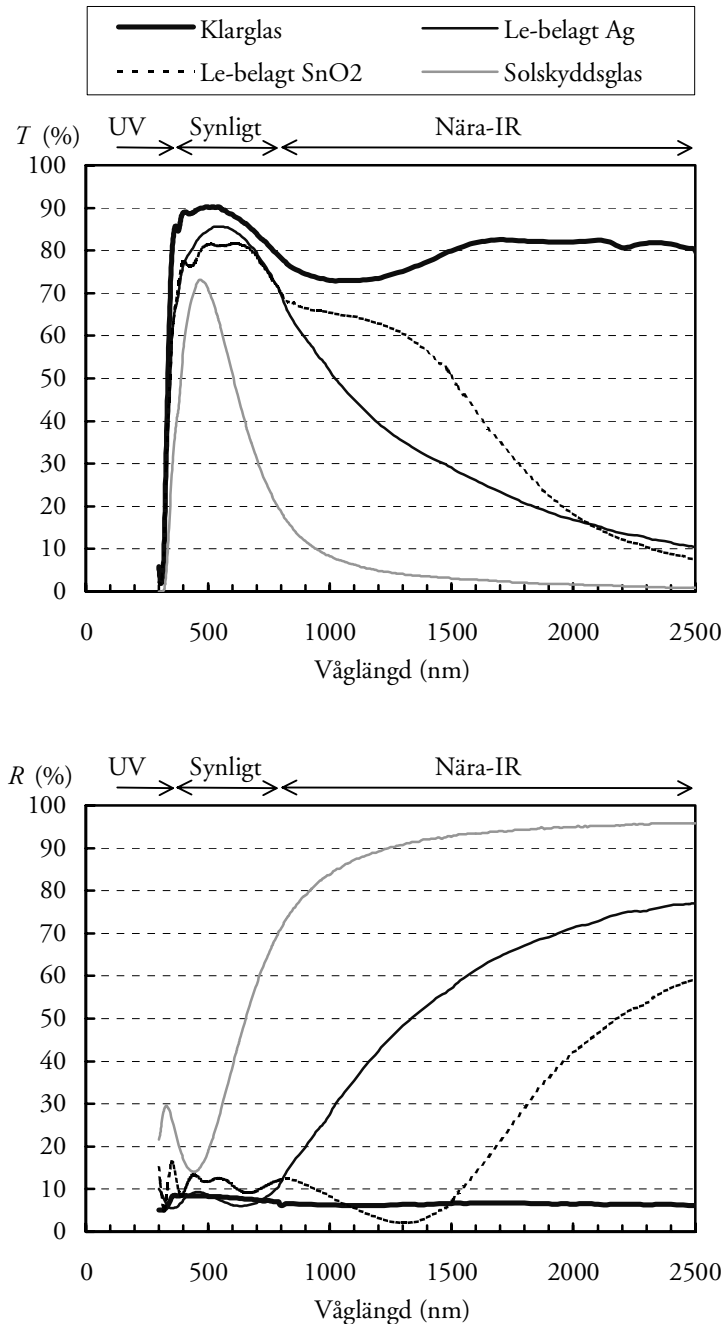
Figur 5 Spektralintensitet för två olika solspektrum: Perry Moon och ISO 9845 Direct normal irradiance, Tab 1, col. 2. Källan till Perry Moon hittades i Optics5 från LBNL.

1.5 Energisparglas

Lågemitterande beläggningar (le-skikt) är speciella typer av spektralt selektiva beläggningar som utformats för att öka energieffektiviteten hos fönster. Det utmärkande draget för dessa beläggningar är att de har en hög reflektans i det långvågiga strålningsområdet, vilket ger dem en låg emittans ε (<20 %) i samma område. Medan vanligt glas absorberar huvuddelen av värmestrålningen från rumsytorna och sedan utstrålar denna värme både utåt och inåt så undertrycker le-skikten strålningen utåt, vilket resulterar i att den långvågiga värmestrålningen reflekteras tillbaka mot rummet. Den förbättrade värmeisoleringen är lika med, eller bättre än, att addera en extra glasruta. "Vanligt" le-glas är utformat så att ljustransmissionen är så lik vanligt glas som möjligt, figur 6. Dock kan skikten, beroende på typ av beläggning, ge en svag toning av glaset som kan gå mot brunt eller grönt i transmission, och mot brunt eller rosa i reflektion.

Det finns idag två huvudgrupper av beläggningar på marknaden: mjuka och hårda. De mjuka beläggningarna är känsliga för väderbelastning, fönsterputsning etc och måste skyddas i en förseglad isolerruta. De består huvudsakligen av ett tunt silverskikt (Ag), i storleksordningen 100Å tjockt, vilket ger dem en emittans av ca 10 %. Den senaste utvecklingen är jakten mellan olika tillverkare att nå så låga emittanser som möjligt; 4 % eller lägre nås med en tjock eller dubbel silverbeläggning.

De hårda beläggningarna är tåliga, vilket gör att de kan användas i enkelglas eller i kopplade bågar. De hårda beläggningarna består av en dopad tennoxid (SnO_2), i storleksordningen 4000Å tjock. Emittansen är ca 15-16 %. Solenergitransmissionen, $T_{sol,top}$ är samtidigt högre än för silverbeläggningarna, se tabell 1.



Figur 6 Transmission (överst) och reflektion (underst) för vanligt (klart) floatglas och några typer av le-glas.

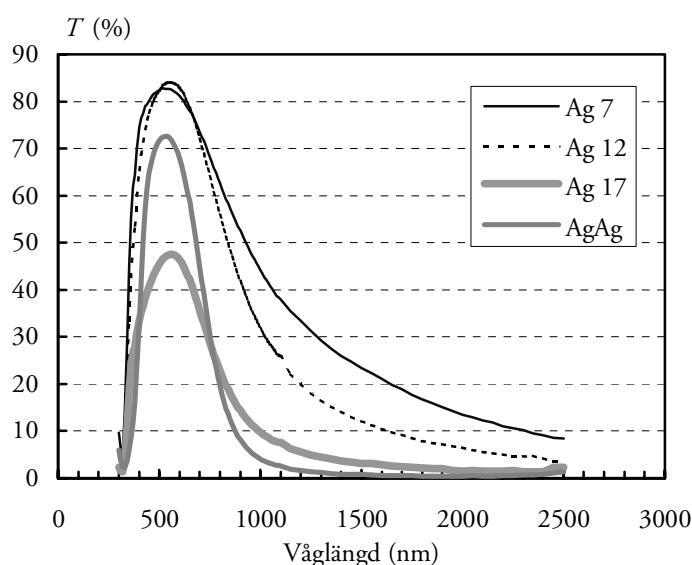
Tabell 1 Ungefärliga fysikaliska egenskaper för några vanligt förekommande glastyper: ljustransmission (T_{vis}); ljusreflektion, ut- och insida ($R_{vis,1}$; $R_{vis,2}$); direkt solstrålningstransmission ($T_{sol,dir}$); solenergireflektion, ut- och insida ($R_{sol,1}$; $R_{sol,2}$); emittans, ut- och insida (ϵ_1 ; ϵ_2). Beläggningarna har vänts mot den sida som de normalt förekommer i en glaskonstruktion.

Glastyp	T_{vis}	$R_{vis,1}$	$R_{vis,2}$	$T_{sol,dir}$	$R_{sol,1}$	$R_{sol,2}$	ϵ_1	ϵ_2
Klarglas	0.90	0.08	0.08	0.83	0.07	0.07	0.84	0.84
Le-glas (Ag)	0.85	0.05	0.04	0.62	0.16	0.20	0.84	0.10
Le-glas (Ag)	0.85	0.08	0.06	0.58	0.22	0.28	0.84	0.04
Le-glas (SnO_2) ^{a)}	0.83	0.10	0.11	0.71	0.10	0.12	0.84	0.16
Absorberande grön	0.75	0.07	0.07	0.46	0.05	0.05	0.84	0.84
Absorberande grå	0.44	0.05	0.05	0.45	0.05	0.05	0.84	0.84
Solskyddsglas	0.72	0.10	0.17	0.45	0.35	0.29	0.06	0.84
Avanc. solskyddsglas	0.75	0.08	0.09	0.35	0.49	0.33	0.02	0.84
Avanc. solskyddsglas	0.56	0.09	0.15	0.26	0.45	0.34	0.02	0.84

a) hård beläggning, kan användas som enkelglas

Ur fysisk synvinkel skulle det vara mer korrekt att klassificera le-skikten som tunna eller tjocka. Tennoxidbeläggningar skulle då kallas tjocka, medan alla silverbaserade beläggningar är (mer eller mindre) tunna. Den spektrala selektiviteten hos tennoxidbeläggningar härrör från dess materialegenskaper (låg elektrontäthet). Silverbaserade beläggningar har en hög elektrontäthet och måste vara tunna för att bli transparenta. Genom att ändra tjockleken på silverbaserade beläggningar kan man således åstadkomma ganska olika transmissionskurvor, se figur 7.

Le-skiktet brukar placeras på utsidan av det inre glaset för att åstadkomma ett högt g -värde (pos. n-1). I superisolerade treglasfönster med två belagda glas brukar skiktet placeras på utsidan av det innersta glaset (pos. 5) och på insidan av det yttersta glaset (pos. 2). Det är säkrast att lämna det mittersta glaset obelagt, eftersom den relativt sett höga solabsorptionen annars kan leda till höga glastemperaturer vilket i sin tur kan orsaka att isolerrutan går sönder.



Figur 7 Transmission för silverbaserade beläggningar av olika tjocklek. Skiktets tjocklek i (nm). (Ag) för enkla silverskikt och (AgAg) för dubbla silverskikt. Data från Joakim Karlsson, Uppsala Universitet.

1.6 Solskyddsglas

Traditionellt sett åstadkoms solskyddsglas genom att tillsätta en metalloxid (till exempel järn-, kobolt- eller selenoxid) till det smälta glaset för att skapa ett genomfärgat (obelagt) absorberande glas, till exempel grönt eller grått glas. Solskyddsglas placeras sedan som det yttre glaset i en glaskombination, så att den absorberade värmen huvudsakligen skulle avges till uteluften. Senare kom belagda solskyddsglas med aktiva beståndsdelar av rostfritt stål (SS) eller titannitrid (TiN), till exempel i reflekterande glas (med hög ljusreflektion). Dessa beläggningar är hårda och kan användas som enkelglas.

Andra typer av solskyddsglas försöker förena solskyddsegenskaper med låga värmeförluster. Sådana glas baseras på ett mjukt silverskikt, vilket ger det en låg emittans, men vilket också kräver att det placeras i en isolerruta. Även detta glas placeras som det yttre glaset med beläggningen vänd inåt, mot luftspalten.

Den senaste utvecklingen är belagda solskyddsglas som har en mycket hög kvot mellan ljus- och solenergitransmission, $T_{vis}/T_{sol, tot}$, som närmar sig den fysiska gränsen på 2. Detta betyder att sådant glas släpper in en större del av dagsljuset, men skär bort det mesta av den nära-infraröda solstrålningen. Dessa avancerade beläggningar är uppbyggda av flera tunna materialskikt, där den aktiva delen består av ett dubbelt silverskikt (AgAg). De är mjuka (måste placeras i en isolerruta), och de har en mycket låg emittans (ner till 2 %), vilket gör att de är en kombination av solskydds- och energisparglas. De placeras som det yttersta glaset (beläggningen inåt) i en isolerruta för att åstadkomma ett lågt g -värde.

2 Fönsters värmeisolering

Fönstrets värmeisolerande förmåga mäts genom U -värdet (eller värmegenomgångskoefficienten), vilket anger värmeflödet (i W) per kvadratmeter (m^2) vid en temperaturskillnad mellan ute och inne på en grad (K eller °C). Desto lägre U -värde, desto bättre är således isolerförmågan.

Fönstrets totala U -värde, U_{win} , är energiförlusten från inomhusluften till utomhusluften dividerad med fönstrets area och temperaturskillnaden. Det kan beräknas som den mot arean viktade summan av U -värdena för glaset, U_{cog} , och för karm/båge, U_f . Ytterligare värmeförluster (köldbryggor) längs glasranden (tvådimensionellt värmeflöde) behandlas på entdera av följande två sätt:

(1) Glasranden ges ett högre U -värde, U_{eog} , än mittpunkten (Ekv. 1a). Kanteffekterna antas enligt ASHRAE att sträcka sig 63.5 mm in på glaset, men i en del arbeten används 100 mm istället.

$$U_{win} = \frac{A_{cog}U_{cog} + A_{eog}U_{eog} + A_fU_f}{A_{cog} + A_{eog} + A_f} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (1a)$$

(2) Ett linjärt " U -värde", eller värmegenomgångskoefficient Ψ (W/m,K), vilket tar hänsyn till randeffekterna, multipliceras med längden av den synliga glasranden l_g och adderas till det totala U -värdet (Ekv 1b).

$$U_{win} = \frac{A_gU_{cog} + A_fU_f + L_g\Psi}{A_g + A_f} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (1b)$$

där A_{cog} , A_{eog} och A_f är de projicerade ytorna för de olika delarna i fönstret och A_g är den totala glasarean ($= A_{cog} + A_{eog}$). Medan den första metoden är mest använd i Nordamerika, används den andra metoden mest i Västeuropa.

2.1 Glasdelen

Värmeförlusten genom glasdelen beror på (1) långvågigt strålningsutbyte mellan de enskilda rutorna och mellan rutorna och omgivningen resp. (2) konvektion i spalterna mellan rutorna och mellan ut- och insida på glaspaketet. I en tvåglasruta dominerar strålningen (ungefär 70 %). Värmemotståndet hos glasdelen kan uttryckas som summan av motstånden hos de olika spalterna, R_{gap} , och hos de enskilda glasen, R_{glass} , plus det inre och yttre värmeövergångsmotståndet, R_{si} och R_{se} :

$$R_{tot} = \sum R_{gap} + \sum R_{glass} + R_{si} + R_{se} \quad (\text{m}^2\text{K}/\text{W}) \quad (2)$$

U -värdet är inversen av värmemotståndet R_{tot} :

$$U_{cog} = 1/R_{tot} \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{K}) \quad (3)$$

Värmeövergångsmotstånden kan bestämmas antingen genom beräkningar, se till exempel Arasteh et al. (1989) eller genom att använda standardiserade värden från byggnormen. I beräkningar separeras vanligen mellan konvektions- och ledningsdelen resp. strålningsdelen, men i normerna slås de två effekterna ihop. I de svenska byggreglerna anges följande värden:

Yttre värmeövergångsmotstånd $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Inre värmeövergångsmotstånd $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Lägg märke till att inversen av värmeövergångsmotståndet kallas för värmeövergångstalet h . Byggnormens värden ovan ger värdena $h_e=25$ och $h_i=8$.

Värmetransport i spalter

Det långvågiga strålningsutbytet mellan två rutor med temperaturerna t_1 respektive t_2 (i Kelvin) beskrivs av:

$$q_{1,2} = \varepsilon_{eff} \sigma [t_1^4 - t_2^4] \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (4)$$

där ε_{eff} är den effektiva emittansen mellan de två ytorna och σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$).

Den effektiva emittansen ε_{eff} bestäms av den hemisfärsika emittansen ε för de två ytorna enligt följande:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (-) \quad (5)$$

Ekvation 4 ovan kan också uttryckas som:

$$q_{1,2} = h_{rb} \varepsilon_{eff} (t_1 - t_2) = h_r (t_1 - t_2) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (6)$$

där h_{rb} är värmeövergångstalet för strålning mellan två svarta kroppar ($\varepsilon=1$), t_1 , t_2 är yttemperaturerna och h_r är värmeövergångstalet för strålning. h_{rb} ges i figur 8 för en temperaturskillnad mellan ytorna på 10°C .

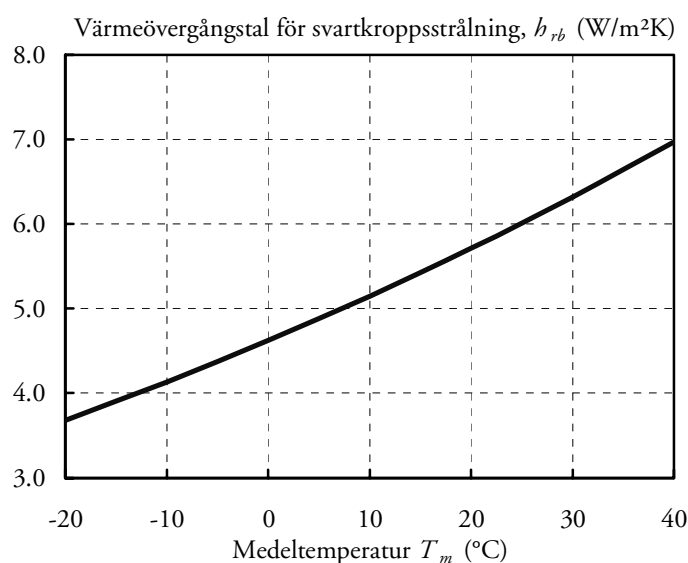
Värmetransporten i spalten på grund av konvektion bestäms av:

$$q_{1,2} = h_c (t_1 - t_2) \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

där h_c är det konvektiva värmeövergångstalet. Det tar hänsyn både till ledning och konvektion i spalten (ledning när luften står still, konvektion när luften rör sig). Den definieras som:

$$h_c = k Nu / d \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (8)$$

där k är värmekonduktiviteten för luften (alt. gasen) i spalten (W/m,K) (se Tabell 2), Nu är Nusselts tal och d är spaltbredden (m). Nusselttalet är en funktion av spaltens höjd och bredd, av Rayleighs tal och av fönstrets lutning. Det har bestämts experimentellt och följande arbeten används vanligtvis: (Hollands et al., 1976; ElSherbiny et al., 1982; Ferguson & Wright, 1984).



Figur 8 Värmeövergångstal för svartkroppsstrålning h_{rb} för varierande medeltemperatur mellan två ytor, vid en temperaturdifferens på 10°C.

Tabell 2 Värmekonduktivitet k , densitet ρ , och viskositet μ för i isolerrutor förekommande gaser.

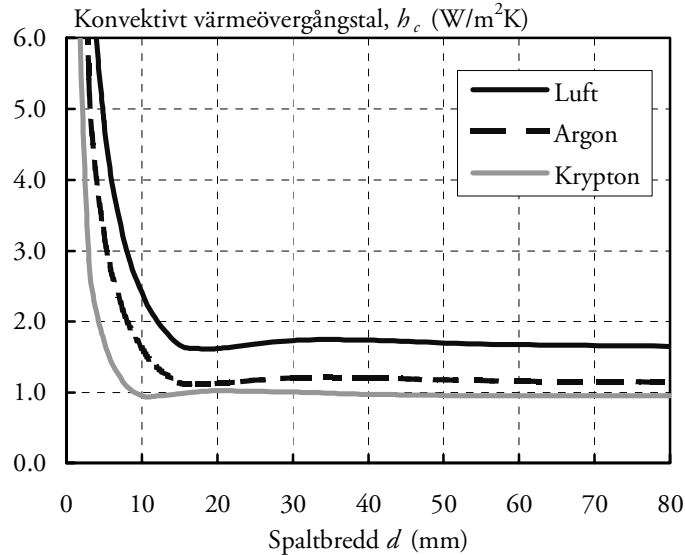
Gas	k W/m,K ($\times 10^{-2}$)	ρ kg/m ³	μ kg/m,s ($\times 10^{-5}$)
Luft	2.41	1.29	1.73
Argon	1.62	1.70	2.11
Krypton	0.86	3.74	2.28
Xenon	0.52	5.89	2.26
CO ₂	1.46	1.98	1.39
SF ₆	1.30	6.70	1.45

Värden på h_c ges i figur 9 för vertikala rutor och för varierande spaltbredd och olika gaser.

Värmemotståndet för spalten beräknas som:

$$R_{gap} = \frac{1}{h_r + h_c} = \frac{1}{h_{rb}\epsilon_{eff} + h_c} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (9)$$

Värmemotståndet hos vanligt glas R_{glass} är ungefär $0.001 \text{ m}^2\text{K/W}$ per mm.



Figur 9 Det konvektiva värmeövergångstalet som funktion av gas och spaltbredd. Beräknat för ett fönster med höjden 1.2 m, en medeltemperatur på 15°C , och en temperaturskillnad på 10°C enligt ElSherbiny et al. (1982).

Det totala värmemotståndet för ett glaspaket med exempelvis en treglas isolerruta (T4-12) kan nu beräknas enligt följande:

$$R_{tot} = R_{se} + R_{pane1} + R_{gap1} + R_{pane2} + R_{gap2} + R_{pane3} + R_{si} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (10)$$

Motståndet hos de två splaterna är ungefär lika med (anta att $t_{m1} = 5^\circ\text{C}$, $t_{m2} = 12^\circ\text{C}$, spaltbredd = 12 mm, vanligt glas ger $\epsilon_{eff} = 0.72$):

$$R_{gap1} = 1/(4.88 \cdot 0.72 + 2) = 0.181 \text{ m}^2\text{K/W}$$

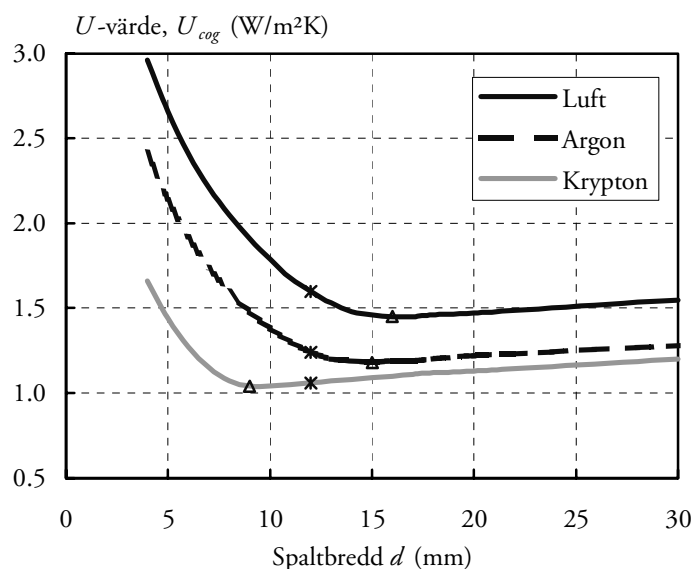
$$R_{gap2} = 1/(5.26 \cdot 0.72 + 2) = 0.173 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Motståndet hos hela glaspaketet blir då:

$$R_{tot} = 0.04 + 0.001 \cdot 4 \cdot 3 + 0.181 + 0.173 + 0.13 = 0.536 \text{ m}^2\text{K/W}.$$

Detta motsvarar ett mittpunkts U -värde, U_{cog} , på $1.87 \text{ W/m}^2\text{K}$. Om innerrutan ersätts med ett energisparglas med $\epsilon = 10\%$, blir U_{cog} lika med 1.32 , och om även luften i samma spalt byts mot argon sjunker U_{cog} till 1.13 . Dessa värden kan jämföras med resultat som erhållits genom en detaljerad beräkning (vilken inkluderar en beräkning av glastemperaturerna) som ges i tabell 3. Metodiken ovan kan således användas för att grovt uppskatta U -värdet för valfri glaskombination. Begränsningen är att temperaturfördelningen hos de enskilda rutorna inte är känd, vilket främst kan påverka strålningsförlusterna.

Sammanfattningsvis har detta avsnitt visat att värmeförlusterna genom glaset kan minskas genom att addera fler glasrutor, att använda låg-emitterande beläggningar på glaset för att minska strålningsförlusterna och att använda tunga gaser (såsom argon, krypton eller tom xenon) för att minska konvektionsförlusterna. Avståndet mellan glasen påverkar också U -värdet något, se figur 10. Här visas att den vanliga förekommande spaltbredden på 12 mm inte är optimal, åtminstone inte från energisynpunkt.



Figur 10 U_{cog} som funktion av spaltbredd för en tvåglas ruta med ett le-skikt. Den vanliga spaltbredden hos isolerrutor på 12 mm är markerad med kryss och minimum med triangel. (Beräkningar gjorda i WINDOW 4.1 (LBL, 1992), $\epsilon=4\%$, $T=0/20^\circ C$, vindhastighet 5 m/s).

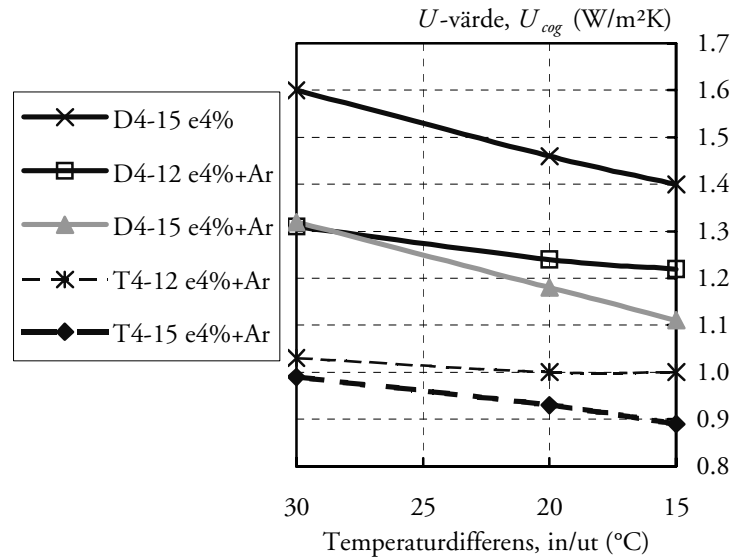
Vanligtvis tänker vi oss ofta U -värdet som en konstant, men i verkligheten finns ett temperaturberoende vilket redan framgick av figur 8. Figur 11 visar några exempel på detta temperaturberoende för några olika glaskombinationer. Det framgår tydligt att rutor med 15 mm spaltbredd, i synnerhet tvåglasrutor, är ganska känsliga för temperaturskillnaden Δt över glaset, medan en del treglasrutor nästan är opåverkade. Detta har viss betydelse för U -värden som uppges av glastillverkare, vilka ofta baseras på temperaturdifferensen $\Delta t=15^\circ C$ enligt den Europeiska standarden EN 673. I Sverige har ett Δt på $20^\circ C$ ($0/20^\circ C$) ofta använts, och när U -värden mäts i varmlåda (guarded hot-box), har $-5/25^\circ C$ tidigare varit vanliga randvillkor. I dokumentationen från NFRC skall fönstret U -värde beräknas vid $-18/21^\circ C$. Att använda en högre temperaturdifferens kan motiveras i kalla klimat och även för att få små mätfel. Andra randvillkor som kan skilja mellan olika källor kan vara de yttre och inre värmeövergångstalen, vilka ibland är fixa och ibland beräknas.

Kraven på god värmeisolering kan komma i konflikt med både solenergi- och dagsljustransmissionen, eftersom en förbättrad värmeisolering åstadkoms genom att använda fler glasrutor och/eller le-skikt, se tabell 3. Beroende på hur den förbättrade värmeisoleringen åstadkoms (till exempel vilken typ av le-skikt som används), kan det nyttiga soltillskottet reduceras mer eller mindre, eftersom ett lägre U -värde vanligtvis följs av ett lägre g -värde, se figur 12. Vanligtvis uppväger det förbättrade U -värdet mer än väl de lägre tillskotten av solenergi och dagsljus.

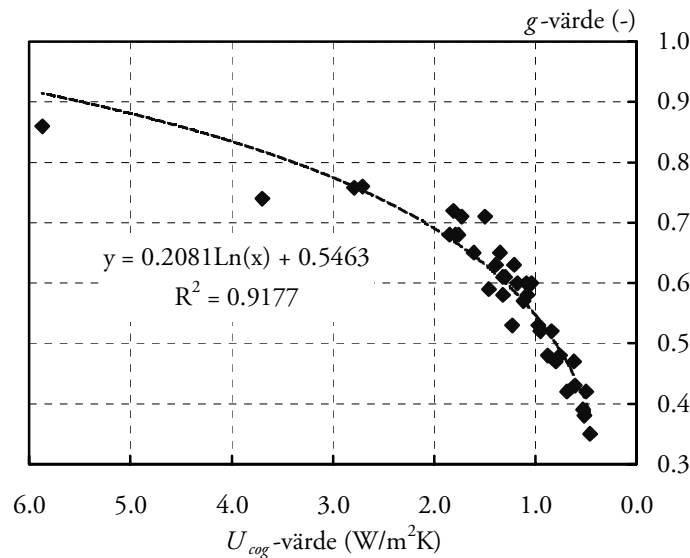
Vad gäller dagsljus är dock frågan något mer komplex. Lägre dagsljusnivåer kan i värsta fall leda till ett ökat behov av elbelysning. Detta problem kan kompenseras med något större fönster. Den färgtoning eller filterningseffekt som sker när i synnerhet flera le-skikt används kan dock inte kompenseras av större fönster, och detta är ett svårare problem att lösa.

Tabell 3 U_{cog} , g och T_{vis} för några glaskombinationer med klarglas och energisparglas med olika emittans. (Beräkningar gjorda i WINDOW 4.1 för tre olika inne- och utetemperaturer, vindhastighet 5 m/s). Le-skikten har i samtliga fall placerats på utsidan av det innersta glaset (pos. n-1), utom i 4le-30-(D4-12). I detta fall finns le-skiktet på insidan av det enkla ytterglaset (pos. 2). I de fall två le-skikt används har den andra beläggningen placerats på insidan av det yttersta glaset (pos. 2). D står för Dubbel och T för Trippel isolerruta. (T ex, D4-12 betyder en tvåglasruta med 4 mm glas och 12 mm spaltbredd). Om gasfyllningar har använts markeras dessa med Ar för argon och Kr för krypton. Gasen placeras alltid i samma spalt som le-skiktet.

Glaset emittans	Glas-kombination	U_{cog} (-5/25°C)	U_{cog} (0/20°C)	U_{cog} (2.5/17.5°C)	g (-)	T_{vis} (-)
$\epsilon=84\%$	D4-12	2.84	2.79	2.76	0.76	0.82
	D4-30	2.83	2.71	2.63	0.76	0.82
	T4-12	1.87	1.85	1.84	0.68	0.74
	4-30-(D4-12)	1.84	1.79	1.75	0.68	0.74
$\epsilon=16\%$	D4-12 le	1.91	1.87	1.85	0.71	0.75
	D4-30 le	1.97	1.81	1.70	0.72	0.75
	4le-30-(D4-12)	1.41	1.32	1.26	0.61	0.69
$\epsilon=10\%$	D4-12 le	1.79	1.75	1.73	0.65	0.77
	D4-12 le+Ar	1.48	1.41	1.40	0.65	0.77
	T4-12 le	1.33	1.32	1.31	0.58	0.70
	T4-12 le+Ar	1.14	1.12	1.11	0.57	0.70
	4-30-(D4-12 le+Ar)	1.11	1.08	1.07	0.58	0.70
	T4-12 2le+2Ar	0.81	0.80	0.80	0.47	0.66
$\epsilon=4\%$	T4-12 2le+2Kr	0.68	0.62	0.62	0.47	0.66
	D4-12 le	1.64	1.60	1.58	0.59	0.77
	D4-12 le+Ar	1.31	1.24	1.22	0.59	0.77
	D4-15 le+Ar	1.32	1.18	1.11	0.60	0.77
	D4-12 le+Kr	1.19	1.06	0.98	0.60	0.77
	T4-12 le	1.24	1.23	1.22	0.53	0.70
	T4-12 le+Ar	1.03	1.00	1.00	0.53	0.70
	T4-12 2le+2Ar	0.70	0.69	0.69	0.42	0.65
	T4-12 2le+2Kr	0.56	0.50	0.46	0.42	0.65



Figur 11 Effekter på U_{cog} som funktion av temperaturskillnaden mellan insida och utsida.



Figur 12 G -värdet (total solarenergitransmission) som funktion av U_{cog} . Värden för olika glaskombinationer beräknade i WINDOW 4.1 (0/20°C, 5 m/s).

2.2 Karm och båge

Värmeförlusterna genom karm och båge beror huvudsakligen av värmeledning. De termiska egenskaperna hos materialet är därför viktiga, men även geometrin spelar roll. Träkarmar är relativt bra eftersom trä har en låg värmekonduktivitet, speciellt i jämförelse med aluminiumkarmar. Då U -värdet hos glasdelen sänks från runt 2 W/m²K till 1 eller ännu lägre, blir dock glasdelen bättre än den traditionella trækarmen/-bågen. Det blir då viktigt att förbättra karmens isolerförmåga för att erhålla ett lågt U -värde för hela fönstret, U_{win} . Detta kan göras genom att använda mer värmeisolerande material i både båge och karm, se tabell 4. Den geometriska utformningen kan också ändras, isolerrutan kan exempelvis sänkas djupare ner i bågen för att öka längden för den väg

som värmen måste vandra. Karmen kan på samma sätt göras djupare. Idag finns det flera datorprogram som kan utnyttjas för att studera två- eller tredimensionellt värmeflöde, till exempel HEAT2&3 (Blomberg, 1996), FRAME™Plus, THERM m fl. Med dessa program blir det relativt enkelt (och billigt) att studera effekten av olika detaljutformning och material på det totala värmeflödet och den resulterande temperaturfördelningen.

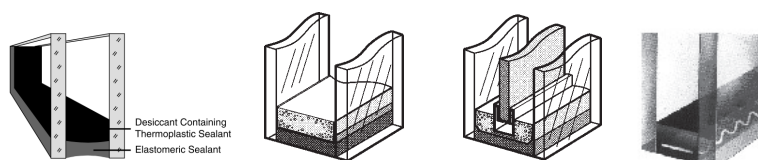
Tabell 4 Värmeledning för några olika material till distansprofiler, köldbryggebrytare, karmisolering och karmar. Från Thyholt et al. (1994).

Material	Värme- konduktivitet (W/m,K)	Huvudsakligt användningsområde
Aluminium	220	distansprofil/karm
Stål, galvaniserat	48	distansprofil
Stål, rostfritt	14.3	distansprofil
Polyamid, armerad	0.40-0.65	köldbryggebrytare
Gjuten polyuretan, armerad	0.20-0.30	köldbryggebrytare
PVC-extruderade profiler	0.16	köldbryggebrytare
Polykarbonat	0.20-0.23	karmisolering
Polystyren	0.14-0.18	karmisolering
Trä	0.12-0.14	karm
Polyuretanskum	0.02-0.03	karmisolering

Den i isolerrutor traditionella distansprofilen av metall (antingen av aluminium eller galvaniserat stål) har hög värmeledning och utgör en avsevärd köldbrygga i rutan själv. Nuförtiden finns det på världsmarknaden flera alternativa distansprofiler som har en lägre värmeledning, se figur 13. Dessa marknadsförs ofta som "warm-edge technologies" eller varm kant på svenska. Förbättringen på det totala fönster U -värdet, U_{win} , är ofta förhållandevis liten ($\Delta U_{win} = 0.1-0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$), men risken för att det bildas kondens på insidan av bågens bottenstycke reduceras kraftigt (Jonsson, 1985 och Frank, 1994), se även tabell 5. Användningen i Sverige har hittills varit mycket begränsad, men ett ökat intresse kan spåras för ögonblicket, speciellt för en termoplastisk profil som marknadsfördes för tre år sedan (Bally & Lenhardt, 1999). Den termiska effekten av olika karmar och kantförseglingssystem har studerats av flera författare (tex Carpenter & McGowan, 1993; Thyholt et al., 1994; Reilly, 1994). Beroende på vilket material som väljs i karm och distansprofil kan karmens U -värde, U_f , variera kraftigt. Thyholt anger U_f -värden mellan 5.4 och 1.8 $\text{W/m}^2\text{K}$, för öppningsbara tvåglasfönster (undantaget aluminiumfönster utan köldbryggebrytning).

Tabell 5 Linjär värmegenomgångskoefficient Ψ för olika distansprofiler och för två olika isolerrutor. Beräkningar för en tråkarm med $U_f=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Frank, 1984).

Distansprofil	Linjär värmegenomgångskoefficient Ψ (W/m,K)	
	Tvåglas isolerruta $U_{\text{cog}}=2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$	Le-belagd tvåglasruta $U_{\text{cog}}=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$
Aluminium	0.046	0.057
Kiselskum	0.020	0.023
Kiselskum med inbyggd rostfri distansprofil	0.023	0.028
Swiggle strip	0.029	0.035
Dubbel aluminium, med köldbryggebrytning	0.035	0.047
Rostfritt stål, U-formad	0.029	0.033
Glasfiber, ihålig	0.030	0.039



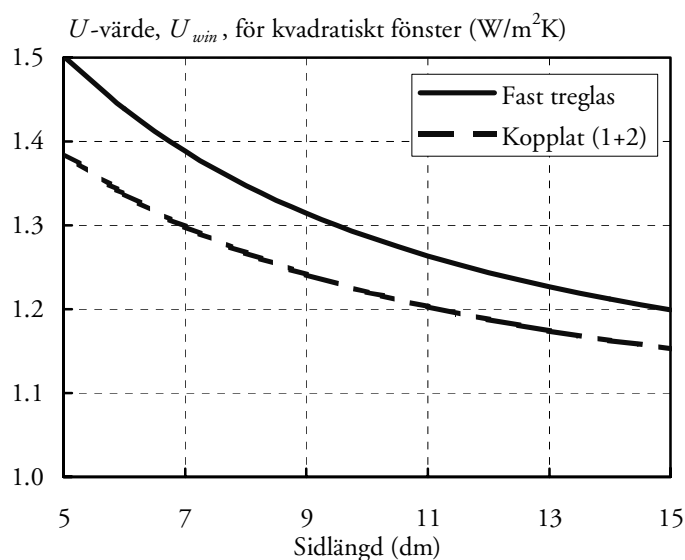
Figur 13 Alternativa distansprofiler, sk "warm-edge technologies".

3.3 Totala fönster U -värden

Trots den tekniska utvecklingen har inte så mycket hänt vad gäller utformningen av karm och båge under de senaste decennierna i Sverige. I en teknikupphandlingstävling som genomfördes av NUTEK 1992 kunde man finna ett sk energieffektivt fönster ($U_{\text{win}} < 1 \text{ W/m}^2\text{K}$) som använde en distansprofil av rostfritt stål (i en treglas isolerruta) men i alla kopplade fönster (1+2) användes vanliga distansprofiler av galvaniserat stål. Det fanns också några exempel på fönster som bröt köldbryggan i tråkarmen med ett annat material, t ex polyuretan. Dessa lösningar har dock använts sparsamt eftersom man varit osäker på hur detta skulle fungera på lång sikt, t ex avseende fukttransport och livslängd. Tråkarmar är fortfarande den vanligaste typen i Sverige, tillsammans med två- eller treglas isolerrutor med traditionella distansprofiler i stål. De resulterande U -värdena för fönstrets olika delar för tre vanligt sålda fönster visas i tabell 6. Tabellen visar att det är svårare att åstadkomma ett lågt fönster U -värde i en treglas isolerruta än i ett kopplat treglasfönster (1+2), eftersom köldbryggan längs glasranden är mer uttalad i första fallet. I fasta fönster är karmen smalare, vilket vanligen resulterar i högre U -värden för karmen. I gengäld blir glasandelen högre. Dessa U -värden kan också användas för att uppskatta U_{win} för andra fönsterstorlekar än den som beräkningarna är gjorda för. Detta är gjort i figur 14 som visar det uppskattade U_{win} för kvadratiske fönster av olika storlek. Effekten på det totala U -värdet är ganska stor: det ökar med 0.23-0.30 $\text{W/m}^2\text{K}$ när fönsterstorleken minskar från 1.5 m sidlängd till 0.5 m sidlängd.

Tabell 6 U -värden för några vanliga moderna svenska träfönster med storleken 1.18×1.18 m beräknat med programmet FRAME. Träkarm och dubbelförseglade isolerrutor med galvaniserade distansprofiler i stål. (Källa: Elitfönster AB).

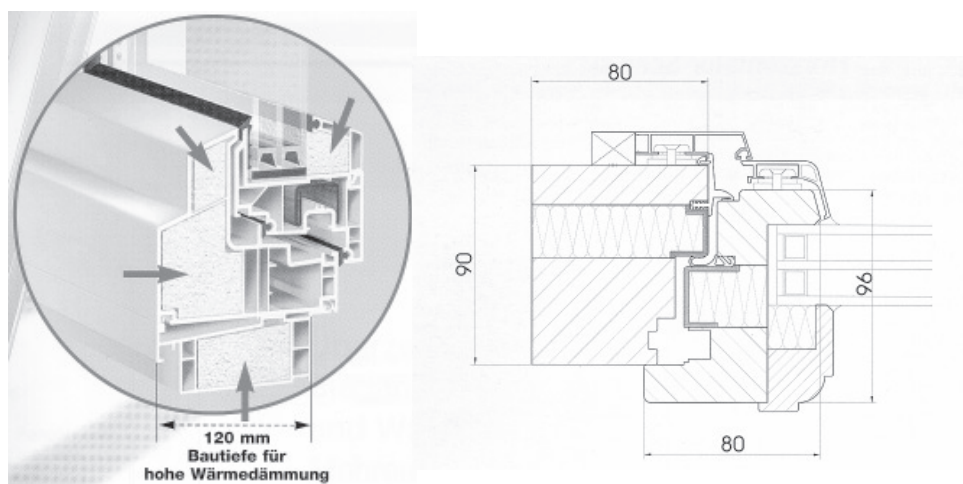
Projicerad area	Kopplat (1+2) inåtgående fönster		Treglas vridfönster		Treglas fast fönster	
	Area (m ²)	U -värde (W/m ² K)	Area (m ²)	U -värde (W/m ² K)	Area (m ²)	U -värde (W/m ² K)
Karm, topp/sida	0.281	1.38	0.321	1.44	0.178	1.74
Karm, botten	0.129	1.74	0.124	2.16	0.063	1.63
Glasrand, topp/sida	0.172	1.24	0.169	1.57	0.188	1.72
Glasrand, botten	0.064	1.28	0.062	1.44	0.068	1.48
Glasmitt	0.747	1.00	0.716	1.00	0.895	1.00
Totalt	1.392	1.19	1.392	1.29	1.392	1.24



Figur 14 Totala fönster U -värdena som funktion av fönsterstorlek. Ett kvadratisk fönster har antagits.

I Tyskland har det förekommit en utveckling av superisolerade fönster för så kallade passiva hus (hus med extremt lågt värmebehov) (Feist, 1995). Det finns troligen ett dussin fönstertyper med U_{win} runt 0.7 W/m²K på den tyska marknaden idag. Dessa fönster har ofta en karm och båge nästan uteslutande gjord av polyuretan eller andra högisolerande material, figur 15. Glaspaketet består vanligtvis av en treglas isolerruta med två le-skikt och krypton i båda spalter.

När man vill förbättra U -värdet hos karm och båge är det viktigt att detta görs utan att introducera mer klumpiga lösningar, vilket inte är önskvärt ur arkitektonisk eller estetisk synvinkel. Förväntad livslängd är en annan viktig fråga. Det kan ifrågasättas om dessa saker är lösta i åtminstone en del av exemplen på superfönster från Tyskland.



Figur 15 Två exempel på tyska fönster med totalt fönster U -värde runt $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3 Nettoenergitransport genom fönster

Inledningsvis sadades att nettoenergitransporten genom ett fönster beror av energiförluster ut genom fönstret, Q_{loss} , (vilken bl a beskrivs av U -värdet) resp solinstrålning inåt, Q_{solar} , (vilken bl a bestäms av g -värdet). Därefter beskrevs i de följande avsnitten hur U -värdet resp g -värdet för ett fönster beräknas. Fönstrets totala U -värde beskrevs vidare som medelvärde (viktat mot arean) av U -värdet för karm/båge resp för glasdelen. Även g -värdet kan beräknas på motsvarande sätt, dvs som medelvärde av glasdel resp karm.

Nettoenergitransporten genom ett fönster kan uppskattas med allt från enkla handberäkningsmetoder till avancerade energisimuleringsprogram som även tar hänsyn till samverkan med rummet, dynamiska effekter av värmelagring i stomme, varierande internlast, ventilation etc. Dynamiska program är i allmänhet något svårare att använda, men i gengäld kan man få veta mycket mer om sin byggnad, t ex maximala effektbehov och luft- och yttemperaturer förutom rena årsenergibehov för uppvärmning och ev. kylning. Här kommer vi dock bara att beskriva en enkel handberäkningsmetod som endast tittar på nettoenergitransporten genom en kvadratmeter fönster. Metoden som har kallats "Karlssons fönsterformel" baserar sig på en enkel gradtimmermetod (Karlsson & Brunström, 1987; Roos & Karlsson, 1994). För att bedöma och jämföra fönster ur uppvärmningssynpunkt är energitransporten genom fönstret bara intressant under uppvärmningssäsongen. Det gäller därför att bestämma uppvärmningssäsongens längd, för att därefter kunna räkna ut antalet gradtimmar och den ackumulerade solstrålningen under samma period.

I Karlssons fönsterformel definieras nettoenergitransporten genom fönstret, Q , som:

$$Q = Q_{solar} - Q_{loss} = \bar{g}S(t_b) - UG(t_b) \quad (10)$$

där \bar{g} är medelvärdet för den totala solenergitransporten under uppvärmningssäsongen (-), S är den ackumulerade solstrålningen på fönstret summerad upp till balanstemperaturen ($\text{Wh/m}^2\text{,yr}$), U är U -värdet för fönstret ($\text{W/m}^2\text{K}$), och G är gradtimmarna summerade upp till byggnadens balanstemperatur. ($^{\circ}\text{Ch/yr}$). Balanstemperaturen definieras som den utetemperatur för vilken byggnaden inte behöver någon aktiv uppvärmning. För klimatet i Älvkarleby (lat 60°N) fann Roos & Karlsson (1994) att \bar{g}

kunde representeras av g -värdet för 55° infallsvinkel. Med klimatdata för Älvkarleby 1985, en innetemperatur på 20°C och en balanstemperatur på 13°C , blir ovanstående ekvation (i $\text{kWh}/\text{yr}, \text{m}^2$ glasarea), (Merkell, 1989):

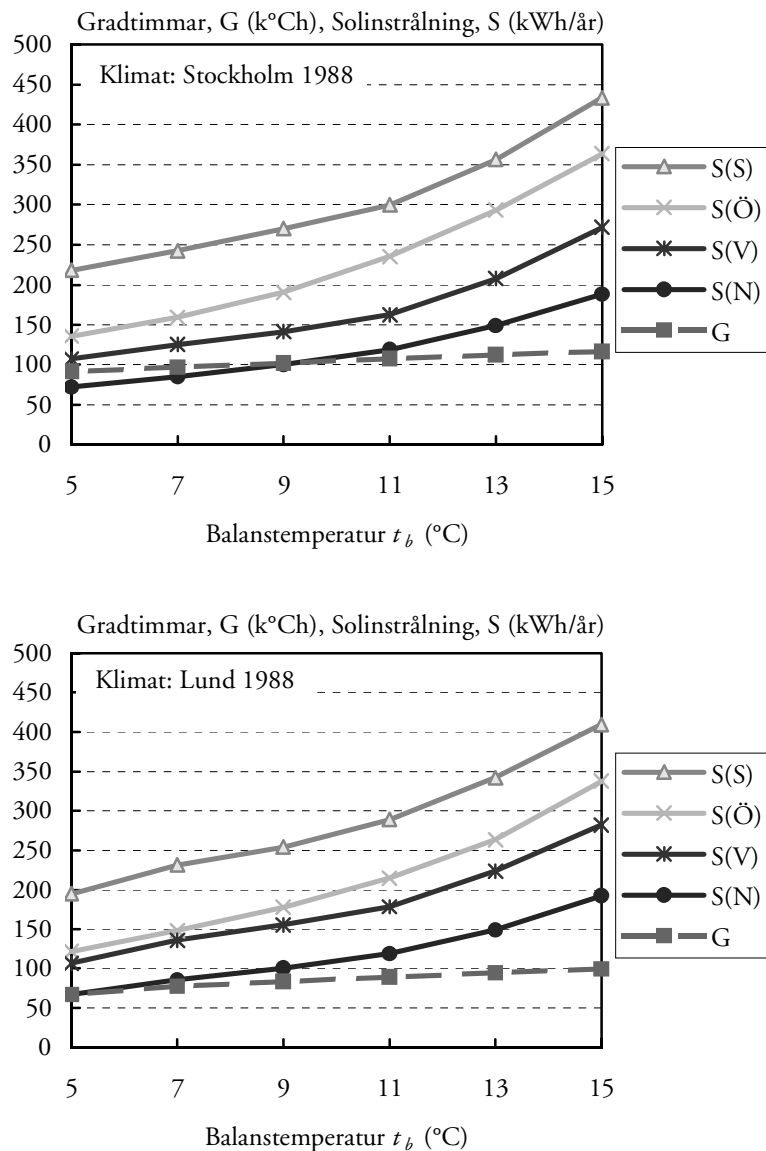
$$\text{Fönster mot söder: } Q = \bar{g} \cdot 465 - U \cdot 127 \quad (11a)$$

$$\text{Fönster mot öster: } Q = \bar{g} \cdot 324 - U \cdot 127 \quad (11b)$$

$$\text{Fönster mot väster: } Q = \bar{g} \cdot 234 - U \cdot 127 \quad (11c)$$

$$\text{Fönster mot norr: } Q = \bar{g} \cdot 130 - U \cdot 127 \quad (11d)$$

För klimatet Lund (1988) resp Stockholm (1988) har S och G beräknats som funktion av orientering och balanstemperatur, se figur 16. Senare har även Joakim Karlsson datoriserat metoden och infört en beräkning timme för timme (Karlsson, 2000).



Figur 16 Ackumulerad solinstrålning för en kvadratmeter glas i olika väderstreck, samt gradtimmar som funktion av balanstemperaturen. Stockholm 1988 (överst) och Lund 1988 (underst).

Referenser

- Arasteh, D., Reilly, S. & Rubin, M. (1989). A Versatile Procedure for Calculating Heat Transfer Through Windows. *ASHRAE Trans.* 95 Pt 2. 755-765.
- Bally, M. A. & Lenhardt, K. (1999). TPS – Thermo Plastic Spacer System – A New, Revolutionary and Future-Oriented Production Technology for the High-Tech Insulating Glass of Tomorrow. Proceedings of *Glass Processing Days*, 13-16 June'99, Tampere, Finland.
- Blomberg, T. (1996). *Heat Conduction in Two and Three Dimensions. Computer Modeling of Building Physics Applications.* (Report TVBH-1008). Lund, Sweden: Lund University, Department of Building Physics.
- Carpenter S. & McGowan, A. (1993). Effect of Framing Systems on the Thermal Performance of Windows. *ASHRAE Transactions* 99(1) 907-914.
- ElSherbiny, S. M., Raithby, G. D. & Hollands, K. G. T. (1982). Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Air Layers. *Journal of Heat Transfer*, Feb 1982, 104 96-102
- EN 673 (1997). *Glass in building - Determination of thermal transmittance (U value) - Calculation method.*
- Feist, W. (1995). *The Passive Houses at Darmstadt/Germany.* Darmstadt, Institute Housing and Environment (IWU).
- Ferguson, J. E. & Wright, J. L. (1984). *Vision: A computer program to evaluate the thermal performance of super windows*, Solar Energy program, National Research Council Canada, Report No Passice-10, June 1984.
- Frank, T. (1994). *Thermische Verbesserung des Glasrandverbundes.* Status-seminar "Energieforschung im Hochbau", 15/16 Sep 1994. (in German).
- Granqvist, C. G. (1981). Radiative heating and cooling with spectrally selective surfaces. *Applied Optics* 20(15) 2606-2615.
- Hollands, K. G. T., Unny, T. E., Raithby, G. D. & Konicek, L. (1976). Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers. *Journal of Heat Transfer*, May 1976, 98 189-193.
- IESNA (1993). *Lighting Handbook.* 8th edition. New-York: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA).
- ISO 9050:1990. *Glass in building – Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance, and related glazing factors.*
- ISO 9845-1:1992. *Solar energy – Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions – Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5.*
- ISO 10077-1:2000. *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: Simplified method.*
- ISO/DIS 10077-2. *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames.*

- ISO/DIS 15099. *Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations.*
- Jonsson, B. (1985). *Heat transfer through windows. During the hours of darkness with the effect of infiltration ignored.* (Document D13:1985). Stockholm: Swedish Council for Building Research.
- Karlsson, B. & Brunström, C. (1987). Characterization of transparent insulation materials. *Proc. of Building Physics in the Nordic Countries*. Lund, Sweden, Aug 24-26 1987.
- Karlsson, J. (2001). WinSel- a general window selection- and energy rating tool, *Proc. of WREN-2000*. Brighton, UK, July 1-7, 2000.
- Karlsson, J., Karlsson, B. & Roos, A. (2001). A simple model for assessing the energy performance of windows. *Energy and Buildings* **33**(7) 641-651.
- Karlsson, J. & Roos, A. (2000). Modelling the angular behaviour of the total solar energy transmittance of windows. *Solar Energy* **69**(4) 321-329.
- Karlsson, J., Rubin, M. & Roos, A. (2001). Evaluation of predictive models for the angle-dependent total solar energy transmittance of glazing materials. *Solar Energy* **71**(1) 23-31.
- LBL (1992). *WINDOW 4.0: Program Description. A PC Program for analyzing the thermal performance of fenestration products.* (Report LBL-32091, TA-285). Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Laboratory.
- Merkell, A.-L. (1989). *Årligt energiflöde genom fönster samt k-värden hos fönster med plastfolier och lågemitterande beläggningar.* Älvkarleby: Älvkarlebylaboratoriet.
- prEN 10077-2. *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames* (equal to ISO/DIS 10077-2:1998)
- Reilly, S. (1994). Spacer Effects on Edge-of-Glass and Frame Heat Transfer. *ASHRAE Transactions* **100**(1) 1718-1723.
- Roos, A. (1994). *Bestämning av optiska egenskaper hos fönster.* (Determination of optical performance of windows). Uppsala: Uppsala Universitet, Teknikum. (in Swedish).
- Roos, A. (1997). Optical characterization of coated glazings at oblique angles of incidence: measurements versus model calculations. *Journal of Non-Crystalline Solids* **218** 247-255.
- Roos, A. & Karlsson, B. (1994). Optical and thermal characterization of multiple glazed windows with low U-values. *Solar Energy* **52**(4) 315-325.
- Thyholt, M., Andresen, I., Hugdal, B. & Aschehoug, Ø. (1994). *Frame and Edge Seal Technology. A State of the Art Survey.* IEA Solar Heating and Cooling Programme, Task 18, Case Study B9, Working Document T18/B9/WD1/94 STF62 A94004 Trondheim, NO: SINTEF Arkitektur og byggteknikk.