



Anna Werner

Tel 010 – 505 00 16  
Mobil 076 818 49 15  
Fax 010 – 505 00 10  
anna.werner@afconsult.com

Datum  
2015-12-15

Version  
3

Uppdragsnr  
546238

# Hur egenkonvektion mellan glaset påverkar ett fönsters U-värde

ÅF-INFRASTRUKTUR AB  
Effektiv Energianvändning

Granskad av Karin Byman

## Innehåll

<b>1. BAKGRUND .....</b>	<b>3</b>
<b>2. SYFTE .....</b>	<b>3</b>
<b>3. AVGRÄNSNINGAR .....</b>	<b>3</b>
<b>4. OVENTILERADE LUFTSPALTER .....</b>	<b>3</b>
<b>5. KONVEKTION .....</b>	<b>4</b>
5.1 NATURLIG KONVEKTION .....	5
5.2 PÅTVINGAD KONVEKTION .....	5
<b>6. NÅGRA FYSIKALISKA FÖNSTERTERMER .....</b>	<b>5</b>
<b>7. STANDARDERNA .....</b>	<b>6</b>
7.1 SS-EN ISO 673 .....	6
7.2 ISO 15099 .....	9
7.3 SS-EN ISO 10077-1 .....	9
<b>8. BERÄKNINGSPROGRAMMEN .....</b>	<b>9</b>
8.1 CALUMEN .....	9
8.2 SPECTRUM .....	10
8.3 IDA .....	<b>FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.</b>
8.3.1 <i>Window</i> .....	10
8.3.2 <i>Detailed Window</i> .....	11
8.4 FLOVENT .....	11
8.5 HEAT .....	13
8.6 TEKNO SIM .....	15
<b>9. SVÅRT BERÄKNA VÄRMEFLÖDEN I FÖNSTER? .....</b>	<b>15</b>
9.1 TRE TYPER AV VÄRMEÖVERFÖRING .....	15
9.2 REFLEKTERANDE ISOLERING .....	15
9.3 MÄTA ISTÄLLET FÖR ATT BERÄKNA .....	16
<b>10. ABSTRACT IN ENGLISH .....</b>	<b>17</b>
<b>11. LITTERATURFÖRTECKNING .....</b>	<b>18</b>



## 1. Bakgrund

I en tidigare rapport, *Fönster – tillgång och problem*, finansierad av Ångpanneföreningens forskningsstiftelse och som finns på stiftelsens hemsida, studeras hur fönsters värmegenomgångskoefficient, U-värde, beror på olika faktorer, såsom lutning och temperaturförhållanden inne och ute. Föreliggande rapport kan ses som en fristående fortsättning på det arbetet, och fokuserar på hur olika beräkningsprogram och beräkningsstandarder för U-värden fungerar.

## 2. Syfte

Syftet är att belysa aktuella frågeställningar kring hur värmeflödet genom fönster beräknas och simuleras. Fokus har varit på hur konvektionen kan påverka U-värdet (värmegenomgångskoefficient). Eftersom energitransporterna hänger ihop behandlas även g-värdet (solfaktorn).

I texten redovisas och diskuteras ett antal beräkningsprogram. De hanterar energitransporterna på olika sätt, främst eftersom programmen har olika användningsområden. Syftet har varit att syna dessa program och belysa hur de kopplar till olika standarder. Rapporten riktar sig till personer som arbetar med energiberäkningar, men är osäker på hur fönster ska hanteras i beräkningarna. För- och nackdelar med de olika sätten att approximera värmeflöden genom fönster diskuteras.

## 3. Avgränsningar

När man bygger med glas beaktas normalt betydligt fler aspekter än energi. Det handlar om brand, personsäkerhet, vandalskydd, inbrottskydd, dagsljus, hur montaget kan underlättas, ljud, med mera. I den här rapporten är fokus enbart på energifrågor kring fönster, övriga aspekter behandlas ej.

I projekteringsstadiet, då beslut tas om dimensionering av värme- och kylanläggning, är det viktigt att även se till komforten i rummet, inte bara till energianvändningen. Vid stora fönster, beror den termiska komforten t ex till stor del av temperaturen på det innersta glasets innersta yta (in mot rummet). Stora, kalla fönster ger en låg operativ temperatur i rummet, även om den ”vanliga” (i rummet uppmätta) lufttemperaturen är behaglig. Den operativa temperaturen är en bättre approximation av vilken temperatur som vi upplever, då den tar hänsyn till strålningsutbyte mellan hud och ytor i rummet. Stora, kalla fönsterglas gör att värme strålar från huden mot fönstren, vilket gör att rummet upplevs som kallare än det i själva verket är.

## 4. Oventilerade luftspalter

Då U-värdet ska beräknas skiljer man på ventilerade och oventilerade luftspalter. Värmetekniskt är en spalt ventilerad då den avsiktligt ventileras genom betydande öppningar mot omgivningen. Spalter mellan fönsterglas är oftast (värmetekniskt) oventilerade, men det förekommer att luft mekaniskt sugas genom spalten. När det i värmebehovsberäkningar finns (värmetekniskt) *ventilerade* luftspalter räknar man med att luftspalten inte utgör något värmemotstånd alls. I Byggvägledning 8 (sid 82) finns en



4 (18)

tabell med värden på värmemotstånd för *oventilerade* luftspalter som kan användas vid värmebehovsberäkningar (Elmroth, 2007). Tabellen ger olika värden för värmemotståndet beroende på luftspaltens tjocklek och värmeflödets riktning (uppåt, nedåt eller horisontellt). Tabellen är oftast missvisande för material med låg emittans<sup>1</sup> (under 0,8). Obelagt fönsterglas har hög emittans (0,847), men idag finns i nästan alla sålda fönsterglaskombinationer åtminstone en belagd yta med låg emittans (i storleksordningen 0,01–0,3).

I byggvägledningen står att om luftspalten är *till viss del ventilerad* bör inte högre värmemotstånd än 0,15 m<sup>2</sup>K/W användas i beräkningarna. Det finns en tumregel för hur man kan beräkna värmemotstånd i delvis ventilerad luftspalt (Berggren, 2010):

$$R_T = \frac{1500 - A_v}{1000} R_{T,u} + \frac{A_v - 500}{1000} R_{T,v},$$

där

$A_v$  = luftspaltens öppning (mm<sup>2</sup>)

$R_{T,u}$  = luftmotstånd för oventilerad luftspalt

$R_{T,v}$  = luftmotstånd för väl ventilerad luftspalt

För en vertikal luftspalt (t ex i en vägg) gäller tumregeln då luftspaltens öppning är 500–1 500 mm<sup>2</sup> per löpmetr. Om t ex en räfflad plåt sätts i en väggkonstruktion ska, för att tumregeln ska vara användbar, hålens sammanlagda area mot sockel (eller tak) på en meter av väggen ligga i intervallet.

För en vertikal luftspalt (t ex i ett tak) gäller tumregeln då luftspaltens öppning är 500–1 500 mm<sup>2</sup> per m<sup>2</sup>. Om det t ex finns en plastfolie med luftspalt upp mot tak och denna folie punkteras på alla hål för infästning av lampor etc, måste den sammanlagda arean av alla dessa hål ligga i intervallet för att tumregeln ska vara applicerbar.

I de fall som fönster har ett yttre skyddande solskyddsglas med springa över och under glaset borde denna tumregel kunna användas för att avgöra om spalten är till viss del ventilerad. Om den största springan (det är bara den största springans area som är intressant) är högst 1,5 mm bred blir ju dess area 1 500 mm<sup>2</sup> per löpmetr av väggen med fönster och spalten borde kunna anses vara just till viss del isolerad.

För avsiktligt ventilerade spalter approximeras värmemotståndet ofta till noll i värmebehovsberäkningar, enligt byggvägledningen.

Den här rapporten fokuserar på oventilerade luftspalter, som fortfarande är vanligast förekommande.

## 5. Konvektion

Konvektion är en värmetransportmekanism som gör att ett strömmande medium transporterar värme mellan ställen med olika temperatur (Burström, 2009). Mellan glaset i

---

<sup>1</sup> Emittans (även kallat emissivitet) anger hur benägen en yta är att avge sin energi i form av strålning vid en viss temperatur i förhållande till en (ideal) svartkroppsstrålare.



ett fönster är mediet ofta gasblandningen luft, men andra medier förekommer, främst ädelgasen argon i nya fönster. Orsakerna till luftrörelserna kan variera. Man skiljer mellan naturlig och påtvingad konvektion.

## 5.1 Naturlig konvektion

Varm luft är lättare än kall.<sup>2</sup> Det är den enkla orsaken till naturlig konvektion. I ett rum kommer luften att cirkulera så att den varma luften strömmar från varma väggar mot kalla där den avlämnar en del värme. Vid den kalla väggen uppstår en nedåtgående ström av avkyld luft, ett så kallat kallras, som gör att luften intill golvet blir kall.

I en vertikal luftspalt uppstår naturlig konvektion på samma sätt eftersom spaltens begränsningsytor har olika temperatur. Denna konvektion bidrar till värmetransporten genom väggen/fönstret och är därför den som är intressant i föreliggande rapport. I en horisontell luftspalt förekommer också naturlig konvektion då den varma sidan befinner sig underst, som i ett takfönster. Luftrörelserna blir dock mer oregelbundna än i vertikala spalter.

## 5.2 Påtvingad konvektion

Då luften sätts i rörelse av yttre påverkan, t ex vind eller fläktar, talar man om påtvingad konvektion. Konvektionen kan också ske i form av läckage genom hål, springor och andra otätheter.

Eftersom vi i den här rapporten fokuserar på oventilerade luftspalter, enligt avsnitt 4 ovan, blir den typ av konvektion som studeras här naturlig konvektion. Det räcker inte med att isolerrutan är punkterad för att få påtvingad konvektion. Luftväxlingen vid punktering är mycket långsam.

## 6. Några fysikaliska fönstertermer

**Solfaktorn, g-värdet**, anger hur stor andel av solenergin som träffar glaset som tillförs rummet, värde mellan 0 (0 %) och 1 (100 %).

**Värmegenomgångskoefficienten, U-värdet**, är ett mått på den totala värmeöverföringsförmågan, (ju högre U-värde desto bättre värmeöverföringsförmåga), och har enheten  $W/m^2, K$ . U-värdets invers är den termiska resistansen, **R**.

**Den termiska resistansen, R**, för ett enkelglas är mycket låg. För att öka den termiska resistansen görs tvåglasfönster eller fönster med fler glas. Då är det första glaset separerat från det andra glaset med en luftspalt eftersom luft har ett lågt värmeledningstal, en dålig ledningsförmåga. Med lågemissionsskikt på en av glasytorna mot luftspalten blir det dessutom svårt för långvågig strålning att ta sig från det ena glaset till det andra över luftspalten.

---

<sup>2</sup> Densiteten hos luft är vid rumstemperatur ca  $1,2 \text{ kg/m}^3$  och ändras med ca 1 % vid en temperaturförändring på  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  (allmänna gaslagen).



6 (18)

Den termiska resistansen för ett dubbelglasfönster ökar då spaltavståndet ökar eftersom "tjockleken" på det dåligt ledande materialet luft ökar. Efter ca 20-25 mm ökar dock inte den här isolerande effekten då glaset flyttas isär ytterligare. Det beror på att konvektionen ökar, vilket höjer U-värdet, d v s sänker den termiska resistansen, R. Då får man ta till andra medel för att sänka U-värdet, t ex lågemitterande beläggning som gör det svårare för den långvågiga strålningen att komma över luftspalten eller en inert gas i spalten som minskar ledning och konvektion i spalten.

U-värden har ofta index  $g$ ,  $U_g$ , då glasdelen avses. Det totala U-värdet för fönstret blir högre än  $U_g$  i nya fönster eftersom glaset idag är mer välisolerade än karm och båge. För äldre fönster gäller det motsatta; karm och båge är mer välisolerade än glasdelen så att  $U_g$  är högre än fönstrets totala U-värde.

**Total solenergitransmittans, ST** som i Solar Transmittance, anger hur stor del av den solenergi som träffar glaset som går direkt genom glaskombinationen in i rummet. Detta värde är lägre än  $g$ -värdet, eftersom  $g$ -värdet även omfattar den solenergi som först har absorberats i glaskombinationen för att sedan skickas vidare in i rummet antingen som infraröd strålning (värme) eller genom ledning och konvektion.

## 7. Standarderna

### 7.1 SS-EN ISO 673

För glaskombinationens U-värde,  $U_g$ , används oftast mittpunktsvärdet enligt standarden SS-EN ISO 673. Det är det värde som glasleverantörerna (Emmaboda, Pilkington, AGC, Glaverbel, med flera) anger i tabeller på sina hemsidor och i sina kataloger. Flera glasleverantörer, bl a Emmaboda och Pilkington, har program som kan laddas ned från deras hemsidor så att man själv kan plocka ihop en glaskombination och se vad den får för dagsljustransmittans, ljudisolering, och så vidare. I dessa program beräknas U-värdet med SS-EN ISO 673.

Standarden räknar inte spektralt fram  $U_g$ , utan använder det faktum att emittansen är mer eller mindre konstant i IR-området. Obelagda glas har visserligen två fononband i IR-spektrum, men approximationen om konstant emittans i IR är för belagda glas mycket korrekt. Även emittansens temperaturberoende bortses från i standarden, då det är försumbart i sammanhanget.

Som indata i SS-EN ISO 673 används de integrerade emittanserna för varje yta på glaset. Själva glaset i sig hanteras av standarden nästintill som en kortslutning. Det är därmed bara emittanserna och egenskaper för spalten (som kan vara t ex luft- eller argonfylld) som behövs som indata i beräkningarna.

Kanteffekter omfattas inte av standarden. Om man räknar med att hela glasdelen på fönstret har det  $U_g$  som erhålles med SS-EN ISO 673 får man därmed ett för lågt U-värde. För att få hela fönstrets U-värde (inte bara glasdelen) används den förenklade standarden SS-EN ISO 10077-1 eller den mer noggranna SS-EN ISO 10077-2. Då viktar man samman glasdelen  $U_g$  med ramens  $U_f$ , där indexet  $f$  står för engelska *frame*. Även köldbryggor som uppstår i övergången mellan glas och ram tas hänsyn till i dessa standarder.



Det går också att göra mätningar i laboratorium på hela konstruktionen. Då heter standarden EN ISO 12567-1. Sådana hot-boxmätningar görs i Sverige av SP i Borås.

Värmeöverföring genom konvektion och ledning i spalten beror på mediets temperatur, densitet, dynamisk viskositet, konduktivitet och specifika värmekapacitet (Carlson, 2005) samt spaltens bredd och höjd. I SS-EN ISO 673 beräknas  $U_g$  för vissa specifika förhållanden, som givetvis mycket sällan inträffar. Förutsättningarna är att det är 0 °C ute och 20 °C inne, att det yttre värmeöverföringstalet,  $R_e$ , är 0,04 och att det inre,  $R_i$ , är 0,13. I dessa senare två värden, som förklaras i ekvationen några stycken längre fram, ligger antaganden om vind ute på 3,4 m/s och vindstilla inomhus.

Gångse regel för att anpassa  $R_e$  efter vindstyrka utomhus (Berggren, 2010):

Vindstyrka (m/s)	$R_e$ (W/m <sup>2</sup> ,K)
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
10	0,02

Det  $U_g$  som standarden SS-EN ISO 673 ger är ett bra verktyg för att jämföra  $U_g$  för olika glaskombinationer. För t ex en värmeöverföringsberäkning ger standarden ett något för lågt U-värde. För dimensionering av byggnadens värmeanläggning måste hänsyn även tas till fönstrets lutning, temperaturer inne och ute, vind, strålning mot klar himmel, springor, etc.

Standarden ger ett mörker- och steady-state-U-värde. Den tar därmed inte hänsyn till att inkommande solljus påverkar U-värdet och inte heller till hur klimat och omvärldsfaktorer i övrigt påverkar U-värdet.

U-värdet ges i SS-EN ISO 673 av

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} = R_e + R_t + R_i = R$$

$h_e$  och  $h_i$  är den externa respektive interna värmeövergångskoefficienten (d v s  $h_i$  är ett mått på hur lätt det är för värmen att ta sig från luften i rummet till den första glasytan och  $h_e$  ett mått på hur lätt det är för värmen att ta sig från den yttersta glasytan till luften utanför).  $h_t$  är den totala termiska värmeöverföringskoefficienten för värmeöverföringen genom glaskombinationen (d v s från första glasytan som vetter in mot rummet till den sista ytan som är utomhus).

Det är denna term,  $h_t$ , som innehåller bland annat värmeöverföringen till följd av naturlig konvektion i spalten/spalterna.



8 (18)

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j r_j$$

$h_s$  är den termiska ledningen i varje gasspalt,  $N$  är antalet spalter,  $d_j$  är tjockleken på varje materiallager,  $r_j$  är den termiska resistiviteten för varje material och  $M$  är antalet materiallager. Glasets värmeledning finns således med i standarden, men bidraget blir försumbart. Har man riktigt tjocka glas kan det möjligen börja få betydelse. För 4 mm glas är det helt försumbart. Temperaturfallet genom glaset blir i storleksordningen 0,1 °C.

$$h_s = h_g + h_r$$

$h_r$  är strålningsledning och  $h_g$  är gasens ledning. Båda dessa definieras i sin tur genom nedanstående ekvationer.

$$h_r = 4\sigma \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3$$

$\sigma$  är Stefan-Boltzmanns konstant,  $T_m$  är den absoluta medeltemperaturen i gasspalten och  $\varepsilon_1$  och  $\varepsilon_2$  är de integrerade emittanserna vid  $T$ .

$$h_g = N_u \frac{\lambda}{s}$$

$N_u$  är Nusselts tal,  $s$  är spaltens bredd och  $\lambda$  är den termiska konduktiviteten.

$$N_u = A(G_r P_r)^n$$

$A$  är en konstant som är 0,035 för vertikala fönster,  $G_r$  är Grashofs tal,  $P_r$  är Prandtls tal och  $n$  är en exponent som är 0,38 för vertikala fönster.

$$G_r = \frac{9,81 s^3 \Delta T \rho^2}{T_m \mu^2}$$

$$P_r = \frac{\mu c}{\lambda}$$

$\Delta T$  är temperaturskillnaden mellan de två glasytorna som avgränsar luftspalten,  $\rho$  är densitet,  $\mu$  är dynamisk viskositet,  $c$  är den specifika värmekapacitiveteten och  $T_m$  är medeltemperatur.

Om värdet på  $N_u$  med ovanstående formler blir lägre än 1 används  $N_u=1$ . Ett värde större än 1 visar att konvektion förekommer, medan ett värde under 1 betyder att värme-flödet i spalten endast består av ledning. Standarden förutsätter med andra ord att någon typ av konvektion förekommer så länge det finns en temperaturskillnad mellan glas-





ytorna, vilket ju är rimligt. Annars skulle U-värdet hela tiden minska då avståndet mellan glaset ökas.

I den tidigare nämnda rapporten finansierad av Ångpanneföreningens forskningsstiftelse, avsnitt 3.1, finns mer kommentarer till standarden SS-EN ISO 673 (Werner, Fönster - tillgång och problem, 2008). Intressant i detta sammanhang är att nämna att standarden kan jämföras med SS-EN ISO 10456 som används för att bedöma om risk för egenkonvektion finns i traditionella isolermaterial (Berggren, 2010).

Standarden SS-EN ISO 10456 ger en formel för att räkna fram Rayleighs tal,  $R_{am}$ . För horisontella värmefflöden (t ex genom väggar) anses korrektionstermer för egenkonvektion inte behövas om  $T_{am}$  är under 2,5. För uppåtgående värmefflöden (t ex genom tak) anses korrektionstermer inte behövas om  $T_{am}$  är under 15. Skillnaden i högsta "tillåtna" tal är befogad då luften i en vägg har betydligt lättare att få fart på egenkonvektionen tack vare den höga "höjden" på väggen jämfört med i taket. Så här beräknas  $T_{am}$ :

$$T_{am} = 3 \cdot 10^6 \frac{dk\Delta T}{\lambda}$$

där  $d$  är det isolerande materialets tjocklek och  $k$  är dess permeabilitet.  $\Delta T$  är temperaturskillnaden över materialet och  $\lambda$  är värmeledningstalet.

Noterbart är att det inte finns någon väl etablerad beräkningsmetod för att ta hänsyn till egenkonvektion (om nu  $T_{am}$  skulle vara högt) vid värmeöverföringsberäkningar.

## 7.2 ISO 15099

Standarden ISO 15099 räknar också fram U-värdet för enbart glasdelen av fönstret,  $d$  v s  $U_g$ . Det som skiljer den från SS-EN ISO 673 är att den även tar hänsyn till temperaturförhållanden inne och ute.

## 7.3 SS-EN ISO 10077-1

Som underlag för enkel beräkning av energibehov kan SS-EN ISO 10077-1 användas för att erhålla ett teoretiskt  $U_w$ , (där  $w$  står för *window*), (Carlson, 2005).

Standarden anger hur viktning med areor,  $A$ , kan göras så att hänsyn tas även till (linjära och punktformiga) köldbryggor,  $\psi$ , med enhet  $W/m, K$ .  $l_g$  är glasets omkrets.

$$U_f A_f + U_g A_g + \psi_g l_g = U_w A_w$$

# 8. Beräkningsprogrammen

## 8.1 Calumen

Glastillverkaren Saint Gobains mjukvara för att beräkna glaskombinationers egenskaper heter Calumen och finns att ladda ned gratis på nätet (<http://www.saint-gobain->



glass.com/ukv2/tools/register.asp). En ny version kom under 2010. Programmet använder standarderna SS-EN 410 för g-värdet och ISO 9050 ( $\approx$ SS-EN 673) för U-värdet.

## 8.2 Spectrum

Optiska och termiska prestanda för vald glaskombination beräknas i glastillverkaren Pilkingtons program i enlighet med europeisk standard: SS-EN ISO 673 avseende beräknat U-värde och SS-EN ISO 410 avseende ljus- och solenergiprestanda.

## 8.3 IDA Klimat och Energi

Ett av de energiberäkningsprogram som används mest av svenska energikonsulter är IDA Klimat och Energi, ([www.equa.se](http://www.equa.se)). Programmet används för dimensionering av värme- och kylsystem, för att ta reda på det totala värme- och kylbehovet under året för en byggnad, samt för att studera inomhusklimat. Programmet ger två möjligheter att simulera fönster; det finns två fönstermodeller i IDA. Den som används mest är den som heter "Window" (avsnitt 8.3.1) och den andra heter "Detailed Window" (8.3.2).

### 8.3.1 Window

I IDAs enkla fönstermodell, Window, matar användaren in den färdiga glaskombinationens g-värde,  $U_g$  och direkt transmittans av solenergi ST (som i *Solar Transmittance*). Även emittanser på den yttre ytan (utomhus) och den inre ytan (in mot rummet) matas in (ca 0,85 för obelagda glasytor). Det U-värde som de flesta användare har tillgång till är det mittpunktsvärde som är beräknat enligt SS-EN ISO 673.

Värmetransporten genom glaset beror inte bara på U-värde utan även av genomsläppet av solenergi utifrån och in, g-värdet, vilket IDAs enkla fönstermodell tar hänsyn till. Modellen använder U-värdet från SS-EN ISO 673 som indata, men räknar under simuleringen timme för timme fram det yttre och inre värmemotståndet med utgångspunkt från det  $U_g$  som SS-EN 673 ger (Sahlin, 2010).

#### Om g-värdet i Window

Ett intressant exempel på hur IDA fungerar erhålles då man jämför två helt lika körningar med som enda skillnad att i körning A används  $ST=0,6$  som indata, medan i körning B används  $ST=0,3$  som indata. Resultatet från körning B är ett större kylbehov än i fall A. I båda körningarna kommer, eftersom g-värdet är detsamma för glaskombinationen, lika mycket solenergi in i rummet. Den enda skillnaden mellan de två körningarna är att i körning A är den del som går direkt genom glaskombinationen i form av strålning dubbelt så stor, på bekostnad av den del som först absorberas av glaskombinationen och sedan skickas vidare in i rummet.

Förklaringen är att den radiativa delen av energitillförseln till rummet först ska in i väggar och bli till värme innan den kyls bort. Denna process hjälper till och jämnar ut temperaturskillnaderna över dygnet. I fall B, däremot, tillförs en större del av solenergin rummet direkt (genom ledning och konvektion) och måste därför kylas bort direkt, d v s dagtid, vilket leder till ett större kylbehov.



Detta är en av anledningarna till att använda ett beräkningsprogram som IDA, som skiljer på *hur* solinstrålningen tillförs rummet (Sahlin, 2010). Det är därför som IDA kräver två parametrar för glasets solgenomsläpp istället för bara  $g$ -värdet, nämligen både  $g$ -värdet och  $ST$ . Direkt solenergi som passerar igenom glaset lagras i mycket stor utsträckning i tunga konstruktioner, vilket ger helt andra kylbehov.

Det är möjligt att modellen Detailed Window fungerar likadant som Window vad gäller  $g$ -värdet, men det har inte studerats här.

### Om vinkelberoendet i Window

Den direkta transmittansen av solenergi,  $ST$ , beror av infallsvinkeln. I IDA används en approximation för detta vinkelberoende som kommer från BRIS<sup>3</sup>. Tre intervall definieras, 0-75°, 75°-85° och 85°-90°, med olika transmittans i förhållande till transmittansen vid normalt infall. Det är möjligt att modellen ger ett mindre fel än om  $ST$  hade antagits vara densamma för alla infallsvinklar som för normalt infall (Karlsson & Roos, 2000).

### 8.3.2 Detailed Window

Beräkningsprogrammet IDA har även den mer detaljerade modellen Detailed Window som följer standarden ISO 15099 (SIS, Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations, 1999). I den beror  $U$ -värdet på t ex temperaturförhållandena ute och inne. Därmed bör beräkningarna för rummets energibalans bli mer exakta än i den enkla modellen. Beräkningarna tar dock längre tid och kräver mer datorkraft då timvärden på temperaturer ute och inte används för att ge timvärden på fönstrets  $U$ -värde.

Modellen Detailed Window har utvecklats främst för att bättre kunna simulera olika typer av solavskärmning. I den enklare modellen Window påverkar en viss typ av solavskärmning  $g$ -värdet hos fönstrets glasdel lika mycket oavsett vilken glaskombination som används, (en multiplikator används). Det är inte fysikaliskt korrekt. Främst vid invändig solavskärmning är detta en dålig approximation för det totala  $g$ -värdet för glaskombination inklusive solavskärmning.

## 8.4 FloVent

Beräkningsprogrammet FloVent bygger på CFD, Computational Fluid Dynamics, och har, precis som IDA, två olika fönstermodeller. De benämns Model 0 och Model 1.

### Model 0

Model 0 begär absorptionskoefficienten,  $a$ <sup>4</sup>, och brytningsindex,  $n$ <sup>5</sup>, som indata för alla transparenta material. Båda dessa är våglängdsberoende, men programmet efterfrågar

---

<sup>3</sup> Simuleringsprogrammet BRIS utvecklades under 60-talet vid Kungliga Tekniska Högskolan för studier av inneklimat och behov av komfortkyla.

<sup>4</sup>  $a = \frac{4\pi k}{\lambda}$ , där  $\lambda$  är våglängden och  $k$  är extinktionskoefficienten.

<sup>5</sup> Glasets brytningsindex,  $N$ , har i själva verket en realdel och en imaginärdel:  $N=n+ik$ , varför det vore mer korrekt (men mer omständigt) att kalla  $n$  för "realdelen av brytningsindex".



bara ett värde per material (t ex glasruta), vilket i sig innebär en förenkling och en approximation då storheternas våglängdsberoende inte beaktas.

För kommersiella glas är  $n$  nästan alltid detsamma, medan  $a$  varierar mellan olika tillverkare och glassorter. Det är ovanligt att tillverkaren kan informera om  $a$ .

För att beräkna  $R$  och  $A$  är approximationen god, men för att beräkna  $U$  och  $g$  är den dålig. Metoden fungerar inte för belagda glas, men för obelagda (även tonade) glas, eftersom  $n$  för glaset inte säger något om reflektans eller transmittans hos ett belagt glas. Man kan heller inte använda tunnfilmsbelägningens  $n$  eller  $a$ , för filmen är så komplext uppbyggt. Möjligen skulle man kunna använda framräknade, fiktiva  $n$ - och  $a$ -värden, för en god approximation.

Hur mycket solenergi som absorberas i glaset beror av tjockleken på materialet och infallsvinkel. Modellen tar hänsyn till detta.

Modellen fungerar väl om det transparenta materialet förekommer ensamt (och inte i t ex en dubbel- eller trippelglaskombination) och om materialet inte är tunnfilmsbelagt som i moderna, ”energieffektiva” fönster. Idag har de flesta fönster åtminstone ett tunnfilmsbelagt glas.

Vid flera parallella transparenta material med luft emellan blir beräkningarna felaktiga eftersom reflektioner mellan de transparenta materialen försvinner ur beräkningarna; ur programmet försvinner nämligen all energi som reflekteras i en transparent yta. Däremot tar programmet korrekt hand om övrig energi i det transparenta materialet; en del antas i programmet gå vidare genom materialet och en del beräknas värma upp materialet, den del som absorberas av materialet.

Även för glasväggar inomhus innebär Model 0 ett systematiskt fel, då all solenergi som reflekteras av materialet försvinner så som beskrivits ovan ur beräkningarna.

### **Model 1**

Model 1 efterfrågar istället för absorptionskoefficient och brytningsindex de integrerade storheterna reflektans,  $R$ , och transmittans,  $T$ , för transparenta material. Då  $R$  och  $T$  tillsammans med absorptans,  $A$ , summerar till 1, räknar därmed programmet enkelt fram hur mycket energi som värmer upp materialet.

Precis som i Model 0 ”försvinner” den energi som reflekteras av materialet ur beräkningarna. Det blir således även i Model 1 problem vid flera parallella lager glas med luft emellan, d v s vid 99 procent av alla fönster. All energi som reflekteras i det andra glaset, och som i verkligheten kommer tillbaka till spalten och det första glaset, försvinner (helt felaktigt) från denna modell. Hänsyn till så kallade multipelreflexer tas ej.

Den här modellen tar på ett sätt hänsyn till våglängdsberoendet hos  $A$ ,  $T$  och  $R$ , då ju integrerade värden används (integrerade över hela solspektrat). Däremot tar modellen inte hänsyn till infallsvinkeln på samma sätt som Model 0, utan värden på  $A$ ,  $T$  och  $R$  vid normalt (vinkelrätt) infall används för all solenergi som når glaset, oavsett vilken infallsvinkel strålningen har.



Det blir alltid fel då integrerade värden (istället för spektrala) på R och T på de enskilda glasen används för att räkna fram R och T för hela glaskombinationen. Felet behöver dock inte bli särskilt stort. Felet borde ligga på någon eller några procent.

Eftersom den här modellen har R som indata fungerar den även för tunnfilmsbelagda glas.

### **Model Saudemont**

Försök att komma runt problemet med att reflekterad energi försvinner ur beräkningarna har gjorts (Saudemont). Model Saudemont tar inte heller hänsyn till solenergens infallsvinkel. Istället mäts optiska egenskaper upp för alla ingående glas i en fotospektrometer vid normalt (vinkelrätt) infall för alla våglängder. Egenskaperna hos glasen antas sedan vara lika för andra infallsvinklar, vilket egentligen inte är fallet (Werner, External Water Condensation and Angular Solar Absorptance, ISSN 1651-6214, 2007). Model Saudemont bygger på Ray-Tracing. De integrerade storheterna T, R och A beräknas utifrån de fotospektrometriska mätningarna. Även den absorberade solenergi i varje glas beräknas.

### **Standarder i FloVent**

Det borde kunna gå att i FloVent använda SS-EN ISO 673 eller SS-EN ISO 15099 för fönster. För icke-transparenta reflekterande isolermaterial finns en egen standard, SS-EN ISO 6946 för beräkning av luftspalters isolerförmåga med hänsyn till omgivande ytors emittans. Icke-transparenta reflekterande isolermaterial är dock ännu inte särskilt vanliga, varför en sådan modul i programmet inte är att prioritera.

### **Om validering av FloVent**

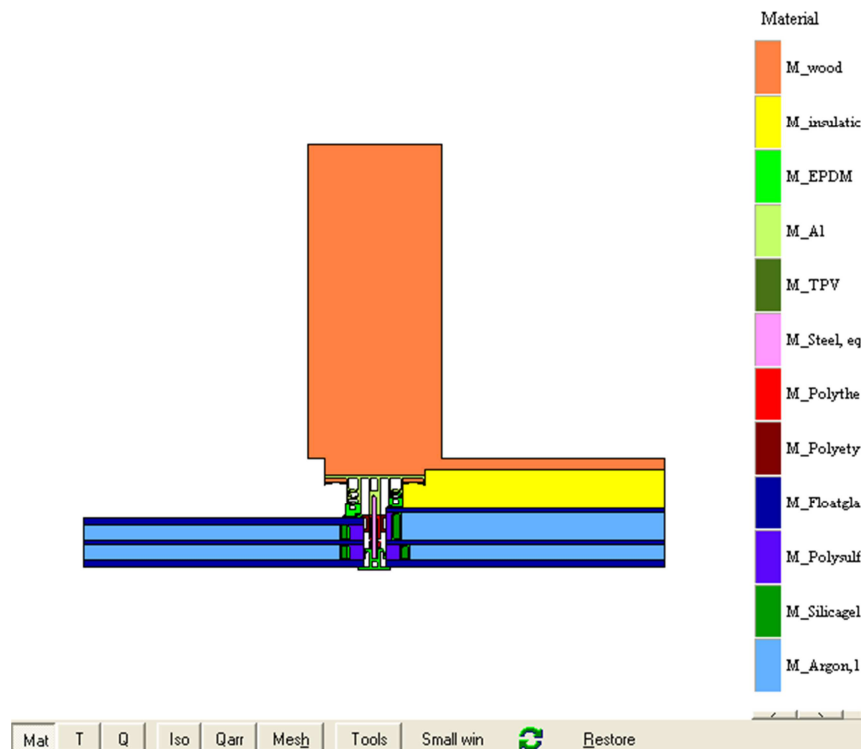
En numerisk metod för att med CFD, Computational Fluid Dynamics, beräkna U-värdet för isolerrutor med två eller flera glas har presenterats (Gan, 2001). Beräkningar med FloVent på hur konvektionen mellan två ytor med olika temperatur (som i ett fönster) påverkar värmeflödet har också validerats mot experiment (Manz, 2003). Dock tog studien inte hänsyn till strålningsdelen av värmeflödet. Även metoder för att studera g-värde och U-värde på fönster där uteluft tas in i underkant av fönstret, förs mellan glasen, och till sist förs in i rummet som förvärmad tilluft, har studerats med CFD (Southall & McEvoy, 2006).

## **8.5 HEAT**

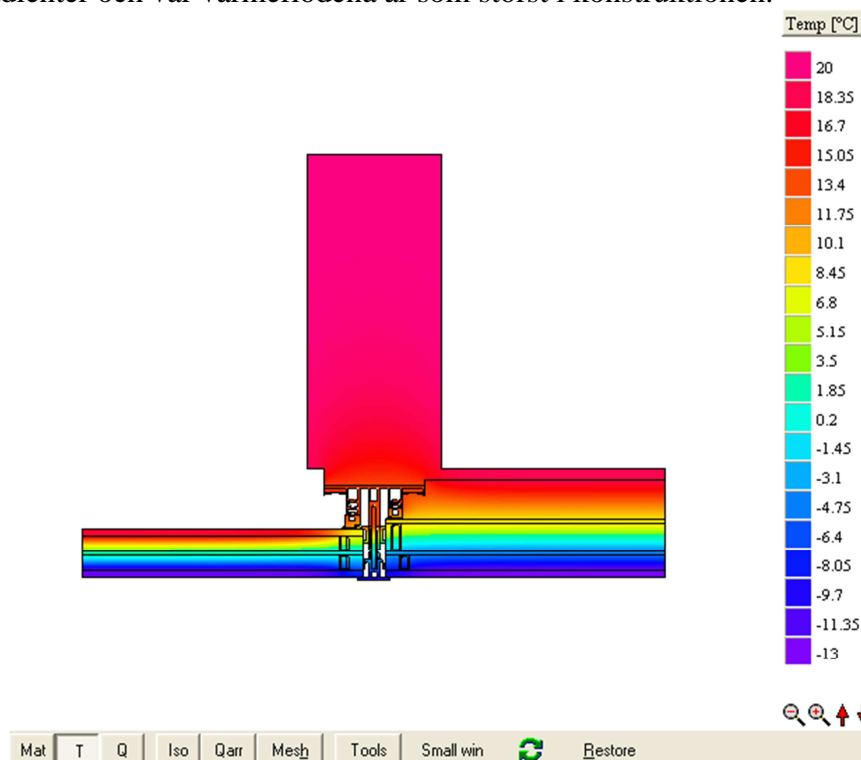
Programmet HEAT ([www.blocon.com](http://www.blocon.com)) används främst för att med finit differensanalys beräkna köldbryggor. En körning i HEAT ger det extra värmeflöde som t ex en aluminiumprofil mellan två glaskombinationer ger. Detta flöde används sedan för att räkna fram ett U-värde på profilen, enligt standarden SS-EN 13947 (SIS, SS-EN 13947, 2006).

Programmet arbetar bara med ledning. Värmeöverföringen i en luftspalt mellan glas sker till stor del genom strålning och konvektion. För att simulera luftspalter i programmet får man därför utgå från glaskombinationens totala  $U_g$  och glasens värmeledningstal. Från detta kan enkelt ekvivalenta värmeledningstal för spalterna räknas fram som används som indata i programmet.

I "pre-processorn" ritar användaren in glaskombinationer och profilsnitt. Det enda som anges för materialen är just värmeledningstalet.



I "post-processorn" visas resultatet av en körning. Användaren kan t ex välja att se temperaturgradienter och var värmeflödena är som störst i konstruktionen.





## 8.6 TeknoSim

TeknoSim är ett enkelt beräkningsprogram för dimensionering av t ex värme- och kylanläggningar ([www.lindab.com](http://www.lindab.com)). Där matar användaren in endast U-värde för fönstret som helhet och g-värde för glasdelen. Dessutom anger användaren hur stor andel av fönstrets area som glasdelen utgör. Eftersom användaren sällan har  $U_w$ , kan man gå bakvägen: man tar det värde på  $U_g$  som man har tillgängligt och så viktar man det areamässigt med bågens och ramens  $U_f$ . Vid träfönster ligger  $U_f$  i normalfallet kring 2-2,5 W/m<sup>2</sup>,K. Glasdelen brukar utgöra ungefär 80 procent av hela fönstrets area.

Det sammanvägda värdet av  $U_f+U_g$  är  $U_w$ . En enkel viktning med areor, A, enligt formel nedan blir inte korrekt, då hänsyn bör tas även till (linjära och punktformiga) köldbryggor.

$$U_f A_f + U_g A_g = U_w A_w$$

## 9. Svårt beräkna värmeflöden i fönster?

På aggregerad nivå är det främst två fysikaliska storheter som är intressanta för att studera värmeflöden i ett fönster. U-värdet anger hur väl konstruktionen stoppar värme från att gå inifrån och ut, medan g-värdet anger hur lätt glaskombinationen släpper genom solenergin.

### 9.1 Tre typer av värmeöverföring

Värme tar sig igenom glaset på tre olika sätt; ledning, konvektion och strålning. Dessa delar är olika stora över olika delar av fönstret. Genom båge och karm är det främst frågan om ledning, medan strålningen är en stor del av värmeöverföringen genom glaskombinationen.

Strålningsdelen går att räkna på mycket exakt med multifresnelformalism, men mycket indata krävs. Konvektionen beror mycket på omständigheterna runtomkring (t ex temperatur- och vindförhållanden), vilka varierar över tiden. Det gör att det krävs mycket datorkraft för att göra simuleringar över tiden (t ex för att ta fram årsbehovet av kyla eller värme). I många program försöker man därför göra om all värmeöverföring till ledning. Så görs t ex i HEAT (med hänvisning till vissa standarder) och så gör många användare av FloVent också.

### 9.2 Reflekterande isolering

För att beräkna U-värdet för ett material används oftast värmeledningstalet,  $\lambda$ , och tjockleken på materialet, d. Dessa multipliceras traditionellt för att erhålla U-värdet. Alla tre typer av värmetransmission ingår; strålning, ledning och (då det inte är frågan om ett fast material) konvektion. Enheten är W/m,K. Ibland kallas värmeledningstalet för materialets värmekonduktivitet. Denna metod fungerar väl för så kallad isolerande isolering (t ex mineralull), men är inte lämpad för så kallad reflekterande isolering, som fönster (Preve & Rolandson, 2010). Värmeledningstalet,  $\lambda$ , anger den mängd energi som passerar genom materialet.



Man kan således dela upp isolermaterial i isolerande och reflekterande. Dessa två typer av isolering fungerar fysikaliskt på helt olika sätt (Al-Homoud, 2005). De flesta traditionella isolermaterial, som mineralull, stenull och cellplast, är isolerande isolering. De kallas även för absorberande eller lågkonduktiv och konvektionshämmande isolering (Andersson & Ivarsson, 2010). Genom att innehålla stillastående luft kan de behålla värmen i denna luft. De hindrar värmen från att gå genom konstruktionen med sin låga värmeledningsförmåga och tack vare att de motverkar konvektion.

Reflekterande isolermaterial, vilket ett dubbel- eller trippelfönster skulle kunna liknas vid, isolerar istället främst genom att reflektera värmestrålning. På reflekterande isolering kan inte samma materialparametrar användas som på isolerande dito. Det beror på att isoleringen inte består enbart av ett homogent genomgående material, som t ex stenull. Det är det reflekterande skiktet (den reflekterande ytan) i kombination med luftspalten som ökar värmemotståndet. För att reflekterande isolermaterial ska fungera får inte värmeledning uppstå med den reflekterande ytan; ytan får inte vara i kontakt med värmeledande material. Ytan bör med andra ord vara ut mot en luftspalt (som i ett fönster).

Isolerande och reflekterande isolermaterial motverkar således värmeflödet på olika sätt. För att jämföra reflekterande isolering med isolerande isolering används därför ofta R-värdet, som är inversen av U-värdet. R-värdet kallas värmemotstånd och är ett mått på materialets motståndskraft mot värmetransport. Enheten är  $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ .

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Det enklaste sättet att i en beräkning kringgå ”problemet” med att reflekterande isolering inte fungerar som isolerande dito, är att använda ett ekvivalent  $\lambda$  för hela konstruktionen (t ex en dubbel- eller trippelglaskombination).

Då utgår man från det verkliga eller framräknade värmeflödet,  $\Phi$ , för att erhålla  $\lambda_{eq}$ , enligt

$$\Phi = qA = \frac{\lambda_{eq}A\Delta T}{d}$$

A är arean för materialet, q är värmeflödestätheten och  $\Delta T$  är temperaturskillnaden mellan glaskombinationens innersta och yttersta yta. Enheterna är för värmeflödestätheten  $\text{W}/\text{m}^2$ , arean  $\text{m}^2$  och värmeflödet W.

### 9.3 Mäta istället för att beräkna

För att bestämma värmeflödet,  $\Phi$ , genom ett material kan man göra experimentella tester (tidigare nämnda s k hot-box-tester). Ur värmeflödet kan  $\lambda$  och därmed U-värdet eller R-värdet erhållas.





## 10. Abstract in English

This report deals with issues concerning energy transports in windows. Some software programs commonly used by Swedish consultants are described as to how they treat energy transports in the different parts of a window. The programs discussed are IDA, FloVent, HEAT and TeknoSim. Two programs for U-value calculations of a glazing according to EN 673 are also mentioned. Both programs are free of charge and provided by glass manufacturers. Some of the relevant standards for calculating the U-value of windows and glass combinations are also discussed

Focus of this report is on how the convection in an insulating glass unit affects the U-value of the glazing. It is described how the U-value depends on three integrated physical phenomena; convection, conduction and radiation.

Some of the complications with estimating heat transports in windows are discussed. Reflective insulation materials in general are discussed, where the glazing part of the window is seen as one example of such material. Reflective insulation materials insulate a building by other methods than traditional (insulating) insulation materials. Therefore, they need their own standards for comparison. There is not yet a valid standard that can be used both to assess reflective and insulating insulation materials.

This report can be seen as a continuation of a previous report *Fönster – tillgång och problem*, also financed by Ångpanneföreningens forskningsstiftelse.



## 11. Litteraturförteckning

- Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40, 353-366.
- Andersson, R., & Ivarsson, J. (2010). *Reflekterande Isolering*. Institutionen för geovetenskap, Byggt teknik. Uppsala: Uppsala Universitet.
- Burström, P. G. (2009). *Byggnadsmaterial*, ISBN 978-91-44-02738-8. Lund: Studentlitteratur AB.
- Carlson, P.-O. (2005). *Bygga med glas*, ISBN 91-631-7680-7. Stockholm: Glasbranschföreningen.
- Elmroth, A. (2007). *Energihushållning och värmeisolering*, Byggvägledning 8, ISBN 978-91-7333-221-7. Vällingby: AB Svensk Byggtjänst.
- Gan, G. (2001). Thermal transmittance of multiple glazing: computational fluid dynamics prediction. *Applied Thermal Engineering*, 21, 1583-1592.
- Karlsson, J., & Roos, A. (2000). Modeling the angular behaviour of the total solar energy transmittance of windows. *Solar Energy*, 69.
- Manz, H. (2003). Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements. *Energy and Buildings*, 35, 305-311.
- Preve, V., & Rolandson, J. (2010). *Invändig tilläggsisolering - Utvärdering av några material för invändig tilläggsisolering*. Institutionen för geovetenskap, Byggt teknik. Uppsala: Uppsala Universitet.
- Saudemont, V. *How to model complex glazing systems with Flovent V7 when taking into account solar radiation*. vanessa@flomerics.fr.
- SIS. (2006). *SS-EN 13947*. SS-EN 13947 Termiska egenskaper hos "curtain walling" - Beräkning av värmegenomgångskoefficient: SIS Förlag AB.
- SIS. (1999). *Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations*. Schweiz: ISO.
- Southall, R. G., & McEvoy, M. E. (2006). Investigations into the functioning of a supply air window in relation to solar energy as determined by experiment and simulation. *Solar Energy*, 80, 512-523.
- Werner, A. (2007). *External Water Condensation and Angular Solar Absorptance*, ISSN 1651-6214. Uppsala: Uppsala Universitet.
- Werner, A. (2008). *Fönster - tillgång och problem*. Stockholm: Ångpanneföreningens forskningsstiftelse.