

Jørgen M. Schultz

Transmittans, reflektans og g-værdi for glas og ruder med integrerede PV-moduler

Sagsrapport
BYG·DTU SR-07-11
2007
ISSN 1601 - 8605

Forord

Denne rapport beskriver resultaterne fra måling af transmittans og reflektans for 6 forskellige glas med integrerede solceller (PV-moduler) samt beregnede g-værdier for forskellige flerlags rudetyper hvori det ene glaslag er med integrerede solceller. g-værdierne er beregnet med programmet WINDOW 5 med anvendelse af de målte værdier for transmittans og reflektans.

Målingerne og beregningerne er udført for Teknologisk Institut, Taastrup som en del af projektet *LYS OG ENERGI - solceller i transparente facader*, PSO F&U-projekt nr. 2006-1-6302.

Lyngby, december 2007

Jørgen M. Schultz

Indholdsfortegnelse

Måling af transmittans og reflektans	4
Målt transmittans	4
Målt reflektans	6
Beregning af g-værdier	7
Beregnete g-værdier	11
Simpel sammenhæng mellem åbningsgrad og g-værdi	13
Konklusion	14
Referencer	14

Måling af transmittans og reflektans

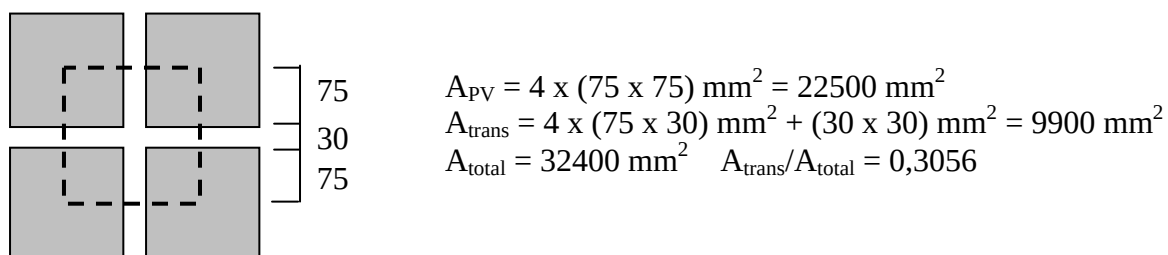
Målingerne er udført ved hjælp af et goniospektrometer placeret på BYG•DTU. Princippet i målemetoden er, at prøveemnet (ruden) placeres i en holder og belyses med en tungsten halogen lampe. Ved lysets passage af ruden kan der ske en spredning af lyset, ligesom forskellige bølglængdeområder kan blive mere eller mindre afskåret. Derfor måles den spektrale fordeling af transmitterede stråling bag ruden i en "halvkugle" med en diameter på 2 meter. Fysisk sker dette ved, at et følerelement er monteret på en halvcirkelformet bøjle, der kan vippe omkring en vandret akse. Følerelementets flyttes nu rundt på halvkuglen i små step svarende til en af brugeren bestemt vinkel (f.eks. 1°) henholdsvis horisontalt (sideværts på bøjlen) og vertikalt (drejning af bøjlen omkring sin vandrette akse). På denne måde registreres den samlede transmitterede stråling.

Idet lampens spektralfordeling ikke præcis svarer til sollysets spektralfordeling, bestemmes transmittansen (og reflektansen) ved for hvert bølglængdeområde (5 nm intervaller i området 300 – 2100 nm) at finde forholdet mellem den målte transmitterede stråling og den tilsvarende stråling fra lampen, når prøveemnet er fjernet. Resultatet herfra multipliceres med en standard spektralfordeling af solstrålingen (ISO 9050), hvorved transmittansen af solenergi bestemmes ved summation over hele bølglængdeområdet. På tilsvarende vis kan også dagslystransmittansen findes (380 – 780 nm).

Målt transmittans

Der er blevet målt transmittans på 6 forskellige PV-glasopbygninger – 5 med et relativt fint net af PV-celler samt en referenceløsning med $15 \times 15 \text{ cm}^2$ polykrystallinske PV-celler placeret i en matrix med 30 mm afstand mellem cellerne.

For de første 5 PV-glastyper kan den samlede transmittans og reflektans måles direkte, idet målefeltet har en udbredelse, der resulterer i en repræsentativ andel af hhv. transparente og opake områder. Dette er derimod ikke muligt for referencen pga. de store PV-celler. Derfor er transmittansen i dette tilfælde beregnet som forholdet mellem det transparente areal og totalarealet (figur 1) ganget med en beregnet transmittans for det transparente areal.



Figur 1. Udsnit af referencerude med angivelse af mål (mm).

Transmittansen for det transparente areal er beregnet med programmet Spectrum™ fra Pilkington. Referenceglasset er opbygget af to 10 mm glas med ca. 1 mm luftmellemrum svarende til PV-cellernes tykkelse. Ud fra den ringe farvning i glasset er det forudsat, at der er anvendt jernfattigt glas svarende til Pilkington Optiwhite™, hvorved transmittansen af solstråling og dagslys for den transparente del findes til hhv. 0,78 og 0,82. Baseret på

ovenstående kan PV-glassets transmittans findes ved at multiplicere med arealforholdet på 0,3056.

Nedenstående tabel 1 viser resultatet fra målingerne af transmittansen for de 5 PV-glas samt den beregnede transmittans for referenceglasset. For PV-glasset WSS0008 er der ud over måling af transmittansen ved normalstråling også målt transmittans for 4 forskellige indfaldsvinkler, jf. tabel 1.

Tabel 1. Målte solenergitransmittanser (τ_e) og dagslystransmittanse (τ_v) for 5 PV-glas samt beregnede transmittanser for referenceglasset.

i_v	PV-glastype											
	WSS0007		WSS0008		WSS0009		MST-44T101OU		MST-50T051OU		Reference	
	τ_e	τ_v	τ_e	τ_v	τ_e	τ_v	τ_e	τ_v	τ_e	τ_v	τ_e	τ_v
0°	0,06	0,07	0,16	0,17	0,17	0,18	0,07	0,08	0,03	0,04	0,24	0,25
30°			0,15	0,17								
45°			0,15	0,17								
60°			0,14	0,16								
75°			0,12	0,14								

Det gælder for alle PV-glassene, at den resulterende transmittans svarer til det transparente areals transmittans multipliceret med forholdet mellem det transparente og det totale areal af PV-glasset, idet PV-cellerne er opake. Baseret på den målte transmittans og en kendt transmittans (beregnet med Spectrum™) af den transparente del af PV-glasset, kan andelen af PV-glasset, som er transparent, beregnes ud fra de målte transmittanser. Resultatet af en sådan beregning er vist i tabel 2.

Tabel 2. Beregnet transparent andel af PV-rude ud fra målt transmittans.

PV-rudetype	Opbygning	Beregnet transmittans af transparent areal	Målt transmittans	Beregnet transparent andel	Målt transparent andel ud fra geometri
WSS0007	3 mm jernfattigt 3 mm float	0,77	0,06	8 %	9 %
WSS0008	3 mm jernfattigt 3 mm float	0,77	0,16	21 %	21 %
WSS0009	3 mm jernfattigt 3 mm float	0,77	0,17	22 %	23 %
MST-44T101OU	5 mm float 5 mm float	0,67	0,07	10 %	-
MST-50T051OU	5 mm float 5 mm float	0,67	0,03	4 %	-
Reference	10 mm jernfattigt 10 mm jernfattigt	0,78	0,24	31 %	31 %

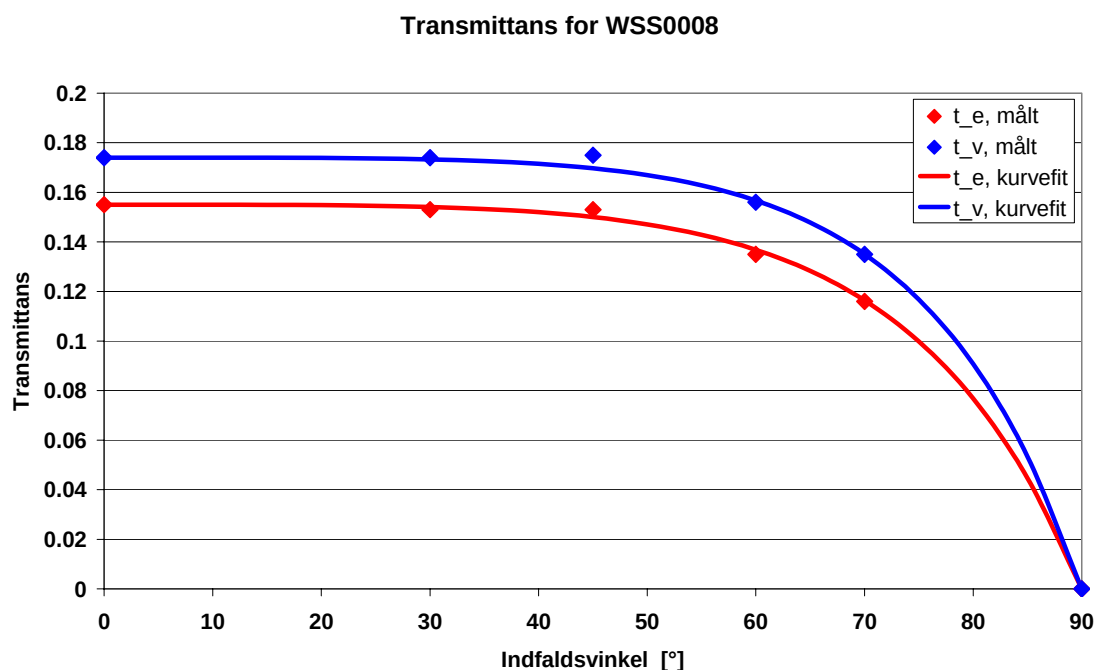
Den beregnede transparente andel ud fra målingerne ligger tæt på den geometrisk bestemte andel, hvor blot en fejlmåling på diameteren af hullerne i WSS-panelerne på 0,1 mm flytter den geometrisk bestemte værdi med ca. 2 %-point.

Målingerne på WSS0008 under forskellige indfaldsvinkler er optegnet i figur 2, og der er foretaget en estimering af indfaldsvinkelkorrektionen givet ved:

$$\tau_{\theta} = \tau_0 \times (1 - \tan^{\alpha}(\theta/2)),$$

hvor θ er indfaldsvinklen.

Værdien for eksponenten α er fundet til 3,9 for sollystransmittansen og 4,2 for dagslystransmittansen, hvilket svarer til værdierne for normalt glas. Dette stemmer selvfølgelig også overens med, at selve sol- og dagslystransmissionen kun sker gennem glas og ikke andre materialer.



Figur 2. Transmittansens afhængighed af indfaldsvinklen bestemt for PV-glas WSS0008.

Målt reflektans

Reflektansen fra PV-glassenes ”forside”, der er den side der vender udad, er blevet målt for alle 6 PV-glas. Det gælder, som ved transmittansmålingerne, at reflektansen er målt direkte for de 5 PV-glas med et relativt fint net af PV-celler, mens der for reference ruden er målt reflektansen for et areal, der udelukkende er dækket af den polykrystallinske PV-celle.

Specielt for WSS-glastyperne er der synligt stor forskel på reflektansen fra glasset for- og bagside. Der er derfor også foretaget en enkelt måling af reflektansen fra bagsiden af WSS0008. Resultaterne fremgår af nedenstående tabel 3.

Tabel 3. Målt solenergirefleksions (ρ_e) og dagslysrefleksions (ρ_v) for 5 PV-glas samt for delarealet af referenceglasset indeholdende polykrystallinske PV-celler.

	PV-glastype											
	WSS0007		WSS0008		WSS0009		MST-44T101OU		MST-50T051OU		Reference	
	ρ _e	ρ _v	ρ _e	ρ _v	ρ _e	ρ _v	ρ _e	ρ _v	ρ _e	ρ _v	ρ _e	ρ _v
Udad	0,050	0,046	0,057	0,054	0,055	0,053	0,122	0,067	0,121	0,062	0,043	0,042
Indad			0,336	0,341								

Refleksionen målt for glassets bagside er kun gældende for kortbølget stråling, og har meget lille indflydelse på sol- og dagslystransmissionen når PV-glasset anvendes i f.eks. en 2-lags rudeløsning. Effekten på den samlede transmission opstår ved refleksion af en del af den stråling, der reflekteres tilbage fra det inderste glaslag. Er det inderste glaslag et almindeligt floatglas evt. med en lavemissiv belægning, vil mængden af stråling der reflekteres tilbage mod PV-rudens bagside være yderst begrænset. For de aktuelle PV-glas med en relativ lille åbningsgrad er mængden af sollys, der kommer igennem PV-glasset, og som dermed kan reflekteres tilbage mod PV-glasset fra det inderste glas, meget lille, og effekten af bagsiderefleksionen er negligerbar.

For PV-glas med en større åbningsgrad, vil der selvfølgelig være mere sollys, der trænger igennem til det inderste glas og dermed vil der også være en større reflekteret lysmængde tilbage mod PV-glasset. Imidlertid betyder en større åbningsgrad også, at det delvist spejlende areal hidrørende fra PV-modulernes bagside er reduceret, hvorved den resulterende bagsiderefleksion vil være reduceret tilsvarende. Det kan derfor konkluderes, at bagsiderefleksionen har negligerbar indflydelse.

Beregning af g-værdier

Den totale solenergitransmission, g-værdien, består dels af den direkte transmitterede solenergi og dels af et sekundært led, der skyldes opvarmningen af ruden på grund af absorption af solenergi i rudens forskellige glas. En del af den absorberede solenergi vil således tilføres rummet bag ruden og skal derfor tillægges den direkte transmitterede solenergi for at finde den totale solenergitransmission.

Beregnings af forskellige rudeopbygningers g-værdi er foretaget med programmet WINDOW 5 [1] under forudsætning af, at glaslaget med PV-modulerne kan betragtes som ét glaslag med optiske værdier svarende til de målte. Denne forudsætning anses for at være dækkende for glassene med PV-modulerne jævnt fordelt over glasarealet, og hvor PV-modulerne er tynde i forhold til glastykkelsen (ingen signifikante refleksioner internt i PV-glasset hidrørende fra PV-modulernes kanter). Indbygningen af PV-modulerne imellem to lag glas betyder også, at glasset vil virke som varmefordelende plader, så PV-glasset temperaturmæssigt kan betragtes som én enhed. Der kan være lidt større usikkerhed med hensyn til, om forudsætningerne også holder for referenceglasset, hvor der er relativ stor afstand mellem de enkelte PV-moduler, samt at PV-modulernes tykkelse på ca. 1 mm måske kunne give anledning til ændrede optiske egenskaber ved større indfaldsvinkler i forhold til

glas i almindelighed. Imidlertid er PV-modulerne i referenceruden placeret mellem 10 mm tykke glas, hvorfor det antages, at de tykke glas er optisk dominerende.

I tilfældet, hvor det ene glas i rudekonstruktionen indeholder PV-celler, vil en del af den absorberede solenergi, svarende til PV-cellens effektivitet, blive omdannet til elektrisk energi og fjernet fra glasset uden at medføre en opvarmning. Ved beregning af g -værdien for en rude med PV-celler skal der derfor tages hensyn til dette forhold. Dette gøres beregningsmæssigt ved at øge den tilsyneladende reflektans fra PV-glassets yderside svarende til den aktuelle PV-celles effektivitet ved den aktuelle temperatur. Beregningsgangen er således iterativ, idet ruden først beregnes uden hensyn til PV-modulets el-produktion, hvorved PV-modulets temperatur findes. Ud fra den fundne temperatur beregnes PV-modulets effektivitet, der direkte adderes til den målte reflektans for PV-glassets yderside, og en ny beregning gennemføres. Der kræves normalt 2 iterationer før, der ikke længere sker nogen ændring i PV-glassets temperatur.

I det aktuelle tilfælde, hvor PV-modulerne kun dækker en del af glassets areal, skal reflektansen selvfølgelig kun korrigeres for den del, der er dækket af PV-modulerne, dvs. at for alle de målte glas undtagen referenceglasset findes den beregningsmæssige reflektans fra PV-glassets yderside på flg. måde:

$$\rho_{\text{korrigeret}} = \rho_{\text{målt}} + \frac{A_{\text{PV}}}{A_{\text{total}}} \cdot \eta_{\text{PV}}(T)$$

hvor $\rho_{\text{korrigeret}}$: regningsmæssig reflektans af PV-glassets yderside [-]
 $\rho_{\text{målt}}$: målt reflektans af PV-glassets yderside [-]
 A_{PV} : arealet dækket af PV-moduler [m^2]
 A_{total} : PV-glassets totale areal [m^2]
 $\eta_{\text{PV}}(T)$: PV-modulets effektivitet ved temperaturen T [-]

For referenceglasset beregnes reflektansen på PV-glassets yderside på flg. måde:

$$\rho_{\text{korrigeret}} = \frac{\rho_{\text{glas}} \cdot A_{\text{glas}} + (\rho_{\text{PV,målt}} + \eta_{\text{PV}}(T)) \cdot A_{\text{PV}}}{A_{\text{total}}}$$

hvor $\rho_{\text{korrigeret}}$: regningsmæssig reflektans af PV-glassets yderside [-]
 ρ_{glas} : beregnet reflektans for den transparente del af PV-glassets yderside [-]
 A_{glas} : transparent areal af PV-glasset [m^2]
 $\rho_{\text{PV,målt}}$: målt reflektans for den opake del af PV-glassets yderside [-]
 $\eta_{\text{PV}}(T)$: PV-modulets effektivitet ved temperaturen T [-]
 A_{PV} : arealet dækket af PV-moduler [m^2]
 A_{total} : PV-glassets totale areal [m^2]

Den totale solenergitransmittans er beregnet for to forskellige rudeløsninger med PV-glas yderst:

1. En termorudeløsning, hvor det inderste glaslag er et almindeligt floatglas (4 mm Pilkington Optifloat Clear™) uden nogen form for belægninger og med 15 mm luftmellemrum.
2. En energirudeløsning, hvor det inderste glas er et lavemissionsbelagt floatglas (4 mm Pilkington Optitherm SN™) med 15 mm argonfyldt mellemrum mellem glassene.

Beregningerne af g-værdierne er foretaget for 2 forskellige klimaforhold:

1. Vintersituation med en indetemperatur på 20 °C, en udetemperatur på 0 °C, standard overgangsisolanser (indvendigt: 0,13 (m²K)/W, udvendigt: 0,04 (m²K)/W) og et solindfald på ruden på 500 W/m² [2].
2. Sommersituation ("worst case") med en indetemperatur på 25 °C, en udetemperatur på 30 °C, vindstille og et solindfald på ruden på 500 W/m².

Nedenstående tabel 4 - 7 viser de beregnede temperaturer for det yderste glaslag i ruden for de forskellige rudetyper og den deraf beregnede korrigerede reflektans for PV-glassets yderside.

Tabel 4. Vinter ($T_{ude} = 0\text{ °C}$, $T_{inde} = 20\text{ °C}$, standard overgangsisolanser, $I_{sol} = 500\text{ W/m}^2$). PV-celle effektiviteter, beregnede glastemperaturer for PV-glasset samt beregnet korrigeret reflektans under hensyntagen til PV-modulernes temperatur, *når PV-glasset sidder i en termorudeløsning.*

PV-termorude	$\eta_{PV}(20^\circ)$	$d\eta/dT$	Beregnet T	$\eta_{PV}(T)$	$\rho_{m\ddot{a}lt}$	$\rho_{korrigeret}$
PV-glastype	-	%/K	°C	-	-	-
WSS0007	0,10	0,2	17,0	0,101	0,050	0,143
WSS0008	0,10	0,2	15,5	0,101	0,057	0,137
WSS0009	0,10	0,2	15,3	0,101	0,055	0,134
MST-44T101OU	0,05	0,2	16,9	0,050	0,122	0,167
MST-50T051OU	0,05	0,2	17,4	0,050	0,121	0,169
Reference	0,12	0,2	14,8	0,121	0,043	0,138

Tabel 5. Vinter ($T_{\text{ude}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{inde}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, standard overgangsisolanser, $I_{\text{sol}} = 500\text{ W/m}^2$).
PV-celle effektiviteter, beregnede glastemperaturer for PV-glasset samt beregnet
korrigeret reflektans under hensyntagen til PV-modulernes temperatur, *når PV-
glasset sidder i en energirudeløsning.*

PV-energirude	$\eta_{\text{PV}}(20^{\circ})$	$d\eta/dT$	Beregnet T	$\eta_{\text{PV}}(T)$	$\rho_{\text{målt}}$	$\rho_{\text{korrigeret}}$
PV-glastype	-	%/K	$^{\circ}\text{C}$	-	-	-
WSS0007	0,10	0,2	17,0	0,101	0,050	0,143
WSS0008	0,10	0,2	15,5	0,101	0,057	0,137
WSS0009	0,10	0,2	15,5	0,101	0,055	0,134
MST-44T101OU	0,05	0,2	17,0	0,050	0,122	0,167
MST-50T051OU	0,05	0,2	17,4	0,050	0,121	0,169
Reference	0,12	0,2	14,6	0,121	0,043	0,138

Tabel 6. Sommer ($T_{\text{ude}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{inde}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, vindstille, $I_{\text{sol}} = 500\text{ W/m}^2$).
PV-celle effektiviteter, beregnede glastemperaturer for PV-glasset samt beregnet
korrigeret reflektans under hensyntagen til PV-modulernes temperatur, *når PV-
glasset sidder i en termorudeløsning.*

PV-termorude	$\eta_{\text{PV}}(20^{\circ})$	$d\eta/dT$	Beregnet T	$\eta_{\text{PV}}(T)$	$\rho_{\text{målt}}$	$\rho_{\text{korrigeret}}$
PV-glastype	-	%/K	$^{\circ}\text{C}$	-	-	-
WSS0007	0,10	0,2	52,1	0,094	0,050	0,136
WSS0008	0,10	0,2	49,8	0,094	0,057	0,131
WSS0009	0,10	0,2	49,5	0,094	0,055	0,128
MST-44T101OU	0,05	0,2	51,3	0,047	0,122	0,164
MST-50T051OU	0,05	0,2	52,2	0,047	0,121	0,166
Reference	0,12	0,2	47,9	0,113	0,043	0,133

Tabel 7. Sommer ($T_{\text{ude}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{inde}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, vindstille, $I_{\text{sol}} = 500\text{ W/m}^2$).
PV-celle effektiviteter (η_{PV}), beregnede glastemperaturer for PV-glasset samt
beregnet korrigeret reflektans under hensyntagen til PV-modulernes temperatur, *når
PV-glasset sidder i en energirudeløsning.*

PV-energirude	$\eta_{\text{PV}}(20^{\circ})$	$d\eta/dT$	Beregnet T	$\eta_{\text{PV}}(T)$	$\rho_{\text{målt}}$	$\rho_{\text{korrigeret}}$
PV-glastype	-	%/K	$^{\circ}\text{C}$	-	-	-
WSS0007	0,10	0,2	56,3	0,093	0,050	0,135
WSS0008	0,10	0,2	54,0	0,093	0,057	0,131
WSS0009	0,10	0,2	53,8	0,093	0,055	0,128
MST-44T101OU	0,05	0,2	55,5	0,046	0,122	0,164
MST-50T051OU	0,05	0,2	56,4	0,046	0,121	0,166
Reference	0,12	0,2	52,4	0,112	0,043	0,132

Figur 3 viser inddata til optisk beskrivelse af et "glas" – i dette tilfælde PV-glassene. Inddata angives for sollys, dagslys og langbølget stråling. Ved indtastning af data for PV-glassene anvendes der kun den korregerede reflektans for sollys idet, det er denne, der har betydning for g-værdiberegningen, mens værdierne for dagslys, der kun har betydning for beregning af dagslystransmittansen, angives med deres målte eller for "bagside-reflektansen" - skønnede værdier. Værdierne for langbølget stråling er lig med dem for almindeligt glas.

The screenshot shows the 'Glass Library' window with the following data entered:

Property	Value
ID #	10002
Thickness	10.5 mm
Name	Reference PV-rude korigeret
Product	PV-glass
Manufacturer	Generic
Solar	
Trans (T sol)	0.238
Reflect., Front (Rsol1)	0.132
Reflect., Back (Rsol2)	0.140
Visible	
Trans (T vis)	0.251
Reflect., Front (Rvis1)	0.075
Reflect., Back (Rvis2)	0.150
IR	
Trans (Tir)	0.000
Emis., Front (Emis1)	0.840
Emis., Back (Emis2)	0.840
Conductivity	0.900 W/m-K

Figur 3. Eksempel på inddata i WINDOW 5 [1].

Beregnete g-værdier

Nedenstående tabel 8 - 9 viser de beregnede g-værdier og dagslystransmittanser for de to undersøgte rudetyper under de to forskellige klimabetingelser med de seks forskellige PV-glas som yderste glaslag i ruden.

Tabel 8. Vinter ($T_{\text{ude}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{inde}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, standard overgangsisolanser, $I_{\text{sol}} = 500\text{ W/m}^2$).
Beregnet g-værdi for hhv. en termorude- og en energirudeløsning, med PV-glas som yderste glaslag.

PV-glastype	Luftfyldt termorude, $U_g = 2,8\text{ W/m}^2\text{K}$		Argonfyldt energirude, $U_g = 1,2\text{ W/m}^2\text{K}$	
	Total solenergi-transmittans, g	Dagslys transmittans τ_v	Total solenergi-transmittans, g	Dagslys transmittans τ_v
WSS0007	0,15	0,07	0,09	0,06
WSS0008	0,23	0,16	0,15	0,15
WSS0009	0,24	0,17	0,16	0,16
MST-44T101OU	0,16	0,07	0,09	0,07
MST-50T051OU	0,13	0,04	0,07	0,04
Referenceglas	0,29	0,23	0,20	0,22

Tabel 9. Sommer ($T_{\text{ude}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{inde}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, vindstille, $I_{\text{sol}} = 500\text{ W/m}^2$).
Beregnet g-værdi for hhv. en termorude- og en energirudeløsning, med PV-glas som yderste glaslag.

PV-glastype	Luftfyldt termorude, $U_g = 2,8\text{ W/m}^2\text{K}$		Argonfyldt energirude, $U_g = 1,2\text{ W/m}^2\text{K}$	
	Total solenergi-transmittans, g	Dagslys transmittans τ_v	Total solenergi-transmittans, g	Dagslys transmittans τ_v
WSS0007	0,23	0,07	0,13	0,06
WSS0008	0,30	0,16	0,19	0,15
WSS0009	0,31	0,17	0,20	0,16
MST-44T101OU	0,23	0,07	0,13	0,07
MST-50T051OU	0,20	0,04	0,11	0,04
Referenceglas	0,35	0,23	0,24	0,22

Bemærk den væsentlige forskel i g-værdien mellem termorudeløsningen, hvor det inderste glas er et almindeligt floatglas uden nogen lavemissionsbelægning, og lavenergirudeløsningen, hvor den inderste glasoverflade vendende mod PV-glassets bagside har en lavemissionsbelægning med en emissivitet på 0,063. I termorudeløsningen vil det varme PV-glas overføre en væsentlig energimængde ved ledning og især stråling til det inderste lag glas i ruden. Dette sker ikke i nær samme grad i lavenergirudeløsningen, hvor strålingsudvekslingen næsten er blokeret, og varmeledningen væsentlig reduceret pga. argonfyldningen.

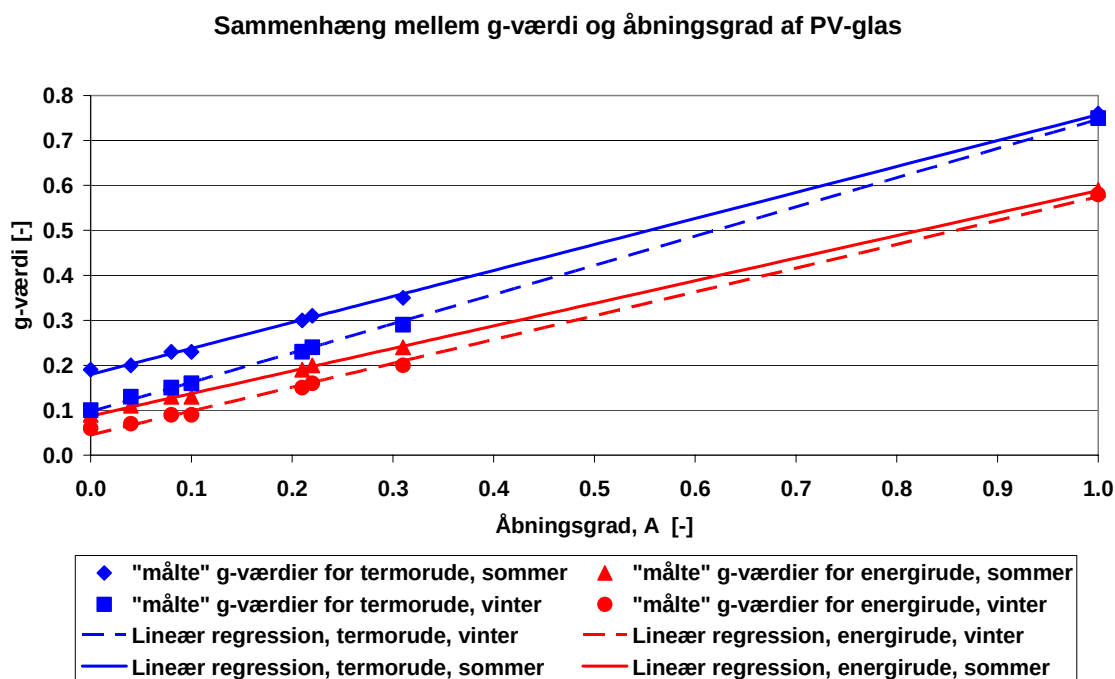
Der er også en væsentlig forskel mellem g-værdien i vinter- og sommersituationen specielt for termorudeløsningen. Ved anvendelse af g-værdien i beregning af bygningers energiforbrug er ingen af de beregnede værdier repræsentative. Til vurdering af hvilken af de beregnede værdier der er mest repræsentativ er der foretaget en beregning af g-værdien for WSS0008 med standard overgangsisolanser, indetemperatur på $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og med en udetemperatur på $11,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, der svarer til referenceårets årsmiddelværdi af udetemperaturen for perioder med direkte sol.

I dette tilfælde ligger g-værdien for termoruden på 0,23 og g-værdien for energiruden på 0,16, hvilket er meget tæt på vintersituationen, hvorfor denne vil være den mest repræsentative værdi.

Generelt set ændrer g-værdien sig ikke ret meget som funktion af udetemperaturen men mere som funktion af de faktiske varmeoverføringskoefficienter ved rudens inder- og yderside. En beregning med standard overgangsisolanser med fastholdt indetemperatur på 20 °C og varierende udetemperatur mellem 0 °C og 30 °C medfører beregnede g-værdier i intervallet 0,15 – 0,16 for en energirude med WSS0008 som yderste glaslag. Den fundne g-værdi for samme rudetype i sommersituationen med vindstille vejr giver en g-værdi på 0,19.

Simpel sammenhæng mellem åbningsgrad og g-værdi

Nedenstående figur 4 viser sammenhængen mellem de fundne g-værdier og den tilhørende åbningsgrad for PV-glasset. Ud over de fundne g-værdier baseret på målingerne af transmittans og reflektans for PV-glassene er der i figur 4 også medtaget beregnede g-værdier for en åbningsgrad på hhv. 0 % og 100 % beregnet ned programmet WINDOW 5.



Figur 4. Sammenhæng mellem g-værdi og åbningsgraden af PV-glasset.

De lineære regressionsudtryk for g-værdien som funktion af åbningsgraden er:

Termorude, sommer:	$g = 0,180 + 0,577 \times A,$	$r^2 = 0,999$
Termorude, vinter	$g = 0,097 + 0,650 \times A,$	$r^2 = 0,999$
Energirude, sommer	$g = 0,087 + 0,502 \times A,$	$r^2 = 0,999$
Energirude, vinter	$g = 0,045 + 0,530 \times A,$	$r^2 = 0,998$

Det må på baggrund af resultaterne afbilledet i figur 4 konkluderes, at g-værdien med god tilnærmelse kan beregnes ud fra åbningsgraden samt den beregnede g-værdi, f.eks. med programmet WINDOW 5, ved hhv. 0 % og 100 % åbningsgrad.

Konklusion

Der er foretaget måling af transmittans og reflektans for 6 forskellige PV-glas. Resultaterne af målingerne er anvendt til en tilnærmet beregning af g-værdien i programmet WINDOW 5 for hhv. en termorude- og en energirudeløsning, i hvilke PV-glasset udgør det yderste glaslag. Ved beregning af g-værdierne er der anvendt den målte gennemsnitlige transmittans og reflektans for PV-glassene, der ved målingerne er fundet ved en sammenvægtning af spektralfordelingen af det transmitterede, henholdsvis reflekterede lys. En mere præcis beregning af g-værdien kan opnås ved også at anvende spektralfordelingen som inddata til WINDOW 5, hvilket imidlertid ligger uden for dette projekts grænser. Det vurderes ikke, at der vil være signifikant forskel mellem den tilnærmede og mere præcise beregning.

Baseret på målingerne og de efterfølgende beregninger af g-værdien for forskellige åbningsgrader i PCV-glasset kan det konkluderes, at g-værdien med god tilnærmelse kan beregnes som en lineær funktion af åbningsgraden.

Referencer

- [1] WINDOW 5.2 vers. 5.2.17.
<http://windows.lbl.gov/software/window/window.html>
- [2] Energimærkning. Tekniske bestemmelser for ruder, juni 2007.
<http://www.energimarkning.dk/Dokumenter/TekniskeBestemmelser2007-06Ruder.PDF>