



DANISH  
TECHNOLOGICAL  
INSTITUTE

# Termisk karakterisering af PV-vinduer

*Indledende undersøgelser*

# **Termisk karakterisering af PV-vinduer**

*Indledende undersøgelser*

*Trine Dalsgaard Jacobsen  
Søren Østergaard Jensen  
SolEnergiCentret, Teknologisk Institut Energi*

*Jørgen M. Schultz  
BYG·DTU*

*September 2001*

# Forord

Nærværende rapport afslutter UVE-projektet ”Termisk karakterisering af PV-vinduer”, journal nr. 51181/00-0070 finansieret af Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi m.v.

Projektet er gennemført som et samarbejde mellem SolEnergiCentret, Teknologisk Institut Energi og BYG·DTU.

Der var oprindeligt søgt om midler til et væsentlig større projekt, hvor PV-vinduer ved hjælp af målinger i BYG·DTU’s guarded hot boks og solkalorifere skulle karakteriseres meget præcist. Med baggrund i resultaterne fra målingerne på PV-vinduerne var det derefter meningen af gennemføre detaljerede simuleringer for at fastlægge, hvordan PV-vinduer vil opføre sig i bygninger med forskellige opvarmningsbehov, således at PV-vinduernes ydelse kunne bestemmes under forskellige forhold. Der blev dog i første omgang kun bevilget et mindre beløb til at foretage indledende undersøgelser af PV-vinduer. PV-vinduer er derfor i nærværende rapport karakteriseret udelukkende ved hjælp af teoretiske overvejelser, og det har ikke været muligt at gennemføre beregninger til fastlæggelse af ydelsen for denne type vinduer.

Deltagere i projektet:

## Teknologisk Institut Energi

Trine Dalsgaard Jacobsen, civ.ing.  
Søren Østergaard Jensen, civ.ing.

## BYG·DTU

Jørgen M. Schultz, civ.ing.

Termisk karakterisering af PV-vinduer  
1.udgave, 1. oplag 2001  
© Teknologisk Institut, 2001  
Energidivisionen

ISBN: 87-7756-648-3  
ISSN: 1600-3780

# Indholdsfortegnelse

1. Indledning.....	2
1.1 Baggrund.....	2
1.2 Formål med de indledende undersøgelser.....	3
2. PV-vinduers termiske egenskaber.....	5
2.1 Vinduers termiske og optiske egenskaber.....	5
2.2 Solcellers termiske og optiske egenskaber.....	5
2.2.1 Monokrystallinske siliciumsolceller.....	6
2.2.2 Polykrystallinske solceller.....	6
2.2.3 Amorfe silicium-solceller/tyndfilmceller.....	6
2.2.4 Fotokemiske solceller.....	6
2.3 PV-vinduers samlede energibalance.....	7
3. Beregningsmetode.....	9
4. Resultater.....	10
4.1 Grundberegning.....	10
4.2 Parametervariationer.....	12
4.3 Kommentarer til beregninger.....	15
5. Vurdering og konklusion.....	17
Bilag A Datablad for Gaia Solar A/S PV-vindue.....	18

# 1. Indledning

## 1.1 Baggrund

I forbindelse med den øgede satsning på bygningsintegreret solceller, er solceller i kombination med transparente felter i klimaskærmen – PV-vinduer, blevet kommercielt tilgængelige. Figur 1.1 og 1.2 viser et par eksempler.

I vinduerne vist i figur 1.1 er PV-vinduer anvendt i de sydvendte dele af et shedtag over et atrium, mens de nordvendte vinduer er uden solceller. Ønsket har været at opbygge en ovenlyskonstruktion, der lukker meget dagslys ind, mens den direkte stråling er ønsket afskærmet for at undgå overtemperaturer i lokalet. De anvendte solceller er traditionelle krystallinske siliciumceller, der danner forholdsvis store ikke-transparente områder i vinduet. I vinduet vist i figur 1.2 er anvendt opslidsede tyndfilmceller, der danner et fint mønster af små solceller med små transparente områder imellem. Denne type PV-vindue virker stort set som en homogen tonet rude, der kun slipper en begrænset mængde lys igennem.



Figur 1.1 Oventagvinduer med PV i taget i Ikast-seminariet



Figur 1.2 Vindue med opslidsede tyndfilmceller

Semi-transparente vinduer med solceller kan ikke blot karakteriseres som traditionelle vinduer med en mindre transmittans, som det ofte gøres for vinduer med eksterne skyggegivere. Når solen skinner, vil en stor del af sollyset ramme solcellerne, der dels producerer elektricitet, som ledes væk, dels omdanner størstedelen af solstrålingen til varme i solcellerne. Selv om

den direkte transmittans mindskes, vil den indirekte solvarmetransmittans, forårsaget af varmemstråling fra de opvarmede flader i rudekonstruktionen, ofte øges. I den forbindelse har bl.a. solcellernes placering i rudekonstruktionen betydning for det samlede varmebidrag (karakteriseret ved rudens g-værdi) til bygningen. Hvis solcellerne f.eks. er placeret i forbindelse med rudens yderste lag glas, vil dette ikke altid være den koldeste del af vinduet. Ved solindfald vil det yderste glas blive varmere end det inderste glas, hvilket vil vende varmemstrømme i forhold til et traditionelt vindue. Vinduernes g-værdi vil desuden afhænge af isolansen af konstruktionen bag cellerne samt af en eventuel lav-emissiv belægning på en af de indvendige glasoverflader.

Et PV-vindue vil typisk have en lavere termisk ydelse end et traditionelt vindue, idet der er et mindre direkte solindfald til rummet bagved. Til gengæld opnås i stedet en elektrisk ydelse fra solcellerne. I bygninger med overophedningsproblemer vil PV-vinduer sandsynligvis termisk fungere bedre, idet de vil reducere overophedningen af de bagvedliggende rum, samtidigt med at de giver et vist udsyn til omgivelserne og tillader en del dagslys at trænge ind.

Integrering af solceller i vindueskonstruktioner har desuden betydning for cellernes elektriske ydelse. De fleste solcellers ydelse er temperaturafhængig, idet de yder mindre, jo varmere de bliver. Indbygget i en vindueskonstruktion får cellerne sværere ved at slippe af med den genererede varme, og den elektriske ydelse må derfor forventes at være lavere end for tilsvarende solceller, der ikke er integreret i en vindueskonstruktion.

Den samlede energibalace for et vindue er afhængig af en lang række parametre. I perioder med sol vil vinduet give et varmetilskud til bygningen, mens der i perioder uden sol vil være et varmetab fra bygningen. Integreres solceller i ruden mindskes varmetilskuddet til bygningen, men samtidig opnås en elektrisk ydelse fra solcellerne. Anvendelse af gasfyldninger og lavemissionsbelægninger nedsætter varmetabet fra vinduet, men kan også bevirke højere temperaturer på solcellerne og dermed lavere elektrisk ydelse. En lavemissionsbelægning nedsætter desuden g-værdien og dermed varmetilskuddet til bygningen.

For at vurdere hvilken kombination der giver den bedste reelle energibalace, skal bygningens behov ligeledes vurderes. I bygninger med stort opvarmningsbehov vil vinduer med lav U-værdi være at foretrække, samtidig med, at det termiske varmebidrag vil være mere værd end den elektriske ydelse fra solcellerne. I andre typer bygninger - f.eks. kontorbyggeri, hvor der kun er et ringe opvarmningsbehov, og hvor varmebidraget fra vinduer ofte medfører et kølebehov, vil en rude med lav g-værdi og en høj elektrisk ydelse være at foretrække.

Det er derfor vigtigt at undersøge, hvordan denne type vinduer virker termisk både for at kunne bestemme den samlede energibalace for vinduet, samt hvordan de påvirker indeklimaet i en given bygning. En karakterisering af denne type vinduer er også vigtig for at kunne afgøre, hvad der i et givet tilfælde er mest fordelagtigt – et PV-vindue eller et mindre traditionelt vindue og PV-elementer på en ikke transparent del af klimaskærmen.

## 1.2 Formål med de indledende undersøgelser

Formålet med dette arbejde er at foretage en indledende undersøgelse af de termiske egenskaber for vinduer med integrerede solceller. I den forbindelse undersøges forskellige beregningsmetoder og programmer. Målet er at kunne karakterisere PV-vinduers egenskaber i form

af vinduets isoleringsevne (U-værdi), totale solenergitransmittans (g-værdi) samt det forventede udbytte af solcellerne.

Viden om PV-vinduers termiske egenskaber kan anvendes til en vurdering af, hvordan denne type vinduer fungerer i en bygning i forhold til traditionelle vinduer - energimæssigt såvel som indeklimamæssigt. Målet er at finde den rudekonstruktion, der samlet set giver det bedste energimæssige udbytte - termisk og elektrisk, under samtidig hensyntagen til påvirkningen af indeklimaet i bygningen. Den optimale rudekonstruktion vil være afhængig af, hvilken type bygning PV-vinduet skal installeres i.

I nærværende projekt har det desværre ikke været muligt at gennemføre de detaljerede simuleringer af PV-vinduers funktion i bygninger med forskellige opvarmningebenhov, der er nødvendige for at kunne bestemme deres ydelse under forskellige forhold.

## 2. PV-vinduers termiske egenskaber

De termiske egenskaber for PV-vinduer afhænger af en lang række forskellige parametre, alt efter hvordan selve ruden er bygget op, samt af typen og antallet af solceller. Forholdet mellem areal der er dækket med solceller og det transparente areal er en afgørende parameter. Desuden kan nogle typer solceller i sig selv være delvist transparente.

### 2.1 Vinduers termiske og optiske egenskaber

Vinduers termiske funktion karakteriseres ved deres varmetransmissionskoefficient (U-værdi) og deres totale solenergitransmittans (g-værdi). U-værdien karakteriserer varmetransmissionen gennem en rude under forhold, hvor solbestrålingen er nul (mørk værdi), mens g-værdien karakteriserer den solenergi, der strømmer ind gennem ruden under forhold, hvor solbestrålingen er større end nul.

Et vindues g-værdi består af to dele: en optisk del, som er udtrykt ved soltransmittansen  $\tau_{sol}$ , samt et sekundært bidrag hidrørende fra den del af solstrålingen, der først absorberes i ruden og sidenhen afgives til omgivelserne og til rummet bag ruden. Varmestrømmen gennem ruden hidrørende fra temperaturforskellen mellem inde og ude karakteriseres således ved U-værdien, mens effekterne af solbestrålingen karakteriseres ved g-værdien. U-værdien og g-værdien karakteriserer tilsammen den samlede varmestrøm gennem ruden og dermed rudens termisk funktion.

Et vindues U-værdi og g-værdi afhænger af en række parametre:

- glastype (floatglas eller jernfattigt glas)
- glasafstand
- gasfyldning (luft, argon, krypton)
- eventuelle lavemissionsbelægninger på glasset
- antallet af lag i konstruktionen (f.eks. 2 eller 3-lags ruder)

### 2.2 Solcellers termiske og optiske egenskaber

Der findes en række forskellige typer solceller med forskellige egenskaber:

- monokrystallinske siliciumbaserede solceller
- polykrystallinske siliciumbaserede solceller
- amorfe siliciumbaserede solceller
- ikke-silicium baserede tyndfilm solceller
- fotokemiske solceller



### 2.2.1 Monokrystallinske siliciumsolceller

De solceller, der er almindelige på markedet i dag, er næsten alle baseret på Silicium i enten mono-krystallinsk, polykrystallinsk eller amorf form. Monokrystallinske solceller er som regel sorte eller mørkegrå med en ensartet overflade og kan fås enten runde eller tilskårrede i firkanter. Det er den type solceller, der i dag har den største ydelse. Typiske modul-effektiviteter er 12-15%.

Optiske egenskaber for typiske monokrystallinsk siliciumsolceller er som angivet nedenfor. Der er her tale om værdier for selve cellen. De optiske værdier for et helt solcellepanel, afhænger i høj grad af, hvor tæt solceller er placeret.

Transmittans:	0,0
Absorptans:	0,92-0,93
Reflektans:	0,07-0,08
Emittans:	0,82-0,95

Varmeledningsevnen for en solcelle er vanskelig at bestemme præcist, idet den består af den række forskellige materialer, men som et godt estimat, kan varmeledningsevnen for rent krystallinsk silicium anvendes. Denne er 124 W/mK.

### 2.2.2 Polykrystallinske solceller

Polykrystallinske solceller findes oftest i blålige nuancer, men kan også fås i andre farver. Krystallerne reflekterer lyset forskelligt alt efter deres orientering, hvilket giver en "levende" overflade. Reflektansen er højere end for monokrystallinske celler, og den elektriske ydelse er lavere, idet effektiviteten typisk ligger mellem 10-13%.

### 2.2.3 Amorfe silicium-solceller/tyndfilmceller

Amorfe silicium-solceller samt andre typer tyndfilmceller er fremstillet ved at pådampe de aktive lag i solcellen direkte på et lag glas eller plastmateriale. Derefter er lagene opdelt i cellestrimler mekanisk eller med laser. Lagene kan fremstilles meget tynde, og afstanden mellem cellestrimlerne kan gøres meget lille, så fladen bliver stort set homogen. De aktive lag kan være delvist transparente, idet de typisk kun absorberer sollys ved bestemte bølgelængder, mens de er transparente overfor andre bølgelængder. De optiske egenskaber for sådanne solcelletyper er derfor meget varierende og kan give meget forskellige typer vinduer. Tyndfilmceller har i dag typisk en effektivitet på ca. det halve af en krystallinsk solcelle (4-9%).

### 2.2.4 Fotokemiske solceller

Nye typer solceller som f.eks. fotokemiske solceller opbygges ligeledes af meget tynde lag direkte på et glasunderlag. Det foto-aktive lag absorberer sollys ved en bestemt bølgelængde og er transparent for andre bølgelængder. Disse typer solceller er endnu på et eksperimentelt stadium, men fremtidsudsigterne tyder på, at de vil kunne designes efter ønskede optiske egenskaber, f.eks. med hensyn til soltransmittans.

## 2.3 PV-vinduers samlede energibalance

Et PV-vindues samlede energimæssige egenskaber afhænger dels af rudens varmebalance - dvs. varmetilskud i forhold til varmetab, dels af PV-felternes produktion af elektrisk energi. Rudens varmebalance afhænger af U-værdien, der bestemmer varmetabet og g-værdien, der bestemmer varmetilskuddet. Den elektriske produktion afhænger især af typen af solcelle, men også af transmittansen af ruden foran cellen og af temperaturen på det sted i ruden, hvor cellen er placeret.

Det direkte varmetilskud fra en rude er den mængde solenergi, der transmitteres gennem ruden til det bagvedliggende rum. Dette kan bestemmes ud fra den mængde solenergi, der rammer udvendig på ruden, samt af rudens g-værdi. Det direkte varmetilskud repræsenterer dog ikke nødvendigvis en reel energibesparelse. Det er nødvendigt at vurdere, hvor stor en del af den tilførte varmeenergi, der reelt er behov for i bygningen. Dette kræver et nøjere kendskab til bygningen, især til interne varmebidrag og bygningens varmekapacitet.

For almindelige boliger kan en rudes energibalance vurderes på basis af de retningslinier, der er udviklet i forbindelse med energimærkningsordningen for vinduer. Ordningen bygger dog på den forudsætning, at der er behov for den tilførte varme fra vinduerne i hele fyrings-sæsonen. I kontorbyggeri er der ofte interne varmetilskud fra f.eks. personer og elektrisk udstyr, der er tilstrækkelige til at dække varmebehovet i dagtimerne også i en stor del af fyrings-sæsonen. Derudover er denne type bygninger ofte termisk lette, hvilket giver ringe mulighed for akkumulering af den tilførte solvarme til perioder, hvor der er et større behov. Retningslinierne for energimærkningsordningen for vinduer er derfor generelt ikke egnede til vurdering af PV-vinduers energibalance. Hertil kommer, at et varmebidrag fra vinduerne i kontorbyggeri og lignende ofte kan medføre et forøget kølebehov, hvilket betyder, at varmebidraget ikke giver en energibesparelse men et forøget energiforbrug.

Beregning af et PV-vindues reelle energitilskud til bygningen kræver derfor et rimeligt kendskab til bygningen, samt en detaljeret beregning af bygningens opvarmningsbehov. Som hovedregel gælder dog:

Vinter:

I bygninger med et reelt opvarmningsbehov i dagtimerne (typisk boliger), eller hvor solvarmen kan lagres til om natten uden indeklimagener, vil der være mere energi at spare ved at udnytte varmetilskuddet end ved at lade solceller producere el. Der bør vælges vinduer med en høj g-værdi, dvs. vinduer uden solceller. I bygninger, hvor interne varmetilskud i bygningen kan dække opvarmningsbehovet vil det være formålstjenligt at anvende vinduer med en lav g-værdi, især hvis varmetilskuddet fra vinduerne medfører et kølebehov. Her kan solceller med fordel anvendes til dels at nedsætte vinduets g-værdi, samtidig med at de giver et energibidrag via el-produktionen.

Sommer:

I sommerperioden, hvor der ikke er et opvarmningsbehov vil det i alle typer bygninger være fordelagtigt at anvende PV-vinduer ud fra et energimæssigt synspunkt på grund af produktionen af elektrisk energi. I nogle tilfælde kan det være relevant også at medregne den besparelse af køleenergi, som nedsættelsen af vinduets g-værdi medfører. Det må dog vurderes for hver given bygning, om det er relevant at medregne dette.

Den samlede energibalance for et PV-vindue kan opstilles således:

direkte energitilskud = direkte varmetilskud - varmetab + elproduktion

reelt energitilskud = (varmetilskud - varmetab)<sub>hvis reelt opvarmningsbehov</sub> + elproduktion  
(+evt. besparelse i kølebehov)

### 3. Beregningsmetode

Da der ikke findes noget beregningsværktøj, der direkte kan regne på vinduer med indbyggede solceller, er der anvendt 2 forskellige metoder til beregning af resulterende U- og g-værdi med programmet Window 4.1.

1. Beregning for rude uden solceller, og tilsvarende beregning for rude, hvor hele arealet er dækket af solceller. Resultaterne vægtes derefter sammen i henhold til de respektive arealer
2. Der beregnes middelværdier af materialeegenskaber for hhv. solceller og rude, hvorefter hele rudens energimæssige karakteristik beregnes, som om den var homogen

De to beregningsmetoder vil markere to yderpunkter, hvorimellem rudens faktiske egenskaber sandsynligvis vil befinde sig. Begge beregninger gennemføres ved hjælp af programmet "Window 4.1".

Yderligere er U-værdien også beregnet med programmet Therm 2.1a, der giver mulighed for en vurdering af de 2-dimensionale varmestrømme.

## 4. Resultater

### 4.1 Grundberegning

Der er foretaget en indledende beregning på baggrund af en opbygning af et PV-vindue som anvendt i f.eks. Roskilde Bank (figur 4.1). Et datablad for ruden er vist i bilag A. Der er 28 solcellemoduler monteret på den udvendige side af det inderste lag glas i en tolags luftfyldt termorude. På Roskilde Bank er der forskellige gasfyldninger i de 3 ovenlysvinduer - hhv. luft, argon og krypton. Det yderste lag glas er et 4 mm jernfrit glas, mens det inderste lag glas er et normalt 4 mm floatglas uden belægninger. Glasafstanden er 20 mm. Solcellemodulerne inkl. ledningsføringer udgør ca. 61% af det samlede transparente areal i ruden.



Figur 4.1 Ovenlysvinduer med monokrystallinske solceller på Roskilde Bank

Der er udført 3 beregninger til fastlæggelse af U-værdien og to beregninger til bestemmelse af den totale solenergitransmittans og temperaturfordelingen i ruden under påvirkning af  $800 \text{ W/m}^2$  normalstråling.

#### Beregning af U-værdi

Ved beregning af U-værdien er der regnet med at solcellemodulerne pga. ledningsforbindelserne sidder med en afstand på 0,5 mm fra det inderste lag glas. U-værdien er dels beregnet med programmet Therm 2.1a og dels med programmet Window 4.1.

I beregningerne med Therm er der regnet på et repræsentativt 2D-udsnit, der imidlertid ikke inkluderer det forholdsvis store transparente areal mellem rudens kanter og solcellerne. Center U-værdien blev i dette tilfælde beregnet til  $2,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ . I Therm beregningen er der regnet med 2 stk. 4 mm brede og 0,5 mm tykke kontaktflader mellem solcellemodul og det inderste glaslag, svarende til ledningerne. Varmeledningsevnen er sat lig med værdien for solcellemodul.

Beregningerne med Window er udført ved at betragte PV-vinduet som en trelags rude, hvor solcellemodul indsættes som det miderste "glas" med en tykkelse på 2 mm og med en afstand fra det yderste lag glas på 17,5 mm og en afstand indtil det inderste lag glas på 0,5 mm. Der er i disse tilfælde ikke regnet med nogen direkte kontakt mellem solcellemodul og inderste lag glas. Som nævnt er der udført 2 forskellige beregninger:

1. Der regnes med at solcellemodul dækker hele rudens areal og resultatet af denne beregning (Center  $U = 2,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) vægtes efterfølgende med resultatet fra en beregning på en tolags rude uden solceller (Center  $U$ -værdi =  $2,78 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Resultatet blev en center  $U$ -værdi på  $2,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
2. Det miderste lag "glas" tildeles fiktive materialeværdier svarende til en vægtning af værdierne for solcellerne og værdierne for luft, og beregningen udføres derefter for trelagskonstruktionen. Resultatet blev en center  $U$ -værdi på  $2,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Forskellen mellem de to Window-beregninger er ikke særlig stor, og hvis Therm-beregningen bliver korrigeret for varmetabet gennem glasarealet langs rudens kant, vil den nok også blive lidt højere, så alt i alt må det konkluderes, at en center  $U$ -værdi på omkring  $2,70 - 2,75 \text{ W/m}^2\text{K}$  er den rigtige værdi for en luftfyldt rude.

### **Beregning af g-værdi**

Ved beregningen af den totale solenergitransmittans,  $g$ -værdien, er der regnet med en varm sommerdag med  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  udendørs og  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  indendørs samt en normalstråling på  $800 \text{ W/m}^2$  på ruden. Der er i øvrigt anvendt de to forskellige beregningsmetoder som beskrevet ovenfor ved anvendelse af Window-programmet. Resultatet af de to beregninger blev hhv. en  $g$ -værdi på  $0,61$  og  $0,62$  – altså en meget lille forskel.

### **Beregning af temperaturforholdene for PV-modulerne**

Ved beregning af temperaturen på PV-modulerne vil det være forkert at anvende beregningsmetoden med en vægtning af materialeværdierne, da det er temperaturen i selve modul der er vigtigt og ikke en eventuel middeltemperatur af modul og den omgivende luft.

Ved anvendelse af den første metode findes en temperatur i modul på ca.  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  uden korrektion for at der tappes energi fra modulerne. Ved en modultemperatur på  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  vil effektiviteten af modul iflg. oplysningerne kunne sættes til  $0,12 \times (1 - 0,004 \times (70 - 25)) = 0,098$ . Dvs. at ca. 10% af den solenergi der rammer solcellerne vil kunne omdannes til elektrisk energi og dermed blive fjernet fra cellen. Dette forhold er simuleret ved at øge reflektansen af solcellemodulets yderside med 10 procent-point fra  $0,07$  til  $0,17$ . Med denne fiktive reflektans beregnes solcellemodulets temperatur til ca.  $66 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Anvendelse af argon og krypton vil sænke U-værdien men medføre en højere temperatur på solcellerne. Det vil ligeledes være tilfældet ved anvendelse af lavemissionsbelægning på det inderste lag glas. Lavemissionsbelægningen vil derudover reducere vinduets g-værdi.

## 4.2 Parametervariationer

Der er foretaget en parametervariation over forslag til udformning af PV-vinduer baseret på flg. generelle forudsætninger:

PV-modulerne er monteret i hulrummet i en forseglet 2-lagsrude og sidder med en indbyrdes afstand på 20 – 23 mm limet til det yderste eller inderste lag glas med 2 strimler dobbeltklæbende tape pr. PV-modul. Bredden af tapen er sat til 4 mm. Tape + de elektriske forbindelser betyder, at PV-modulerne sidder med en afstand på ca. 2 mm mellem PV-modul og glas. PV-modulerne har en tykkelse på 1,5 mm.

Det antages at PV-modulerne har en emissivitet på 0,9, en reflektans på 0,07 og en varmeledningsevne på 124 W/mK. Varmeledningsevnen af den dobbeltklæbende tape er sat til 0,25 W/mK.

Der er regnet på flg. forskellige udformninger af PV-ruden:

1. Glasafstand 20 mm, luftfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm alm. floatglas inderst. PV-moduler sidder på det inderste lag glas
2. Glasafstand 20 mm, argonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm alm. floatglas inderst. PV-moduler sidder på det inderste lag glas
3. Glasafstand 15 mm, kryptonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm alm. floatglas inderst. PV-moduler sidder på det inderste lag glas
4. Glasafstand 20 mm, luftfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm alm. floatglas inderst. PV-moduler sidder på det yderste lag glas
5. Glasafstand 20 mm, argonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm alm. floatglas inderst. PV-moduler sidder på det yderste lag glas
6. Glasafstand 15 mm, kryptonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm alm. floatglas inderst. PV-moduler sidder på det yderste lag glas
7. Glasafstand 20 mm, luftfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm floatglas inderst med en super-lavemissionsbelægning med en emittans = 0,04. PV-moduler sidder på det inderste lag glas
8. Glasafstand 20 mm, argonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm floatglas inderst med en super-lavemissionsbelægning med en emittans = 0,04. PV-moduler sidder på det inderste lag glas.
9. Glasafstand 15 mm, kryptonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm floatglas inderst med en super-lavemissionsbelægning med en emittans = 0,04. PV-moduler sidder på det inderste lag glas
10. Glasafstand 20 mm, luftfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm floatglas inderst med en super-lavemissionsbelægning med en emittans = 0,04. PV-moduler sidder på det yderste lag glas

11. Glasafstand 20 mm, argonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm floatglas inderst med en super-lavemissionsbelægning med en emittans = 0,04. PV-moduler sidder på det yderste lag glas
12. Glasafstand 15 mm, kryptonfyldt, 4 mm jernfrit glas yderst, 4 mm floatglas inderst med en super-lavemissionsbelægning med en emittans = 0,04. PV-moduler sidder på det yderste lag glas

Tabel 4.1 viser de beregnede U- og g-værdier for de undersøgte rudetyper uden PV-elementer samt de beregnede glastemperaturer i ruden under en bestråling på  $800 \text{ W/m}^2$  på ruden ved en udetemperatur på  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  og en indetemperatur på  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Temperaturen af det yderste lag glas er lidt lavere end lufttemperaturen pga. udstråling til himlen samtidig med at der i det jernfattede glas ikke sker nogen absorption af solstråling.

Alle glas har en tykkelse på 4 mm, og det yderste lag glas er altid jernfattede, mens det inderste glas er alm. floatglas der enten er ubelagt eller belagt med en blød lavemissionsbelægning med en emittans på 0,04. Beregningerne er udført for hhv. den glasafstand der er anvendt ved PV-beregningerne og for den energimæssigt optimale glasafstand for den givne rudetype.

Rudeopbygning	Glasafstand	center U-værdi	center g-værdi	Temperatur udv. glas	Temperatur indv. glas
	mm	$\text{W/m}^2\text{K}$	-	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Luft + alm. float	20	2,78	0,80	24	30
Luft + alm. float	16	2,77	0,80	24	30
Luft + low-E float	20	1,54	0,69	24	35
Luft + low-E float	16	1,51	0,69	24	35
Argon + alm. float	20	2,65	0,80	24	30
Argon + alm. float	15	2,64	0,80	24	30
Argon + low-E float	20	1,27	0,69	23	35
Argon + low-E float	15	1,23	0,69	23	35
Krypton + alm. float	15	2,59	0,80	24	30
Krypton + alm. float	10	2,57	0,80	24	30
Krypton + low-E float	15	1,14	0,69	23	35
Krypton + low-E float	10	1,08	0,69	23	35

Tabel 4.1 Resultater for vinduer uden PV-elementer

De beregnede U-værdier er fundet ved en udetemperatur på  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  og en indetemperatur på  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , hvilket svarer til forholdene under måling i en guarded hot-box, men ikke til de temperaturforhold der anvendes i beregning af U-værdier baseret på DS/EN 673, hvor den varme og kolde temperatur er hhv.  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Derfor vil de beregnede U-værdier i ovenstående tabel ikke kunne sammenlignes direkte med f.eks. U-værdier beregnet med Pilkington's GLAS 98 program.

Den beregnede g-værdi afhænger for langt den største dels vedkommende af absorptionen i glassene og i mindre grad af rudens isoleringsevne, hvorfor ændringer i g-værdien kun afhænger af om det er et belagt glas eller ikke.

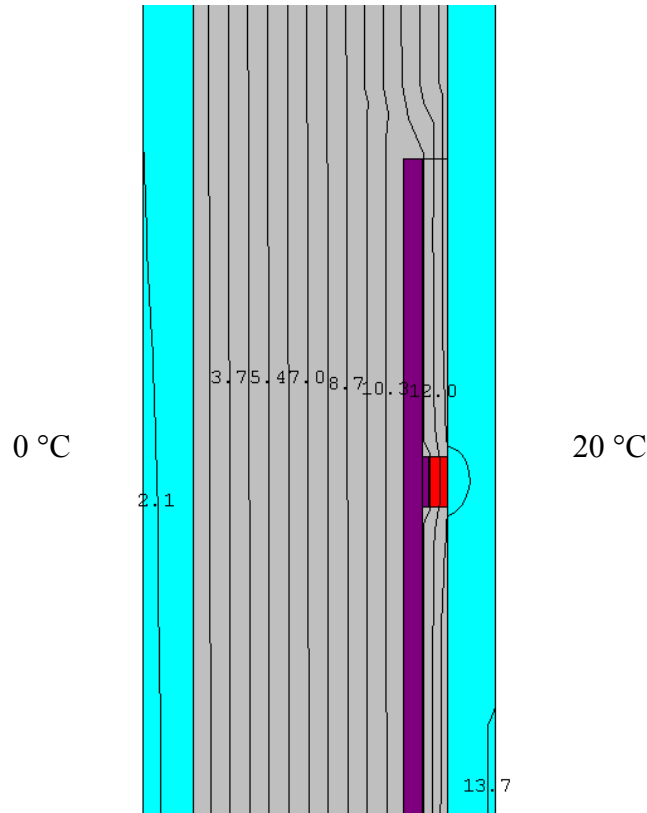


Resultatet af beregningerne for ruder med PV-elementer er anført i tabel 4.2. En del af solenergien der rammer PV-modulerne omdannes til elektrisk energi. Ved en indstråling på  $800 \text{ W/m}^2$  på ruden med en udetemperatur på  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  og en indetemperatur på  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  vil PV-modulerne opvarmes til en temperatur mellem  $65$  og  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . De relevante PV-moduler vurderes af have en effektivitet på ca.  $12\%$  ved  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Effektiviteten anses for at aftage med  $0,4\%$  pr. Kelvin, hvilket for det beregnede temperaturområde betyder en effektivitet på  $8,9 - 10\%$ . Fjernelsen af den elektriske energi er simuleret ved at øge reflektansen på den side af PV-modulerne, der vender udad med  $10 \text{ } \%$ -point til  $0,17$ . Den totale solenergitransmittans, g-værdien, anført i nedenstående tabel er beregnet under hensyntagen hertil.

Konstruktion	U-værdi			g-værdi		Temp.
	Therm	Metode 1	Metode 2	Metode 1	Metode 2	Metode 1
20 mm luft, alm. glas, PV inderst	2,54	2,54	2,57	0,55	0,58	70
20 mm argon, alm. glas, PV inderst		2,36	2,40	0,54	0,58	75
15 mm krypton, alm. glas, PV inderst		2,21	2,24	0,53	0,56	70
20 mm luft, alm. glas, PV yderst	2,56	2,54	2,57	0,45	0,45	65
20 mm argon, alm. glas, PV yderst		2,37	2,41	0,46	0,46	70
15 mm krypton, alm. glas, PV yderst		2,22	2,25	0,48	0,49	75
20 mm luft, lav-E glas, PV inderst	2,25	1,99	2,22	0,49	0,54	75
20 mm argon, lav-E glas, PV inderst		1,73	1,96	0,47	0,52	80
15 mm krypton, lav-E glas, PV inderst		1,44	1,61	0,43	0,48	85
20 mm luft, lav-E glas, PV yderst	1,43	1,42	1,36	0,35	0,36	70
20 mm argon, lav-E glas, PV yderst		1,17	1,10	0,35	0,36	80
15 mm krypton, lav-E glas, PV yderst		1,02	0,94	0,36	0,37	90

Tabel 4.2 Resultater fra parametervariation

Figur 4.2 og 4.3 viser isoterbilleder fra programmet Therm, der viser hvordan varme-strømme bliver 2-dimensionale omkring PV-elementet i ruden. Placeringen af PV-elementet hhv. på det inderste eller yderste glas har bl.a. betydning for temperaturen på den indvendige side af vinduet, og kan dermed have betydning for indeklimaet i bygningen bag ruden.



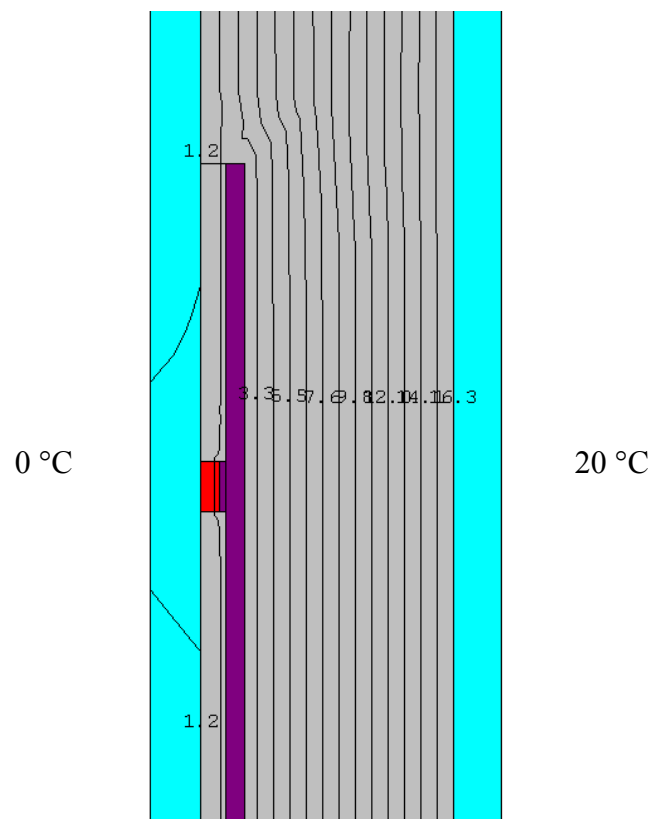
Figur 4.2 Udsnit af isotermbillede fra Therm-beregning med en 20 mm luftfyldt rude. Øverste snitflade er midt mellem to PV-moduler og nederste snitflade er midt i PV-modul mellem de to fastgørelser.

### 4.3 Kommentarer til beregninger

Betragtes de beregnede U-værdier, er der for løsningerne uden lavemissionsbelægning på det inderste lag glas ikke den store forskel mellem beregningsmetoderne. Therm-beregningen skønnes at være ret præcis, da der er regnet med en detaljeret strålingsberegning. Dette gælder også for beregningerne, hvor der er anvendt en lavemissionsbelægning. Desværre kan der i Therm kun udføres en så detaljeret beregning i luftfyldte hulrum – derfor de manglende værdier for de øvrige tilfælde. I beregningerne af U-værdien med Window, hvor der indgår en lavemissionsbelægning, er der stor variation mellem de to metoder. Tages der udgangspunkt i Therm-beregningerne for den luftfyldte rude, skal man stole mest på metode 2, når PV-modulerne er monteret på det inderste (og belagte) lag glas, mens metode 1 giver et bedre resultat når PV-modulerne er monteret på det yderste lag glas. Dette kan der gives en fysisk forklaring på.

Når PV-modulerne sidder på det belagte glas med 2 mm afstand til glasset og ca. 20 mm mellem PV-modulerne, vil vinkelstrålingsforholdet mellem de ”frie” lavemissionsbelagte glasoverflader og den modsatte kolde glasoverflade være lille, idet en stor del af ”synsfeltet” dækkes af PV-modulerne. Da der ikke vil være ret stor temperaturforskul mellem glasset og PV-modulet pga. stor varmetransport ved varmeledning i spalten, vil varmeoverføringen ved stråling mellem de ”frie” lavemissionsbelagte glasflader og PV-modulerne være lille og effek-

ten af lavemissionsbelægningen reduceres kraftigt. Dette forhold tages der ikke hensyn til i metode 1, hvorimod der i metode 2 tages fuldt hensyn til dette.



Figur 4.3 Udsnit af isotermbillede fra Therm-beregning med en 20 mm luftfyldt rude. Øverste snitflade er midt mellem to PV-moduler og nederste snitflade er midt i PV-modul mellem de to fastgørelser.

Omvendt gælder det, at der ved placering af PV-modulerne på det yderste lag glas, næsten er samme strålingsforhold for PV-areale og det "frie" glasareal af det yderste lag glas. Her er metode 1 formentlig lidt bedre end metode 2, idet der regnes mere korrekt på absorptionen af den langbølgede stråling end ved metode 2, hvor der regnes med et fiktivt lag med en delvis gennemsigtighed overfor langbølget stråling. Men de to metoder ligger væsentlig tættere på hinanden når PV-modulerne er placeret yderst.

Korrektionen for konverteringen til elektrisk energi ved at øge reflektansen på PV-modulernes yderside har i øvrigt meget lille betydning for g-værdien – ca. 0,02, hvilket er langt mindre end usikkerheden på beregningerne.

## 5. Vurdering og konklusion

De udførte beregninger ser ud til at give et entydigt resultat, når de forskellige beregningsmetoder sammenlignes. Det må derfor vurderes, at de anvendte programmer godt kan anvendes til beregning af termiske og optiske værdier for PV-vinduer, selvom de ikke direkte er beregnede til dette.

En direkte energibalance for et PV-vindue kan opstilles på simpel vis, men det er væsentligt mere kompliceret at vurdere PV-vinduernes reelle indflydelse på bygningens energiforbrug. Dette kræver et ret detaljeret kendskab til bygningen og en rimeligt detaljeret beregning af bygnings opvarmningsbehov og termiske indeklimaforhold.

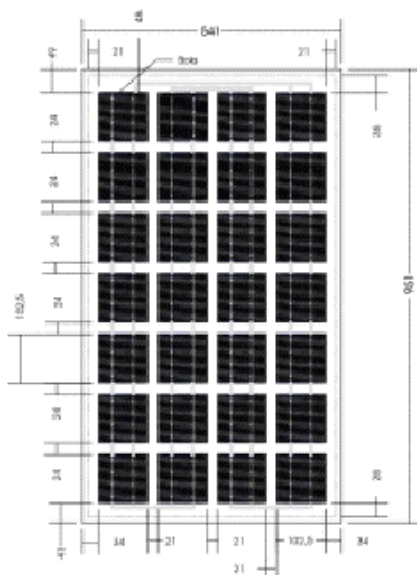
Det væsentligste kriterium for, hvornår PV-vinduer vil være energimæssigt fordelagtige i en bygning er bygningens opvarmningsbehov i fyringssæsonen. Hvis bygningen har et reelt opvarmningsbehov i hele fyringssæsonen vil PV-vinduer ikke være energimæssigt fordelagtige. Her vil det være bedre at udnytte fuldt ud den varmeenergi, som vinduet kan bidrage med.

Hvis bygningen til gengæld kan få dækket sit opvarmningsbehov i dagtimerne også i en del af fyringssæsonen af andre varmekilder, f.eks. af personer og elektrisk udstyr i kontorbyggeri, vil det være energimæssigt fordelagtigt at anvende PV-vinduer. Hvis bygningen tillige har et reelt kølebehov i sommerperioden bliver anvendelsen af PV-vinduer endnu mere fordelagtig.

En mere nøjagtig vurdering af PV-vinduers reelle påvirkning af bygningers energiforbrug vil kræve mere detaljerede energi- og indeklimaberegninger for forskellige typer bygninger, men det har der ikke været mulighed for indenfor dette projekts rammer. Især vil det være interessant at undersøge, hvor stort/lille opvarmningsbehovet skal være i fyringssæsonen før PV-vinduer bliver energimæssigt fordelagtige.

## Bilag A Datablad for Gaia Solar A/S PV-vindue

### Termorude med solceller type GST38m



GST38m

#### Produktegenskaber

- ☉ Varmebidrag til bygningen
- ☉ Produceres efter kundespecificerede mål
- ☉ Nem at tilslutte med lynboks på termorudens bagside

#### Komponenter

- ☉ Serieforbundne monokrystallinske solceller
- ☉ Forside: Hærdet jernfattigt float glas med høj transmissionsevne i 4 mm tykkelse
- ☉ Bagside: Hærdet float glas med høj transmissionsevne i 4 mm tykkelse
- ☉ Lynboks i IP 65 klasse med hurtig seriel forbindelse

#### Anvendelsesområder

- ☉ Nettilsluttede systemer
- ☉ Vindues partier

#### Tekniske specifikationer

Elektriske karakteristika <sup>(1)</sup>	GST38m
Nominel effekt, $W_p$	38
Garanteret minimums effekt, $W_p$	26
Spænding	
• Peakspænding, $U_p$ (V)	13,2
• Tomgangsspænding, $U_t$ (V)	16,6
Strømstyrke	
• Peakstrøm, $I_p$ (A)	2,9
• Kortslutningsstrøm, $I_k$ (A)	3,2
Temperatur koefficient på $W_t$ :	-0,17 W/°C
Dimensioner	951 × 541 × 54 mm
Vægt:	12,5 kg

1. Målt ved standard betingelser (STC), 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5 og 25 °C.

Gaia Solar fremstiller solcellepaneler i henhold til ESTI 503



Gaia Solar A/S · Hammerholmen 9-13, 1B · DK-2650 Hvidovre · Danmark · Tel. (+45) 36 77 79 76 · Fax (+45) 36 77 79 75 · A/S reg. No. 227 657