

Van het meten van de warmtestralingseigenschappen van schermen tot het berekenen van de isolatiewaarde van een schermstelsel

Filip Bronchart ¹, Luis Corbala ²

¹ UGent, Applied Thermodynamics and heat Transfer research team

² ILVO, Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek, Technologie en voeding



Titel	Isolatiewaardemeting van schermen
Contactgegevens	Universiteit Gent Filip Bronchart Filip.Bronchart@ugent.be ILVO Luis Corbalá Robles Luis.CorbalaRobles@ilvo.vlaanderen.be
Project	Dit onderzoek vond plaats binnen het Interreg project GLITCH. GLITCH zet in op de ontwikkeling van innovatieve energie-efficiënte en klimaatneutrale teelttechnieken en -systemen in de glastuinbouw. Deze teeltproef maakt onderdeel uit van de ontwikkeling van klimaatneutrale teelttechnieken en -systemen. https://glitch-innovatie.eu/
Steunvermelding	Dit onderzoek wordt enerzijds mogelijk gemaakt met de steun van het Interreg V programma Vlaanderen-Nederland, het grensoverschrijdend samenwerkingsprogramma met financiële steun van het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling. Anderzijds wordt het project ondersteund vanuit het Agentschap Innoveren en Ondernemen (VLAIO), de Provincie Antwerpen, Het Vlaams Kabinet Omgeving, Natuur en Landbouw, de provincie Limburg (NL) en het Nederlands Ministerie van Economische zaken.

Afkortingen

PE	Polyethylene
PVDF	Polyvinylidene fluoride
EB	Energie balancerend€
PCH	Proefcentrum Hoogstraten
PSKW	Proefstation voor de Groenteteelt
MKB	Maurice Kassenbouw
ILVO	Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek
AC	Anti-condens
PAR	Photosynthetically active radiation
RV	Relatieve vochtigheid
VA	Vinyl acetaat

Inhoudstafel

Afkortingen.....	3
Inhoudstafel	4
1. Voorwoord	5
2. Inleiding	6
3. Het meten van de warmtestralingseigenschappen van schermen	8
3.1. Algemene beschrijving	8
3.2. Gedetailleerde beschrijving test set-up	9
3.3. Testprocedure.....	11
3.4. Berekening van warmtestralingscoëfficiënten.....	12
Papier test - kalibratie van niet-warmtestralingsverliezen	15
4. Model U-waardeberekening op basis van gemeten stralingseigenschappen	17
4.1. Algemeen	17
4.2. Functionering van het warmtedoorgangmodel	18
5. Resultaten en bespreking	19
5.1. Resultaten van de warmtestralingscoëfficiëntmetingen	19
5.2. U-waarde van schermcombinaties i.f.v. stralingseigenschappen.....	21
6. Conclusies.....	24
7. Referenties.....	25

1. Voorwoord

De glastuinbouw in Vlaanderen en Nederland is gekenmerkt door een optimale teeltomgeving resulterend in hoge productie en kwaliteit. Deze optimale teeltomgeving wordt huidig ingevuld door het aanleveren van grote hoeveelheden energie in de kas. Zo is de energievraag van de Nederlandse glastuinbouw anno 2018 afgerond 100PJ, dat is 83% van de totale energievraag van de landbouw in Nederland. In Vlaanderen is de energievraag in 2018 15PJ, dat is 52% van de totale energievraag van de sector.

Dit grote energieverbruik is huidig de achillespees van de sector. De sector is zich daar bewust van en in Nederland heeft de sector een convenant afgesloten met de overheid die 55% reductie voor ogen heeft tegen eind 2030. In Vlaanderen moet volgens het Vlaams klimaatplan de energetische emissies in de landbouwsector in 2030 met 44% gereduceerd worden t.o.v. 2005.

De sector staat dus voor grote veranderingen en dit rapport toont aan dat deze veranderingen realistisch haalbaar zijn.

Het huidig hoge energieverbruik is gerelateerd aan de huidige bouw van de kassen: enkelglas voorzien van 1 of 2 schermen waarvan de fysische eigenschappen (dit rapport toont dit aan) onvoldoende zijn om de warmteverliezen sterk te reduceren. Daarmee kan de huidige kas, wat betreft energiebeheer, vergeleken worden met een oude niet geïsoleerde woning: deze heeft volgens EPC (energieprestatiecertificaat) een energievraag van rond de 400-500kWh/m²/j en voor warme teelten (bv. tomaat) in Vlaanderen is dit rond 444 kWh/m²/j.

Er zijn bovendien nog meer energiegelekenissen tussen het oude woning concept en de huidige kassen. Zo was de tijdsgeest in de periode van de slecht geïsoleerde huizen gekenmerkt door de mening dat lucht in een spouw isoleert en dat dit dus goedkoper is dan het plaatsen van isolatiepanelen. Ondertussen is dit hardnekkig foutief concept door opgelegde normering van de baan en zijn de woningen energiezuiniger geworden. Nu die spouwmuur dat kun je vergelijken met de huidige schermen. Tuinders denken dat deze isoleren maar in werkelijkheid zijn ze meestal niet of enkel beperkt performant. Het ontbreekt hier ook aan de nodige normering zodat tuinders hierin een wegwijs kunnen vinden. Indien deze normering komt, zullen de schermen evolueren van het spouwmuurtype tot het isolatiepaneel type en resulteren in grote energievraag beperkingen. Aan dit pad werd er in GLITCH succesvol vooruitgang geboekt.

In dit rapport beschrijven we het belangrijkste deel die bepaald of een scherm performant of niet performant is: zijn warmtestralingseigenschappen. We geven weer hoe je deze meet en welke invloed ze hebben op de isolatiewaarde van het kasdek.

Het team van GLITCH hoopt dan ook dat dit rapport verhelderend mag zijn en een bijdrage mag zijn voor de sector om de voor de deur staande uitdagingen aan te gaan te voordele van hen en de maatschappij. Filip Bronchart (UGent) en Luis Corbala (ILVO)

2. Inleiding

De warmtedoorgangscoefficient (U , $W/m^2/K$) van een scherm wordt bepaald door verschillende processen die een bijdrage leveren:

- Natuurlijke Convection: lucht onder het scherm geeft warmte door aan het scherm en lucht boven het scherm neemt warmte op van het scherm. De lucht is daarbij in beweging door verschillende dichtheden resulterend uit de temperatuurverschillen.
- Warmtestraling: schermen stralen warmte uit naar elkaar volgens de Stefan-Boltzmann vergelijking.
- Dampdiffusie: net zoals er een warmteflux ontstaat over een temperatuursgradient in een isolatiemateriaal, ontstaat er massaflux van watermoleculen door een concentratiegradient over een scherm.
- Luchtinfiltratie: hierbij beweegt warmte lucht van onder het scherm door het scherm naar de koudere laag erboven en omgekeerd en wisselt daarbij voelbare en latente warmte uit.

Bij streven naar een scherm dat isoleert, willen we al deze termen minimaliseren.

De convectieterm kan niet/maar beperkt worden geminimaliseerd: de grootte van de term is vooral afhankelijk van het temperatuurverschil tussen scherm en de onder/boven liggende luchtlaag en die stelt zich in op de basis van binnen en buitentemperatuur.

Daarentegen is de bijdrage via diffusie, lichtinfiltratie en warmtestraling wel te variëren door het wijzigen van de fysische eigenschappen van het scherm.

Dampdiffusie en lichtinfiltratie worden hier niet verder besproken. Voor een volledige beschrijven verwijzen we naar het wetenschappelijk artikel van Bronchart (in preparation). Dampdiffusie en luchtinfiltratie bepalen de ontvochtiging van de kas, maar hebben een beperktere invloed op de warmtedoorgangscoefficient dan de warmtestraling.

In dit rapport wordt dieper ingegaan op de warmtestraling. Dit is de belangrijkste term die de warmtedoorgang van het scherm bepaald. Het belangrijkste doel is om de overdracht via warmtestraling te minimaliseren.

De binnenkant van een kas (planten, vloer, structuur), het scherm en de ruimte boven het scherm stralen continu warmtestraling naar elkaar uit volgens de wet van Stefan-Boltzmann. Het verschil tussen beide is de warmteoverdracht van binnen naar buiten. Als er materialen zijn die dit verschil/warmteoverdracht door straling minimaliseren, blijft er meer warmte in de kas. Dit vertaalt zich in een hogere isolatie.

De beste isolatie wordt bekomen door warmtestralingsreflectie. Fysisch heb je voor dit proces vrije elektronen nodig die vooral voorkomen in metalen. Daardoor komt het dat warmtereflecterende een metaalkleur hebben. Meestal is deze reflectie niet combineerbaar met de transmissie van het zonlicht. Daarom kunnen materialen die warmtestraling reflecteren alleen 's nachts worden gebruikt (nachtschermen).

Voor dagschermen, die een hoge lichttransmissie moeten hebben en waardoor reflectie dus geen optie is, wordt daarentegen ernaar gestreefd de absorptie van warmtestraling te maximaliseren zodanig dat de rechtstreekse transmissie minimaal is. De absorptie door het scherm is als het ware een extra weerstand voor de warmte om naar buiten gestraald te worden en is vergelijkbaar met het broeikaseffect waarbij hemelgassen ons beschermen tegen de koude temperaturen buiten de aarde.

Hieruit blijkt dat voor het ontwikkelen van meer isolerende schermconfiguraties, de eerste stap het kennen van zijn warmtestralingseigenschappen is.

Daarom bestond de eerste stap in dit project in het opzetten van een geschikte meetmethode voor het meten van de warmtestralingseigenschappen van de schermen (zie hfdst. 3). Met deze meetmethode werden dan nieuwe en bestaande commerciële schermen gekarakteriseerd en gerapporteerd (hfdst. 4). Het laatste hoofdstuk (Hfdst. 5) betreft dan het bepalen van de isolatiewaarde (U , $W/m^2/K$) van schermen als functie van hun warmtestralingseigenschappen. Op basis van deze resultaten werden innovatieve schermen geselecteerd en geïmplementeerd in teeltproeven op het PCH en PSKW. Voor de resultaten van deze teeltproeven, zie Corbala, 2021.

3. Het meten van de warmtestralingseigenschappen van schermen

3.1. Algemene beschrijving

Zoals in de inleiding beschreven, zenden schermen warmtestraling uit naar de lichamen in hun omgeving en vice versa. De uitgewisselde stralingshoeveelheid bij vaste omgevingscondities, is afhankelijk van hun warmtestralingseigenschappen, namelijk hun

- transmissiecoëfficiënt (τ): Dit is het energiepercentage van de warmtestraling die doorheen het scherm gaat. Voor dit deel van de straling is als het ware het scherm niet aanwezig.
- absorptie- of emissiecoëfficiënt (α of ϵ): Dit is het energiepercentage van de straling vanuit de omgeving die door het scherm geabsorbeerd wordt. Omwille van behoud van energie (zie Lienhard, 2020) is deze absorptiecoëfficiënt, gelijk aan de emissiecoëfficiënt, dat is het percentage van het lichaam dat reageert als zwarte straler (Stefan-Boltzmann).
- en reflectiecoëfficiënt (ρ): Dit is het energiepercentage van de straling vanuit de omgeving die door het scherm gereflecteerd wordt.

Deze theorie wordt toegepast op de gebruikte meetmethode. Deze bestaat eruit een scherm te plaatsen rond een verwarmingselement. Daarbij gaat het scherm eerst opwarmen om erna tot een evenwicht te komen tussen de warmteinput via de verwarming en het warmteverlies. Dit warmteverlies komt door straling en natuurlijke convectie.

Omdat de natuurlijke convectie een onbekende is, gaan we het scherm met verwarmingselement in een vacuüm omgeving brengen, waardoor zijn warmteverlies dus enkel nog/voor het grootste deel via straling gebeurt en dus enkel/vooral afhankelijk is van zijn stralingseigenschappen (zie Fig. 1).

De meetmethode werd niet geoptimaliseerd en ook geen foutanalyse werd uitgevoerd. Daarvoor waren binnen het GLITCH project geen middelen voorzien. De gerealiseerde meetmethode is echter wel voldoende precies om binnen een marge van 5% de stralingscoëfficiënten te berekenen en dit was voldoende voor de schermontwikkeling.

In vergelijking met andere meetmethoden zoals voorgesteld door Baart de la Faille (2009) heeft deze meetmethode volgende voor- en nadelen

- Voordeel: volledige hemisferisch (over 180°) meetveld
- Nadeel: de gemeten transmissiviteit is een dubbele transmissiviteit. Hieruit moet dan een enkellaagse transmissiviteit omgerekend worden. (zie verder)



Fig. 1 Foto van vacuümbox test setup voor het meten van de stralingseigenschappen van schermen

3.2. Gedetailleerde beschrijving test set-up

De metingen zijn uitgevoerd in een vacuümbox. De afmetingen van de doos zijn B35-L35-H30 cm. De temperatuur van elke wand (4 zijden en bodem) wordt gemeten met een 1 mm diameter thermokoppel type K dat erop is gekleefd (zie Fig. 2). Op elk van de wanden is isolatie aangebracht om invloeden van buitenaf op de temperatuur van deze wanden te voorkomen.

Het opgelegde drukniveau is 8-10 mbar omwille van volgende redenen:

- Vaak wordt gedacht dat in vacuüm de lucht geen warmte meer geleid. Dit is echter niet correct: zolang moleculen van lucht kunnen trillen en bewegen, geleid lucht wel nog de warmte, zelfs in dezelfde mate als bij atmosferische druk. Wat echter wel verschillend is bij lagere druk is de convectiecoëfficiënt. De convectiecoëfficiënt is afhankelijk van de warmtecapaciteit (c_p , J/kg/K) van de lucht en deze is (veel) lager in vacuüm.
- Tijdens de metingen werd vastgesteld dat bij een druk onder de 8 mbar, de warmte/convectieve verliezen terug groter worden. Daarom werd gekozen om de metingen tussen 8-10 mbar uit te voeren.
- De gebruikte meetbox is niet volledig luchtdicht. Bij heel lagere drukken (bv 1 mbar), resulteert de lekfiltratie in een relatief snelle drukstijging. Bij 8-10 mbar is de drukstijging tijdens een meting gedurende een 10 min periode relatief beperkt (ong. 2 mbar).

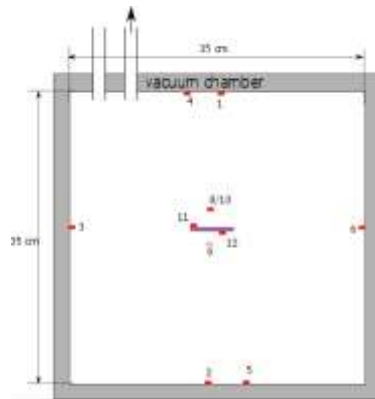


Fig. 2 Bovenaanzicht van vacuümmeetbox met in het midden verwarmingselement waarop het scherm is aangebracht. De weergegeven nr's zijn de gebruikte thermokoppels.

Het te testen scherm wordt aangebracht op een staalhouder. Deze staalhouder heeft drie hoofdcomponenten. Van binnen naar buiten: elektrisch verwarmingselement, aluminium plaatje voor gelijkmatige warmtegeleiding en een achtergrond met bekende emissiviteit (hier papier of aluminiumfolie). De afmetingen van de staalhouder zijn 5,1-5,1-0,3 cm.

De staalhouder wordt in het midden van de vacuümbox aangebracht en is verbonden met volgende connecties:

- Twee thermokoppels type K met een diameter van 0,25 mm meten de temperatuur van het monster (d.w.z. het oppervlak).
- De elektrische stroom is verbonden via 2-5 draden. De draden hebben een diameter van 0,2 mm.
- Die verbindingen zijn zo dun mogelijk gemaakt om geleidingsverliezen te voorkomen.

De gebruikte thermokoppels worden gekalibreerd in een GE DRUCK DBC150-oven met een FLUKE 1523 REFERENTIE-THERMOMETER (nauwkeurigheid 0,064, gekalibreerd door Dimed van 0°C tot 150°C). Ze hebben een nauwkeurigheid van 0,15°C.

Zodra het monster op zijn plaats zit wordt de doos gesloten en wordt de vacuümpomp gestart. Er wordt stroom geleverd aan het verwarmingselement zodanig dat er een temperatuurverschil instelt tussen het monster en de wanden van ca. 10°C.

De gegevens werden gelogd met behulp van een Keithley 2400. Deze zijn

- stroom en spanning geleverd aan het verwarmingselement van het monster
- temperatuur van het monster en van de vacuümboxwanden.

3.3. Testprocedure

De eerste stap is de kalibratie van de meetsetup. Hiervoor wordt een test uitgevoerd met een referentiemateriaal met gekende emissiviteit. Gezien we niet in bezit waren van een nauwkeurig referentiemateriaal met gekende emissiviteit, gebruikten we hiervoor papier dat volgens Lienhard (2020) een emissiviteit heeft van 0.95. Uit de resultaten van de test kunnen de beperkte niet-stralingsverliezen worden gekwantificeerd. Bij hierna volgende metingen worden de opgemeten bruto warmteverliezen altijd geminderd met de niet-stralingsverliezen. Dit levert dan de netto warmteverliezen op die volledig toewijsbaar zijn aan straling.

De tweede stap is het opmeten van de emissiviteit van de 2^{de} achtergrond nl de aluminiumfolie. Deze heeft benaderend een emissiviteit van 0,3.

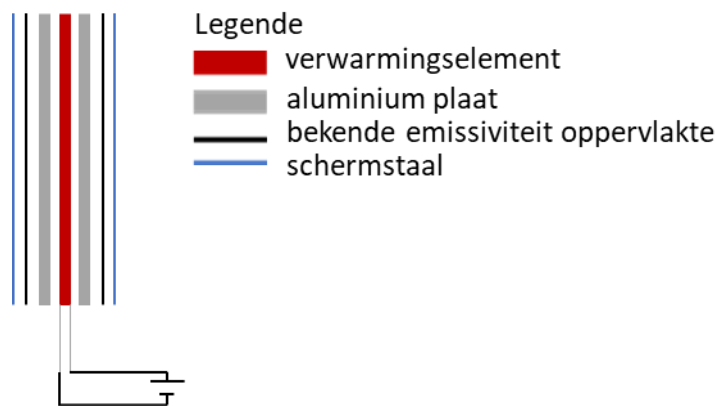


Fig. 3 Samenstelling verwarmingselement met scherm

Hierna kunnen de eigenlijke metingen uitgevoerd worden. Deze bestaan uit:

1. Test van monster op papieren referentie
2. Test van monster op aluminium

Het monster moet zowel op papier als op aluminium worden getest om de doorlaatbaarheid van warmtestraling van het monster te kunnen berekenen (T_{scherm}).

3.4. Berekening van warmtestralingscoëfficiënten

Voor het berekenen van de warmtestralingscoëfficiënten zijn volgende concepten belangrijk :

- Zwart lichaam: een geïdealiseerd lichaam dat alle invallende straling absorbeert. Dit betekent dat de absorptie en emissiviteit bij elke golflengte gelijk is aan 1. Als vergelijking $\varepsilon = \varepsilon(\lambda) = 1$
- Grijs lichaam: Dit betekent dat de stralingseigenschappen onafhankelijk zijn van de golflengte. Voor berekening van warmteoverdracht wordt vaak het grijze gedrag verondersteld (Lienhard, 2020). Als vergelijking $\varepsilon = \varepsilon(\lambda) = 0.3$
- Golflengte afhankelijke lichamen: De transmissie, emissiviteit en reflectie zijn afhankelijk van de golflengte. Dat is het eigenlijke fysische gedrag. De gemiddelde warmtestralingscoëfficiënt is het resultaat van een integratie over alle golflengten. Als vergelijking $\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) e_b(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}$

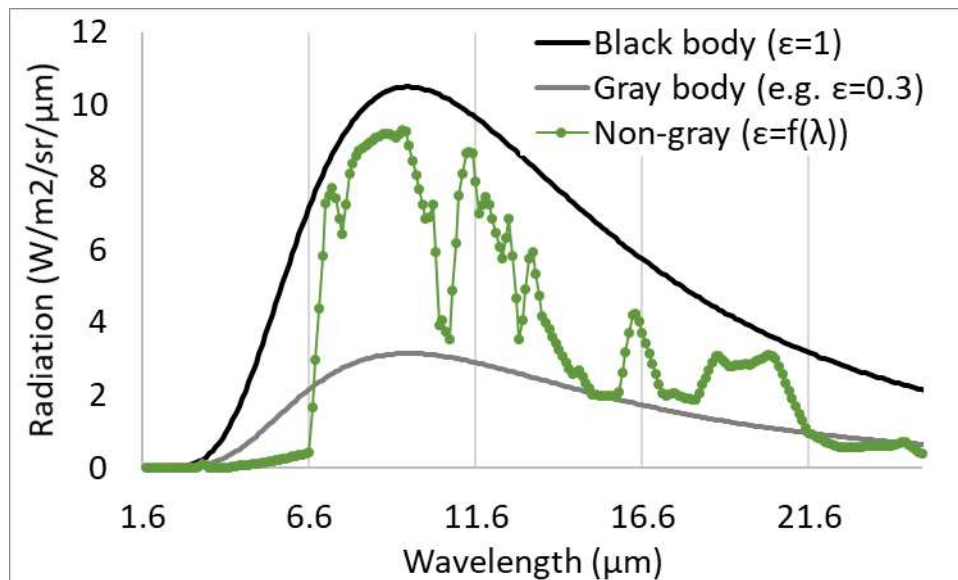


Fig. 4 Voorstelling van emissiviteit voor zwarte, grijze en golflengte afhankelijke lichamen.

Bij schermen is de transmissie (doorlaatbaarheid) sterk afhankelijk van de golflengte. Figuur 5 toont de doorlaatbaarheid van PVDF als functie van de golflengte. Deze varieert van 0 tot 95%.

Het is belangrijk de golflengteafhankelijkheid te integreren bij de karakterisatie van het scherm omwille van volgende redenen:

- De berekening van de warmtestralingseigenschappen bij meerdere scherm verschilt (sterk) indien het grijs model gebruikt wordt versus het werkelijk lichaam (golflengte afhankelijk).
- De vacuüboxmeetmethode meet een dubbele transmissiviteit. Hieruit moet een enkele transmissiviteit kunnen afgeleid worden. De transmissiviteit van het werkelijke



lichaam zal (sterk) verschillen dan deze berekend volgens de grijze model aannames. Ook in het onderzoek van Baart de la Faille (2009) is dit een belangrijk deel van de reden van de vastgestelde verschillen in warmtestralingscoëfficiënten tussen de verschillende meetmethoden (+20%).

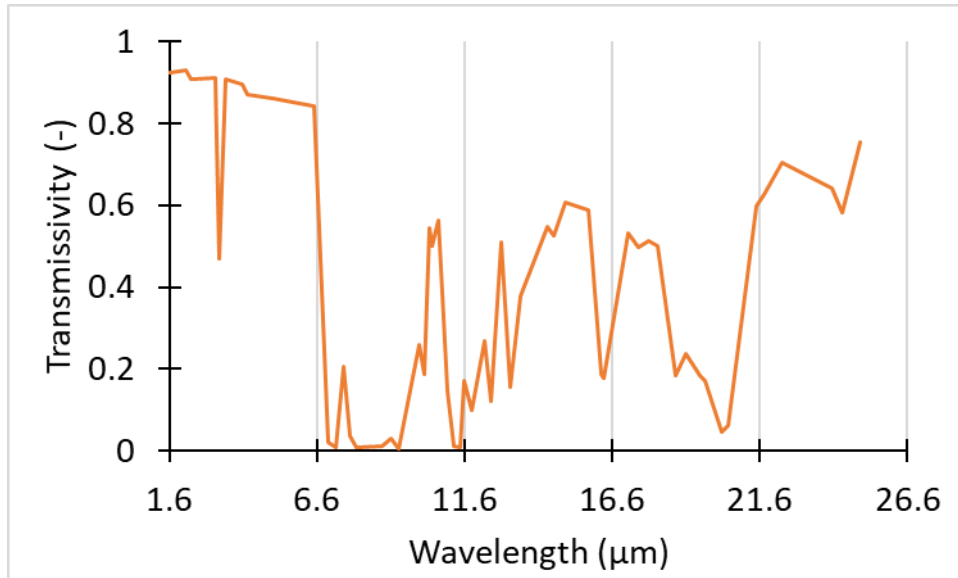


Fig. 5 Transmissiviteit van PVDF i.f.v. van golflengte gemeten door de WUR met Varian spectrophotometer

Het integreren van de golflengteafhankelijkheid ($\epsilon(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\rho(\lambda)$) is moeilijk realiseerbaar voor de praktijk:

- Dit vraagt dure meetapparatuur (spectrofotometer) die bovendien, naar ons weten, niet hemisferisch maar enkel loodrecht meet.
- De stralingseigenschappen van het scherm worden niet weergegeven als enkele coëfficiënten maar als grafiek. Dit maakt het modelleren van kassen veel ingewikkelder.

Daarom wordt hieronder een modelmatige benadering voorgesteld.

De modelaannames zijn daarbij:

- De straling wordt opgedeeld in twee categorieën:
 - Grijs (gr): Energiepercentage van de straling die voor de transmissie grijs reageert. Voor dit grijze deel is een dubbele transmissie τ_{gr}^2 .
 - Niet-grijs (1-gr): Energiepercentage van de straling dat voor zijn transmissie ofwel 100% ofwel 0% doorgelaten wordt. Dit betekent dat de transmissie van het $[1-gr]$ deel van de straling bij één of meerdere keren door het scherm constant blijft (τ_{ngr}) omdat na de eerste transmissie enkel nog de golflengtes over blijven die 100% worden doorgelaten.
- Voor de reflectie zijn de aanname:
 - Het transmissieve niet grijze deel $[1-gr]$ heeft geen reflectie.
 - Het transmissieve grijze deel $[gr]$ reageert ook grijs wat betreft reflectie.
 - Het niet transmissief deel van de straling reageert ook grijs wat betreft reflectie.

De totale doorlaatbaarheid, τ_{sc} , van het scherm is daarom gemodelleerd als:

$$\tau_{sc} HR = gr HR \tau_{sc,gr} + (1 - gr) HR \tau_{sc,ngr} \quad (vgl. 1)$$

Met:

- HR betekent de totale warmtestraling (J) die het scherm bereikt
- Subscript ngr betekent niet-grijs

Door deze vergelijking zijn er 3 extra onbekenden en 1 vergelijking, dus 2 extra vrijheidsgraden. Het is wenselijk om slechts 1 extra onbekende te hebben. Daarvoor komt er een extra modelaannames waarin de data moet fitten, nl:

$$\tau_{sc} = \tau_{sc,ngr} = \tau_{sc,gr}$$

Geïntegreerd in vorige vergelijking wordt dit:

$$\tau_{sc} = gr \tau_{sc} + (1 - gr) \tau_{sc} \quad (vgl. 2)$$

Hiermee is er dus een extra onbekende (gr) om de meerlagige straling coëfficiënten te kunnen benaderen.

Deze grijsfactor (gr) van de straling kan berekend worden uit experimentele gegevens. Daarvoor moeten metingen uitgevoerd worden met één en twee schermlagen. De doorlaatbaarheid van twee schermlagen (τ_{2sc}) is dan:

$$\tau_{2sc} = \frac{gr (\tau_{sc})^2}{1 - \left(\frac{\rho_{sc}}{1 - \tau_{sc}} (1 - gr)\right)^2} + (1 - gr) \tau_{sc} \quad (vgl. 3)$$

Zoals te zien is, wordt het niet-grijze deel (1-gr) niet beïnvloed door het aantal lagen, omdat in dit deel de uitgezonden energie voor 100% wordt overgedragen. Voor het grijze (gr) deel moet rekening gehouden worden met een dubbele doorlaatbaarheid (τ_{sc}^2), en bovendien moet ook rekening worden gehouden met het reflectievermogen tussen de schermen die in principe iets hoger is volgens de aanname hierboven beschreven.

Voor berekeningsdoeleinden wordt een transmissie gedefinieerd zonder meervoudige reflectie ($\tau_{2sn,nr}$):

$$\tau_{2sc} \approx \tau_{2sc,nr} = gr (\tau_{sc})^2 + (1 - gr)\tau_{sc} \quad (vgl. 4)$$

Voor meerdere schermen, n :

$$\tau_{nsc} \approx \tau_{nsc,nr} = gr (\tau_{sc})^n + (1 - gr) \tau_{sc} \quad (vgl. 5)$$

Hierboven is dus het model van de gr factor toegelicht. Dit wiskundig model wordt toegepast op de vacuümboxmetingen. De wiskundige beschrijving daarvan gaat buiten de scope van dit verslag en zijn daarom hier niet opgenomen.

Papier test - kalibratie van niet-warmtestralingsverliezen

Alle tests zijn op dezelfde manier uitgevoerd. Aan het begin van de test, terwijl de doosdruk 8-10 mbar bereikt, vindt een verwarmingsperiode voor het monster plaats (blauw vierkant, afb. 6), waarna de stroom die aan het verwarmingselement wordt geleverd, wordt aangepast zodat er zich een temperatuurverschil instelt van 10 ° C tussen het monster en de wanden. Hierna wordt een meting gedaan van vermogen (d.w.z. stroom keer spanning) en de temperatuur.

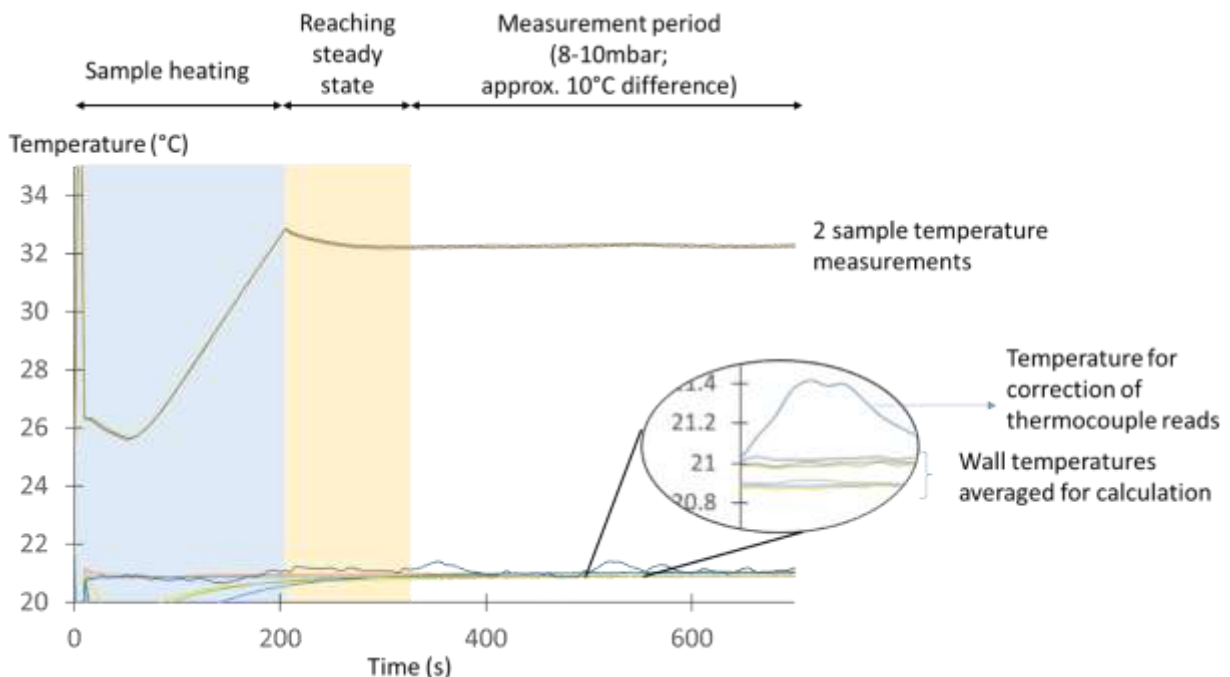


Fig. 6 Schema van meetgrafiek

Indien geen andere warmteverliezen, zou het gemeten vermogen overeenstemmen met de warmtestraling van een klein (re) oppervlak naar een grotere omgeving (Lienhard, 2005, hoofdstuk 10.4). Als vergelijking:

$$V * I = Q[W] = A_{pap} * \epsilon_{pap} * \sigma * (T_{sample}^4 - T_{walls}^4)$$

Waar σ de constante van Stefan-Boltzmann is.

Uit metingen is vastgesteld dat dit niet volledig overeenstemt. Er zijn extra warmteverliezen door

- convectie (beperkt)
- geleidingsverliezen (thermokoppels, kabels)
- een deel van het verwarmingselement wordt niet bedekt door het papier en straalt ook warmte uit

Om rekening te houden met deze niet schermstralingsverliezen verliezen tijdens de rest van de tests, wordt een warmteverliescompensatiefactor (L_{dT}) gedefinieerd:

$$[\text{warmteverliezen per } ^\circ\text{C verschil}] = L_{dT} = \frac{V * I - A_{pap} * \epsilon_{pap} * \sigma * (T_{sample}^4 - T_{walls}^4)}{T_{sample} - T_{walls}}$$

Deze factor is 0.004889 W/ $^\circ\text{C}$.

4. Model U-waardeberekening op basis van gemeten stralingseigenschappen

4.1. Algemeen

De berekende U-waarde vertegenwoordigt de totale verwachte warmteoverdracht (W/m^2) tussen de binnenkant en de buitenkant van de kas, rekening houdend met een respectieve binnen- en buitentemperatuur:

$$U_{waarde} = \frac{Q}{A * (T_i - T_o)} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (vgl. 14)$$

Waar T_i staat voor de temperatuur in de kas onder de schermen, T_o voor de buitenluchttemperatuur, Q is de warmteflux die naar verwachting verloren gaat door het bovenste deel van de kas en A is het grondoppervlak van de kas.

In deze vergelijking zijn verschillende processen betrokken zijn zoals beschreven in de inleiding (hfdst 2). Figuur 7 vat deze processen samen. Hoe meer schermen er in een kas aanwezig zijn, hoe meer lagen (met bepaalde temperatuur en massaconcentratie) er zijn en waarmee rekening moet worden gehouden bij de berekening van U .

De U-waarde is dus niet alleen een intrinsieke waarde van de combinatie van beglazing en schermen, maar ook een resultaat van verschillende processen (lekkage, straling...) en omstandigheden (temperatuur, windsnelheid buiten de kas, bewolking...) .

Ter illustratie, zo heeft de bewolgingsgraad effect op de U-waarde. Tijdens een volledig bewolkt moment zal de U-waarde kleiner zijn dan tijdens een onbewolkt moment, aangezien de rest van de omstandigheden hetzelfde blijft. De reden hiervoor is dat bij bewolking de hemeltemperatuur hoger is dan bij heldere lucht. Een hogere hemeltemperatuur zal resulteren in lagere warmtestralingsverliezen (kleinere Q), wat zich vertaalt in kleinere U-waarden volgens vgl. 14.

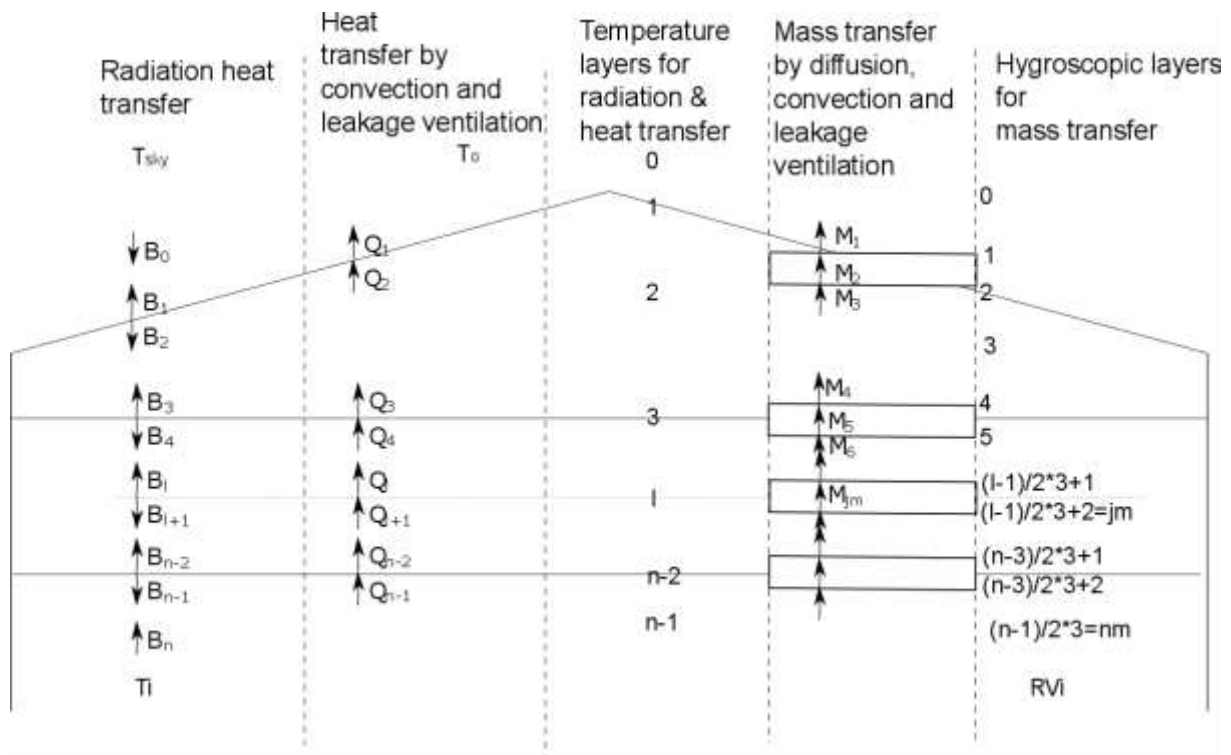


Fig. 7 Overzicht van de warmte en massatransporten die de U-waarde van de kas bepalen

4.2. Functionering van het warmtedoorgangsmodel

Het model doorloopt een reeks iteraties om een stabiele toestand te vinden op basis van een reeks gegeven parameters: binnen- en buitentemperaturen, parameters van schermlagen, bewolking, relatieve vochtigheid binnen en buiten.

De iteraties bestaan uit volgende stappen

- Eerst worden de temperaturen en RV van de verschillende lagen ingeschat.
- Berekening van de warmte- en massaoverdracht tussen de verschillende lagen
- berekening van nieuwe temperaturen en RV op basis van de berekende warmte- en massaoverdracht;
- de iteratie stopt wanneer het verschil in warmteoverdracht tussen de verschillende lagen minder is dan 0,01 W;

Op basis van vgl. 14 wordt dan een U-waarde berekend.

5. Resultaten en bespreking

5.1. Resultaten van de warmtestralingscoëfficiëntmetingen

In de onderstaande tabel worden de waarden gegeven die zijn verkregen voor verschillende dagschermen.

Ter herinnering:

- voor sterk isolerende schermen is het maximaliseren van de reflectiviteit het doel
- als dat niet mogelijk is, moet men streven naar een maximale emissiviteit
- in beide gevallen komt dit neer op minimale doorlaatbaarheid/transmissiviteit.
- Voor dagschermen, waar zonlichttransmissie belangrijk is, zijn hoge reflectiviteitswaarden niet mogelijk omdat deze ook zonlicht reflecteren.

Drie schermen zijn getest met 1 en 2 lagen: [PVDF], [PE-VA-AC_1, 150µm] en [PE-VA-AC_additive, teelt 2021]. Uit deze metingen werd de grey factor (gr) berekend, deze is respectievelijk 0,28, 0,18 en 0,01. De oorsprong in variatie van grey factor is waarschijnlijk het gevolg van meetfouten. Zoals beschreven in hfdst 3.1., werd de meetmethode niet gedetailleerd uitgewerkt omdat daarvoor geen budget was voorzien.

De andere dagschermen werden enkel in 1-laagse uitvoering gemeten. Voor de berekening van de stralingscoëfficiënten wordt een grey factor van 0,23 gebruikt.

U_waarden zijn berekend (zie volgende sectie) voor de schermen die in **vetgedrukte letters** worden weergegeven.

Table 1 Enkele resultaten van warmtestralingscoëfficiënten van dagschermen. Van de schermen in het vet worden de U-waarden in volgende sectie berekend. Deze werden berekend met een grey factor van 0.23.

DAGSCHERM	T	ε	ρ
Luxous 1147FR	0.21	0.71	0.08
PVDF 25 micron	0.22	0.61	0.17
PE-AC, teelt 2019, 100 µm	0.68	0.31	0.01
PE-VA-AC_1*, 100 µm	0.54	0.44	0.02
PE-VA-AC_1*, 150 µm	0.35	0.56	0.09
PE-VA-AC_2*, 100 µm	0.47	0.49	0.04
PE-VA-AC_3*, 100 µm	0.47	0.49	0.04
PE-VA-AC_4*, 100 µm	0.39	0.51	0.10
PE-VA-AC_5*, teelt 2020, 120 µm	0.22	0.66	0.12
PE-VA-AC_+FR, teelt 2021, 100 µm	0.19	0.79	0.02

* Hoger getal betekend hoger VA gehalte

Op basis van de gegevens in de tabel, zien we dat PE-AC schermen enkel kunnen isoleren als deze voorzien zijn van een condenslaag. Zonder dit is het doorlaatvermogen van de warmtestraling 68% - een hoge waarde betekent een lage isolatie. Daarentegen is de transmissie 21% in commerciële polyester schermen zoals de Luxous 1147FR. Ook PVDF of PE-VA schermen met hoge gehalte aan VA hebben een vergelijkbare lage transmissie.

Voor nachtschermen is het doel om de reflectiviteit (ρ) te maximaliseren. Als bleek uit de eerste test dat de reflectiecoëfficiënt (monster op papier) niet hoog genoeg was, werd (in sommige gevallen) geen verdere test uitgevoerd om de transmissie te onderscheiden van de absorptie.

Sommige schermen werden ook getest nadat ze handmatig waren verkruid om te zien af een verkreukeld oppervlak de reflectie van het materiaal beïnvloedt.

Het is ook belangrijk op te merken dat voor deze materialen de reflectie niet hetzelfde is aan beide zijden van het monster. De 'glans' zijde zal een hogere reflectie hebben dan de 'mat' zijde. De manier waarop ze in de kas worden geïnstalleerd, kan hun isolerend vermogen beïnvloeden.

Table 2 Enkele resultaten van nachtschermmetingen. Van de schermen in het vet worden de U-waarden in volgende sectie berekend.

NACHTSCHEM	T	ϵ	ρ
LS obscura 10050Fr glans			0.47
LS obscura 10050Fr mat			0.12
LS obscura 10050FrAB			0.40
Silvene	0.00	0.40	0.60
Aluminum folie (keuken folie)			0.70
10j oude Svensson XLS 18 glans	0.09	0.52	0.39
10j oude Svensson XLS 18 mat	0.05	0.72	0.23
Phormium Darkening wide			0.45
ALU+PP glans (WALKI)	0.02	0.20	0.79
ALU+PP mat (WALKI)			0.60
ALU+PP glans crumbled (WALKI)	0.01	0.24	0.75
Metallized film mat	0.00	0.47	0.53
Metallized film glans	0.08	0.25	0.67
Metallized film glans crumbled	0.12	0.34	0.54
Metallized film_2 mat			0.63
Metallized film_2 glans			0.69
Metallized film_2 glans crumbled	0.03	0.31	0.66

Deze grote variatie in reflectiviteitswaarden op nachtschermen (zelfs op dezelfde scherm glans/mat), wijst op de dringende behoefte aan standaardisatie van het meten van warmtstralingseigenschappen van schermen. Dit geldt ook voor dagschermen, aangezien daar ook een standaardisatie ontbreekt (zie hoofdstuk voorwoord). Verder is de vertaling naar een werkelijke U_waarde cruciaal voor de interpretatie van deze waarden (zie volgende sectie).

5.2. U-waarde van schermcombinaties i.f.v. stralingseigenschappen

Met het model beschreven in hfdst. 4 werden simulaties uitgevoerd om te evalueren wat de werkelijke winsten/verliezen zouden zijn i.f.v. de stralingseigenschappen van de schermen. Ter vergelijking:

- een 'ideaal' dagscherm werd gedefinieerd als een scherm met een emissiecoëfficiënt van 90% en reflectiecoëfficiënt van 10% (0% transmissie)
- een 'ideaal' nachtscherm werd gedefinieerd als een scherm met een emissiecoëfficiënt van 10% en reflectiecoëfficiënt van 90% (0% transmissie)

De gebruikte configuratie voor de simulaties zijn:

- 1 scherm: glas, 1m lucht, **scherm**, 5m lucht
- 2 schermen: glas, 1m lucht, **scherm**, 5cm lucht, **scherm**, 5m lucht
- 3 schermen: glas, 1m lucht, **scherm**, 1m lucht, **scherm**, 5cm lucht, **scherm**, 5m lucht

Alle simulaties zijn uitgevoerd met:

- T_{in} : 20°C
- T_{buiten} : 5°C
- RV_{in} : 85%
- RV_{buiten} : 90%
- Bewolkt: 50%
- De dampdiffusieweerstand van het scherm is 1000 s/m (voor uitleg rond deze coëfficiënt, zie Bronchart F., in preparation)
- De luchtuitwisselingweerstand over het scherm is 8000s/m. De invloed van luchtuitwisseling over het scherm is daarmee heel beperkt. (voor duiding, zie Bronchart F., in preparation)

Ter vergelijking de U-waarde voor een enkel glas kas is 8,65 W/m²/K

Tabel 3 Gemodelleerde U waarden voor 1,2 en 3 lagen schermen in de kas. De berekeningen zijn uitgevoerd volgens een grijs model (nog niet met de vermelde grey factor van hfdst. 3.4).

Screen \ Amount of day screens	U _{value} (W/m ² /K)			% higher heat loss than ideal		
	1	2	3	1	2	3
Ideal day-screen	3.8	2.5	1.8	0%	0%	0%
PE-AC, teelt 2019, 50 µm	5.0	4.2	3.6	31%	69%	106%
Luxous 1147FR	4.2	2.9	2.2	10%	20%	26%
PVDF	4.3	3.1	2.4	13%	26%	35%
PE-VA-AC_5, teelt 2020, 120 µm	4.1	2.9	2.1	8%	16%	21%

Uit tabel 3 blijkt dat de performanties van de betere doorgemeten schermen vergelijkbaar zijn met deze van een ideaal dagscherm. Voor de 1147 FR en de PE-VA is het maximale verschil in warmteverlies 26%.

Gewone PE-AC-films hebben weinig isolerende vermogen. Condensatie op deze films kan hun isolerende eigenschappen helpen verbeteren - water absorbeert warmtestraling.

Bij enkellaagse uitvoering, zijn de berekeningen in de tabel correct. Bij meerlaagse uitvoering werd echter geen rekening gehouden met de grey factor (nog niet geïntegreerd in het schermmodel). Dit betekent dat de performantie van meerdere schermen lager zal zijn dan deze weergegeven in de tabel. Daartegenover staat dan weer dat de gemodelleerde waarden berekend werd voor schermen zonder condens, en in de praktijk echter vaak wel condens op schermen aanwezig is. Condens op schermen zorgt ervoor dat de stralingsabsorptie groter is en de weergegeven performanties een onderschatting zijn.

In het algemeen moet geconcludeerd worden dat tabel 3 de best beschikbare richtlijn is voor het inschatten van de dagschermperformanties.

Bovendien moet erop worden gewezen dat, hoewel de isolerende eigenschappen van schermen vergelijkbaar kunnen zijn, men ook hun zonlichttransmissie moet evalueren. Door een hogere zonlichttransmissie kunnen schermen voor langere tijd gebruikt worden zonder de plantontwikkeling te beïnvloeden en gaat er overdag meer energie (warmte) de kas in.

Tabel 4 Gemodelleerde U waarden voor 1,2 en 3 lagen nachtschermen in de kas.

Screen \ Amount of night screens	U _{value} (W/m ² /K)			% higher heat loss than ideal		
	1	2	3	1	2	3
Ideal night-screen	1.9	1.1	0.7	0%	0%	0%
Old XLS 18 glans boven	3.5	2.2	1.6	80%	106%	136%
ALU-PP glans boven	2.3	1.3	0.9	20%	23%	28%

De huidige commerciële nachtschermen zijn inderdaad meer isolerend dan dagschermen - zelfs performante dagschermen. Toch is er nog veel ruimte voor verbetering van de isolerende eigenschappen van nachtschermen. Gedurende het GLITCH-project is een nachtscherm ontwikkeld met aluminium en PP. Deze kan, in vergelijking met een 'ideaal' nachtscherm, een maximaal isolatieverschil van 28% hebben wanneer het met de glans kant naar boven wordt geplaatst.

Het is ook interessant om combinaties van nacht- en dagschermen te evalueren, aangezien deze beide in de praktijk aanwezig zijn. Zo geeft een combinatie van 2 ALU-PP schermen 5 cm uit elkaar en een 1147FR scherm 100 cm eronder een U-waarde van 1.1 W/m²/K – in contrast met 0.9 van 3 ALU-PP screens. 2 ALU-PP, 1 PE-VA en 1 1147FR schermen geven een U-waarde van 0.95 – 39% groter warmteverlies dan 3 ideale nachtschermen.

Verder, om de hierboven gepresenteerde waarden in termen van 'hoeveel waard is een extra scherm voor mijn systeem?' te zetten, kan men berekenen hoeveel de besparing zal toenemen met een extra scherm. Deze informatie is verzameld in Tabel 5 in vergelijking met 2 1147FR-schermen.

Table 5 Relatieve U waarde van een kas in vergelijking met een kas uitgerust met 2 1147FR Svensson schermen.

Screen \ Amount of day screens	Besparingen vs 2 1147FR		
	1	2	3
<u>Glas</u>	-194%		
Ideal night-screen	34%	63%	77%
Old XLS 18 glans boven	-19%	24%	46%
ALU-PP glans boven	21%	54%	70%
Ideal day-screen	-29%	16%	40%
PE-AC, teelt 2019, 50 µm	-68%	-41%	-24%
Luxous 1147FR	-42%	0%	24%
PVDF	-46%	-5%	19%
PE-VA-AC_5, teelt 2020, 120 µm	-40%	3%	27%
<u>2 alu pp + 1147FR</u>	64%		
<u>2 alu pp + 1147FR + PE-VA</u>	68%		

3 ideale nachtschermen resulteren in een U-waarde die 77% lager is dan de U-waarde van een kas met 2 1147FR-schermen. Indien we geen rekening houden met ontvochtiging, betekent dit 75% extra energiebesparing 's nachts. In vergelijking hiermee levert een set van 2 ALU-PP, een 1147FR en een PE-VA 64% besparing op. Hieruit blijkt, er kan veel energie bespaard worden met optimalere schermen. De vraag blijft, wat is de optimale schermcombinatie?

6. Conclusies

Gedurende het GLITCH project heeft ILVO ondersteund door UGent een significant bijdrage geleverd om tot optimalere schermen te komen.

Uit dit rapport zijn de hoofdconclusies

- Een vacuumboxmeetmethode werd ontworpen en biedt de mogelijkheid van de hemisferische warmtestralingseigenschappen van schermen te bepalen.
- Een nieuw model werd ontwikkeld om het niet grijze gedrag van schermen te bepalen en mee te kunnen rekenen in de kas. Daarbij wordt straling opgesplitst in een grijs gedeelte en een niet grijs gedeelte. Dit model is nodig om de performantie van meerlagige schermen in de kas te berekenen.
- Uit de uitgevoerde meetresultaten van de warmtestralingseigenschappen komt naar voren dat huidige schermen vaak/meestal geen optimale schermeigenschappen hebben. Omdat er geen normering is, zijn de betrokken sectoren zich niet bewust van hun suboptimale prestaties. Het is dan ook belangrijk dat in de toekomst een norm voor de warmtestralingseigenschappen van schermen wordt uitgewerkt zodat de sector de verschillende producten kunnen vergelijken. Bovendien zal een dergelijke normering de concurrentie tussen schermproducenten aanwakkeren en dit komt de performante van de marktbeschikbare schermen ten goede.

7. Referenties

Lienhard, J. H., & Lienhard, J. H. (2020). *A heat transfer textbook*. New York: Dover Publications.

Bronchart F. (in preparation) Qualification and quantification of vapour transport through greenhouse screens.

Corbala, L. , Huysmans, M., Bosmans, L., Bronchart, F. (2021) Een stap dichterbij klimaatneutrale glastuinbouw: nieuwe dagschermen en een verbeterd commercieel nachtscherm in de paprikateelt GLITCH INTERREG Vlaanderen Nederland. <https://glitch-innovatie.eu/>

Corbala, L., Wittemans L., Bronchart, F. (2021) Testen van energie balancerend nachtschermstelsel in tomatenteelt. GLITCH INTERREG Vlaanderen Nederland. <https://glitch-innovatie.eu/>

Baart de la Faille, L., Campen J., Oversloot H. (2009) U-waarde kas met scherm. Meetprotocol voor schermdoeken. Rapport nr 034-DTM-2009-04659, TNO, Netherlands