

Regelbare lamelsystemen in een dubbel dek

Openbaar eindrapport

P.J. Sonneveld & G.L.A.M. Swinkels



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

Productschap  Tuinbouw
Voor een bloeiende zaak

 **DELFT PATENTS**
POWERED BY TNO

Rapport 305



Regelbare lamelsystemen in een dubbel dek

Openbaar eindrapport

P.J. Sonneveld & G.L.A.M. Swinkels

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Exemplaren van dit rapport kunnen worden gedownload vanaf de website van het Productschap Tuinbouw of bij de auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

Dit onderzoek is gefinancierd door:



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1 Inleiding	3
2 Programma van eisen	5
3 Concept	7
4 Modelberekeningen	9
4.1 Lichttransmissie	9
4.1.1 Model	9
4.1.2 Variant 1: standaard glas met aluminium folie	11
4.1.3 Variant 2: AR gecoat glas met aluminium folie	13
4.1.4 Variant 3: AR gecoat glas met multilaagsfolie	16
4.2 Warmte-isolatie	18
5 Metingen	21
5.1 Prototype	21
5.2 Lichttransmissie	23
6 Conclusies	25
Bijlage I. Symbolen lijst	1 p.

Samenvatting

Het regelen van de hoeveelheid licht wordt in de glastuinbouw steeds belangrijker. De redenen hiervoor zijn:

- Het verminderen van een teveel aan zonlicht en dan vooral het directe licht. Hierbij heeft de mate van regelbaarheid een direct invloed op de productie. Bij de teelt van potplanten worden soms tot drie soorten schermen gebruikt om een nauwkeurige lichtregeling te verkrijgen bij verschillende hoeveelheden instraling.
- Het regelen van de daglengte te voor bepaalde gewassen.
- Het verminderen van de koelbehoefte. Gedurende de zomer is de warmtetoevoer naar kassen vaak groot waardoor geventileerd of gekoeld (gesloten kassen) moet worden en de overtollige warmte i.h.a. niet nuttig gebruikt wordt.
- Beperken van de lichthinder ten gevolge van assimilatiebelichting. De voorschriften uit het Besluit Glastuinbouw worden steeds verder aangescherpt en vanaf 2014 moet zelfs een nagenoeg 100% lichtdicht scherm worden toegepast.

Voor alle genoemde redenen om het licht te regelen kan een regelbaar lamellensysteem een alternatief zijn voor de huidige systemen en zelfs voordelen bieden. Ten opzichte van schaduwschermen biedt het lamellensysteem in principe een traploze regeling waardoor meerdere scherm lagen overbodig zijn. Doordat het systeem tussen dubbelglas is gemonteerd is het ongevoelig voor vuil en vocht. Door elke kap te voorzien van een aparte voeding en de maximale stroom per voeding te begrenzen is het systeem elektrisch veilig. In het nu voorgestelde systeem worden de lamellen met elektrostatische krachten open en dicht geregeld zodat er nauwelijks bewegende delen nodig zijn.

Voor tuinbouwtoepassing is een programma van eisen opgesteld m.b.t. lichttransmissies en isolatiewaarden. Aan de hand van ray-tracing berekeningen is de lichttransmissie voorspeld bij uitvoeringen met verschillende transparante en reflecterende materialen. In totaal zijn drie uitvoeringen berekend. Wanneer standaard materialen gebruikt worden voor de lamellen, zoals standaard glas en aluminium folie, is de lichttransmissie voor direct en diffuus (hemisferisch) licht te laag voor tuinbouwtoepassingen. Uit de berekeningen blijkt dat alleen met AR gecoat glas en een multilaags-folie de voor de tuinbouw interessante specificaties bereikt worden. Het systeem biedt dan aantrekkelijke eigenschappen: een goede lichttransmissie in combinatie met een hoge isolatiewaarde. Deze informatie is gebruikt voor de vervaardiging van enkele prototypen lamellensystemen. Uit metingen en berekeningen blijkt het systeem extra warmte isolatie te geven in zowel open- gesloten stand hierdoor kunnen de energiekosten 25-35% dalen.

Een andere toepassing van het lamellensysteem is het concentreren van zonlicht. Hierbij wordt overbodige straling gereflecteerd naar een collector systeem. Hierdoor kan dit als concentratie systeem toegepast worden in de ELKAS. Experimenteel is echter gebleken dat de lamellen die gesneden zijn uit een hoogreflecterende multilaags- kunststof-folie niet strak en vlak zijn. Hierdoor treedt er in de praktijk geen goede focussering op. Daarom kan geconcludeerd worden dat op dit moment het elektrostatische lamel systeem niet geschikt is als zonneconcentrator.

Metingen aan de eerste prototypes geven waarden tussen 72-76% voor direct licht en 60-64% voor diffuus licht. Deze transmissiewaarden zijn voor tuinbouwtoepassingen in het koude seizoen aan de lage kant. Voor korte en bewolkte dagen in het koude seizoen zal zelfs voor potplanten een hogere lichttransmissie beter voldoen. Anderzijds zal de lichttransmissie aanzienlijk beter zijn dan van het lamellen systeem van de ZonWindKas (transmissie voor diffuus licht ca. 38% in open stand). Een aangepast ontwerp resulteert in een transmissie van 85% voor direct- en 74% voor diffuus licht. De elektrostatische kracht bij dit ontwerp bleek echter onvoldoende. De eerder genoemde transmissiewaarden zijn voor tuinbouw toepassingen meestal te laag. In gesloten stand zijn de lichttransmissie waarden nog te hoog voor de nieuwe normen van lichtafscherming voor assimilatie belichting (98% reductie).

Voor niet-tuinbouw toepassingen heeft het systeem goede potenties. De meetresultaten zijn lager dan de berekende waarden. In de praktijk blijkt dat voor de onder- en boven afdekmaterialen evenals voor het lamelmateriaal elektrisch geleidende coating gebruikt moeten worden. Door deze coatings verminderen de hoge reflecties en daarmee de lichttransmissie van het systeem. Door deze genoemde knelpunten zijn de best praktisch haalbare lichttransmissies lager.

1 Inleiding

In de glastuinbouw wordt het regelen van de hoeveelheid licht steeds belangrijker. De redenen hiervoor zijn verschillend van aard. Ten eerste geldt voor een aantal gewassen, voornamelijk potplanten, dat deze een lage lichtbehoefte hebben. Te hoge lichtintensiteiten, vooral van direct zonlicht, kan bij deze gewassen schade veroorzaken. De huidige praktijk biedt twee mogelijkheden om de intensiteit te verlagen. Een relatief eenvoudige manier is om gedurende de zomerperiode een vaste krijtlaag op het dek aan te brengen worden. Deze krijtlaag reduceert de straling dan met een vaste factor. Door een schaduwsschermen aan te brengen kan het lichtniveau wel geregeld worden. Schaduwsschermen bestaan uit materialen die het zonlicht beperkt doorlaten, absorberen of reflecteren. In tegenstelling tot krijten kan een scherm in donkere uren, als licht een beperkende factor op de groei is, geopend worden zodat de planten meer licht krijgen. Met meerdere schermen kan de reductiefactor in verschillende trappen geregeld worden. Hierbij geldt, hoe meer schermen hoe beter de regeling. De huidige trend laat zien dat per bedrijf steeds meer schermen geïnstalleerd worden.

Een andere reden om het licht te regelen komt voort om voor bepaalde gewassen de daglengte te kunnen regelen. Bij een kortedag-plant als de chrysant worden 's zomers verduisterd en 's winters belicht om jaarrond te kunnen produceren. Dergelijke schermen zijn vaak wit of gealuminiseerd aan de dekszijde om invallend licht te reflecteren en zwart aan de gewaskant. Schermen voor een korte dag brengt op warme dagen met veel instraling problemen met zich mee zoals een hoge kasluchttemperatuur.

Nog een reden om het zonlicht te regelen is het verminderen van de koelbehoefte van kassen, enerzijds door natuurlijke ventilatie, anderzijds door een actieve koeling bij (semi) gesloten kassen. In het eerste geval kunnen dan de ramen meer gesloten blijven wat een hogere CO₂-concentratie en daarmee een hogere productie tot gevolg kan hebben.

Een laatste reden die echter steeds belangrijker wordt, is het beperken van de lichthinder als gevolg van assimilatiebelichting. In de intensieve glastuinbouw wordt de laatste jaren steeds meer belicht. Belichten is voor tuinders vaak noodzaak om jaarrond te kunnen telen en de producten aan de markt aan te kunnen bieden. Van boven zijn belichte kassen goed zichtbaar als grote, lichtuitstralende oppervlakten. De lichtintensiteit is relatief hoog en het licht-spectrum omvat de meest gevoelige golflengtes voor het menselijke oog. De assimilatiebelichting brandt gemiddeld tot 3000 uur per jaar, waarvan 80% 'als het buiten donker is. Voor omwonenden en omgevende flora en fauna is de lichtuitstoot uit kassen ongewenst. Om deze reden zijn in het Besluit Glastuinbouw voorschriften opgenomen om lichthinder door assimilatieverlichting te beperken. Deze voorschriften worden steeds verder aangescherpt en vanaf 2014 moet zelfs een nagenoeg 100% lichtdicht scherm worden toegepast.

Voor alle genoemde redenen om het licht te regelen kan een regelbaar lamellensysteem een alternatief zijn voor de huidige systemen en zelfs voordelen bieden. Ten opzichte van schaduwsschermen biedt het lamellensysteem in principe een traploze regeling waardoor meerdere scherm lagen overbodig zijn. Doordat het systeem tussen dubbelglas is gemonteerd is het ongevoelig voor vuil en vocht.

In het nu voorgestelde systeem worden de lamellen met elektrostatische krachten open- en dicht geregeld zodat er nauwelijks bewegende delen nodig zijn. Het elektrostatisch lamellen systeem is een uitvinding van Jacques Ruiter en Delft Patents BV uit Delft is als exclusieve partner betrokken bij de exploitatie van dit systeem.

In hoofdstuk 2 is een programma van eisen opgesteld m.b.t. lichttransmissies en isolatiewaarden. Het basisconcept voor het lamellensysteem is beschreven in hoofdstuk 3. Op basis hiervan zijn bij toepassingen van verschillende transparante en reflecterende materialen berekeningen gedaan aan lichttransmissie en warmte-isolatie welke gepresenteerd worden in hoofdstuk 4. Deze informatie is gebruikt voor de vervaardiging van enkele prototypen lamellensystemen. De berekeningen zijn geverifieerd met metingen, gepresenteerd in hoofdstuk 5. In het hoofdstuk voor de conclusies is tenslotte een lamellensysteem beschreven dat als een concentrator van direct licht functioneert. Op deze manier kan de overbodige straling gereflecteerd worden waardoor het systeem als concentratiesysteem in de ELKAS gebruikt zou kunnen worden.

2 Programma van eisen

De hoofddoelstellingen van een lamellensysteem voor de glastuinbouw zijn:

- Weren van direct licht en het regelen van het totaal aan licht in de kas.
- Regelen van de daglengte.
- Het verminderen van de koelbehoefte.
- Beperken van de lichthinder ten gevolge van assimilatiebelichting.

De neven-doelstellingen zijn:

- Economische verantwoord systeem.
- Duurzaam systeem met lange levensduur.

Met betrekking tot de eisen van duurzaamheid is van belang: lange termijn bestendigheid tegen UV-straling en vocht en lange levensduur van bedrading en scharnierconstructie. Voor een economisch verantwoord systeem is de mogelijkheid tot serieproductie belangrijk. De uitdaging is een regelbaar systeem te ontwerpen met een hoge lichttransmissie in open toestand en hoge warmte isolerende eigenschappen in gesloten toestand.

Bij het programma van eisen voor toepassing van het concept in de glastuinbouw is er van uitgegaan dat de maximale lichttransmissie (lamellen geheel open) vergelijkbaar moet zijn met enkel glas. Dit geldt in het bijzonder voor diffuus (hemisferisch) invallend licht omdat bij bewolkt weer een belangrijke groeibeperkende factor is. Wat betreft warmte-isolatie moet deze minimaal vergelijkbaar zijn met gangbare dubbellaags kasdekmaterialen zoals kanaalplaten en dubbel glas. In Tabel 1 is het programma van eisen weergegeven waaraan het lamellensysteem moet voldoen.

Tabel 1. *Programma van eisen lamellen voor de glastuinbouw.*

Onderdeel	Gewenste waarde
lichttransmissie direct	80-90%*
lichttransmissie diffuus	75-83%*
UV bestendigheid	15 jaar
vochtbestendigheid	15 jaar
Levensduur scharnier	15 jaar
Warmte-isolatie	6W/m ² K
Elektrisch (Hoogspanning)	Veilig systeem
Onafhankelijke scharnieren	Alleen nodig voor Elkas principe

* *De hier opgesteld eisen met betrekking tot lichttransmissie zijn hoog voor een dubbelwandig systeem. De genoemde maximale waarden zijn gelijk aan enkel glas. Voor sommige teelten (vnl. potplanten) worden kanaalplaten gebruikt met lagere specificaties. Daarom is in de vermelde waardes een range aangegeven.*

3 Concept

Een lamellensysteem bestaat uit scharnierende lamellen die tussen twee afdekkingmaterialen geplaatst zijn en waarbij de stand van de lamellen regelbaar is van evenwijdig met het afdekkingmateriaal (dicht systeem) naar loodrecht op het afdekkingmateriaal (open systeem). Het prototype lamellensysteem dat voor dit project vervaardigd is is uitgevoerd met een scharnierend folie van ca. 10 micron dik dat elektrisch geleidend gemaakt is door middel van een coating van geleidend polymeer waarop het lamel is gemonteerd. Als afdekkingmateriaal is glas gebruikt. Figuur 1 toont het systeem in open en gesloten stand.



Figuur 1. Het lamellensysteem in open (links) en gesloten stand.

Voor het materiaal waaruit een lamel bestaat zijn verschillende mogelijkheden beschikbaar. Enkele voorbeelden zijn: aluminium folie, kunststof folie met een aluminium coating en wel of niet golflengte selectieve multilagen. Met multilagen zijn over een bepaald gebied zeer hoge reflectie waarden te bereiken (tot 99%). Lamellen op basis van aluminium hebben een reflectie van ca. 90%.

Voor het openen en sluiten van het lamellensysteem is gekozen voor een elektrostatisch principe met als doel het aantal bewegende delen te beperken. De krachtwerking is gebaseerd op de wet van coulomb; $F=Q.E$ waarbij Q de lading is en E het elektrisch veld. De krachtwerking kan worden gebaseerd op afstoting (bij lading van hetzelfde teken) of op aantrekking (lading van lamel en raam verschillend teken). De hiervoor benodigde spanning is ca. 10 kilovolt DC. Deze spanning kan ter plaatse opgewekt worden met een omvormer die werkt met een ingangsspanning van 24 volt. Door de uitgangsstroom per unit te begrenzen op ca. max. 1 milliampère is het systeem inherent veilig.

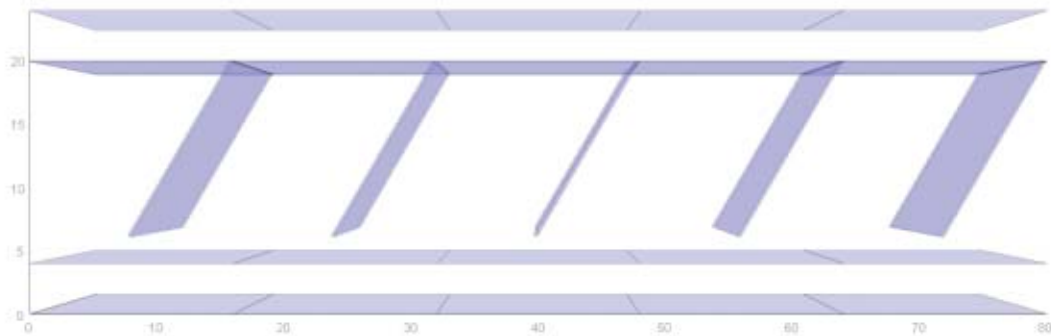
4 Modelberekeningen

4.1 Lichttransmissie

4.1.1 Model

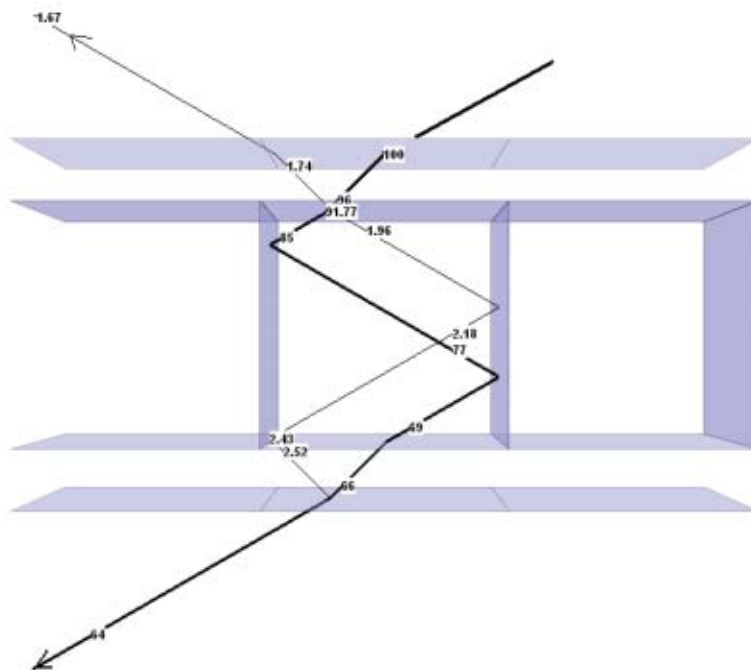
De transmissieberekeningen zijn gebaseerd op ray-tracing, een methode waarmee lichtstralen door een object heen gevolgd worden. Een lichtbundel wordt gemodelleerd als een groot aantal lichtstralen met dezelfde invalshoek, diffuus licht als een groot aantal lichtstralen onder alle voorkomende invalshoeken. De interactie van de lichtstraal met het object wordt bepaald op basis van optische eigenschappen van het materiaal en optische wetten. Zo wordt rekening gehouden met de lichtbreking, -absorptie en doorlatendheid van het object.

Voor de berekeningen is het model Raypro gebruikt. Dit model is door Wageningen UR Glastuinbouw speciaal ontwikkeld voor het berekenen van de lichttransmissie van kasdekmaterialen. In Figuur 2 is het lamellensysteem weergegeven zoals dit met Raypro gemodelleerd is.



Figuur 2. Het lamellensysteem zoals dit in Raypro gemodelleerd is. In de figuur zijn de overgangen tussen de verschillende materialen (zoals glas en lucht) als vlakken weergegeven. Zo bestaat de bovenste glasplaat uit 2 vlakken, namelijk lucht-glas en glas-lucht. Hoewel in de figuur slechts 5 lamellen afgebeeld zijn rekent Raypro met een oneindig aantal lamellen, dus met een oneindig breed lamellensysteem zodat randeffecten uitgesloten worden.

Het berekenen van de lichttransmissie-, reflectie en absorptie gebeurt door het inbrengen van lichtstralen onder een bepaalde hoek bovenop het lamellensysteem. Voor loodrecht invallend licht gebeurt dit onder 90° met het afdek materiaal, voor diffuus licht onder hoeken die in diffuus licht voorkomen. Hierbij wordt rekening gehouden met het feit dat licht uit bepaalde hoeken meer energie bevatten dan andere. Voor diffuus licht geldt dat de meeste energie zich rond 45° bevindt. In Figuur 3 is een screenshot te zien van de stralengang tijdens het ray-tracing proces.

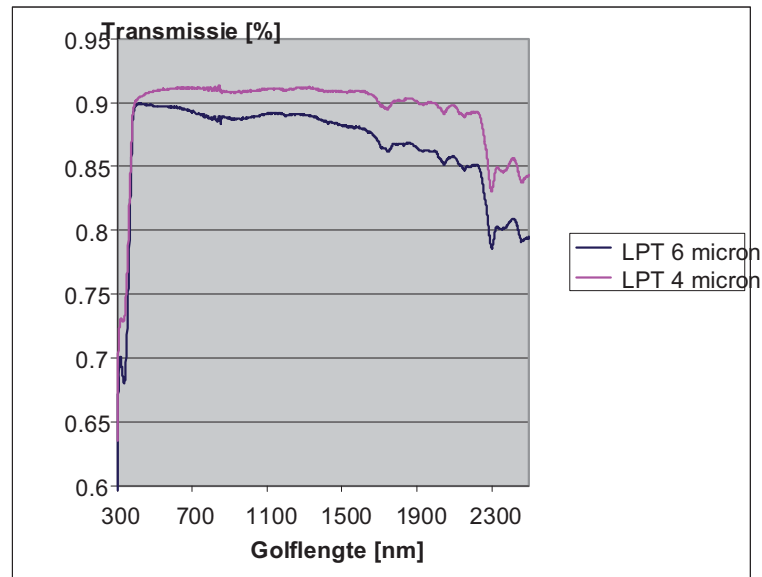


Figuur 3. Screenshot van de stralengang van de belangrijkste lichtstralen tijdens het ray-tracing proces. Als gevolg van overgangen tussen de verschillende materialen onderling en lucht treden meervoudige reflecties op.

Na het uitputtend volgen van alle lichtstralen wordt de lichttransmissie uiteindelijk berekend als de totale hoeveelheid energie van de lichtstralen die aan de onderkant uit het systeem uit treden gedeeld door de totale energie van de ingebrachte lichtstralen.

Het systeem moet een zo hoog mogelijke lichttransmissie in open toestand halen en een zo hoog mogelijke reflectie in gesloten toestand. Dit kan gerealiseerd worden met lamellen van een lichtdicht en hoog-reflecterend materiaal. In het ideale geval zullen de lamellen in open toestand ten gevolge van meervoudige reflecties al het inkomende licht doorreflecteren naar beneden, zoals in Figuur 3 te zien is. De reflecties die nog wel optreden zijn dan enkel een gevolg van het afdekkingsmateriaal, dat een zo laag mogelijke reflectie en hoog mogelijke transmissie dient te hebben. Ideaal hiervoor zijn glassoorten met hoge lichttransmissies (zoals AR gecoat glas). De potentiële factoren voor lichtverlies liggen bij de geleidend gemaakte scharnierfolie en verstrooiing en absorptie door ten gevolge van niet optimale reflectiewaarden van de lamellen. Hierdoor zijn materialen met een lage reflectiecoëfficiënt niet bruikbaar voor de lamellen. Ook glassoorten met lagere transmissiewaarden vallen af.

De lichttransmissie van de elektrisch geleidende coating is gemeten met de Perkin Elmer fotospectrometer. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Gemeten Lichttransmissie van elektrisch geleidend TPU folie.

Voor de zgn. scharnierfolie is een zeer dunne TPU folie gebruikt die elektrisch geleidend gemaakt is. Deze folie wordt ook op de lamellen aangebracht om deze elektrisch geleidend te maken. De TPU folie is geleidend gemaakt met een geleidend polymeer van 4 micron dik (LPT 4) of 6 micron dik (LPT 6). Dit geleidend TPU was het enige materiaal waarvan de transmissie niet bekend was en is daarom gemeten. De resultaten hiervan zijn gebruikt in de ray-tracing berekeningen.

In de volgende paragrafen wordt voor een aantal varianten de lichttransmissie van het totale schermstelsel berekend.

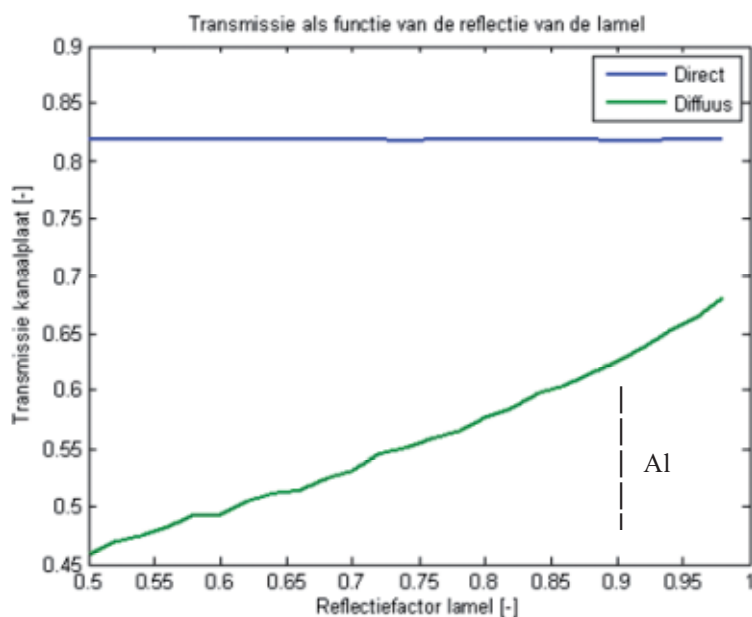
4.1.2 Variant 1: standaard glas met aluminium folie

In het eenvoudigste geval wordt uitgegaan van standaard glas met aluminium lamellen. De details van de materialen die bij de berekeningen gebruikt zijn, zijn in Tabel 2 weergegeven.

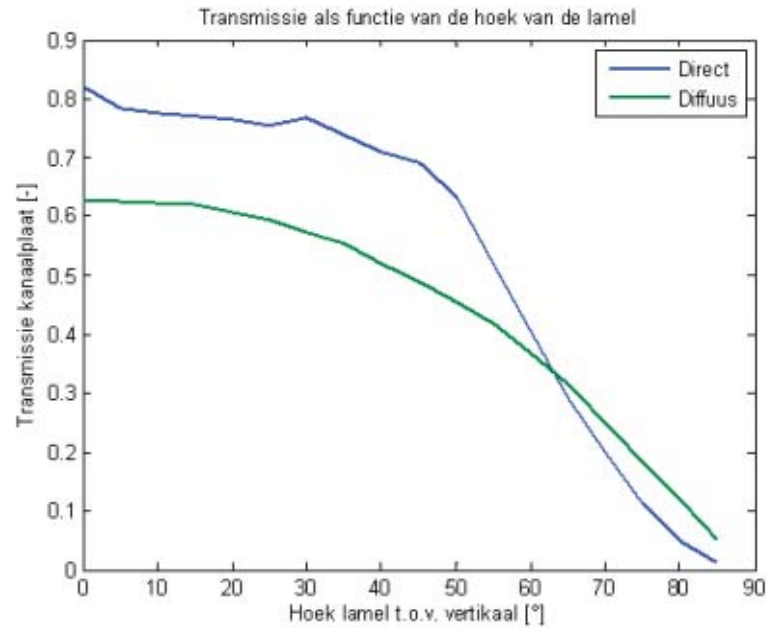
Tabel 2. Fysische eigenschappen van de materialen van een lamellensysteem van standaard glas met aluminium folie lamellen.

Onderdeel	
Standaard Glas	
Dikte	4 mm
Brekingindex	1.5
Absorptiecoëfficiënt	5
Folie	
Dikte	0.02 mm
Transmissie	0.9093
Brekingindex (uitgerekend)	1.55
Lamel	
Hoogte	16 mm
Transmissie	0.00
Reflectie	0.5 – 0.98
Absorptie	1 – reflectie
Hoek t.o.v. vertikaal	0°

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 5 en Figuur 6. In Figuur 5 is de lichttransmissie weergegeven als functie van de reflectiecoëfficiënt van de lamel bij volledig geopende lamel. Voor loodrecht invallend licht, in de figuur direct licht genoemd (blauwe lijn), is de transmissie van 82% onafhankelijk van de reflectiecoëfficiënt. Dit komt omdat loodrecht invallend licht de lamellen alleen op de bovenkant raakt. De transmissie voor hemisferisch (diffuus) opvallend licht neemt bijna lineair toe met de reflectiecoëfficiënt van de lamel. De maximale waarde is ca. 67% wat laag is voor tuinbouwtoepassingen.



Figuur 5. Transmissie als functie van de reflectiefactor van de lamel bij geheel geopende lamellen. De lamel is geplaatst tussen 2 lagen standaard glas en de geleidende folie is LPT 4 micron. De blauwe lijn is direct opvallend licht en de groene lijn is diffuus opvallend licht.



Figuur 6. Transmissie als functie van de hoek van de lamel. De lamel is geplaatst tussen 2 lagen standaard glas en de geleidende folie is LPT 4 micron. De reflectie van de lamel is 90%. De blauwe lijn is direct opvallend licht en de groene lijn is diffuus opvallend licht.

In Figuur 6 is de lichttransmissie weergegeven als een functie van de hoek van de lamel. De transmissie als functie van de hoek van de lamel voor direct licht (blauwe lijn) en diffuus licht (groen lijn) vertonen een gelijke trend. Alleen de absolute waarde voor direct licht (maximum 82%) is hoger dan bij diffuus licht (maximum 62%). Deze waarden zijn te laag voor tuinbouw toepassingen.

4.1.3 Variant 2: AR gecoat glas met aluminium folie

Voor deze variant wordt uitgegaan van AR gecoat glas met aluminium lamellen. Het AR gecoat glas zal de transmissie van het systeem aanzienlijk verhogen. De exacte waarde van de lichttransmissie van het AR gecoat glas is 97,2%. Deze hoge transmissies zijn recent gemeten aan microstructuur gecoat glas van Sunarc. De resultaten zijn gepubliceerd in "Antireflectie coating voor tuinbouwglas eerste praktijkervaringen; Rapport 130 Wageningen UR glastuinbouw, december 2006". De fysische eigenschappen van de materialen die bij de berekeningen gebruikt zijn, zijn in Tabel 3 weergegeven.

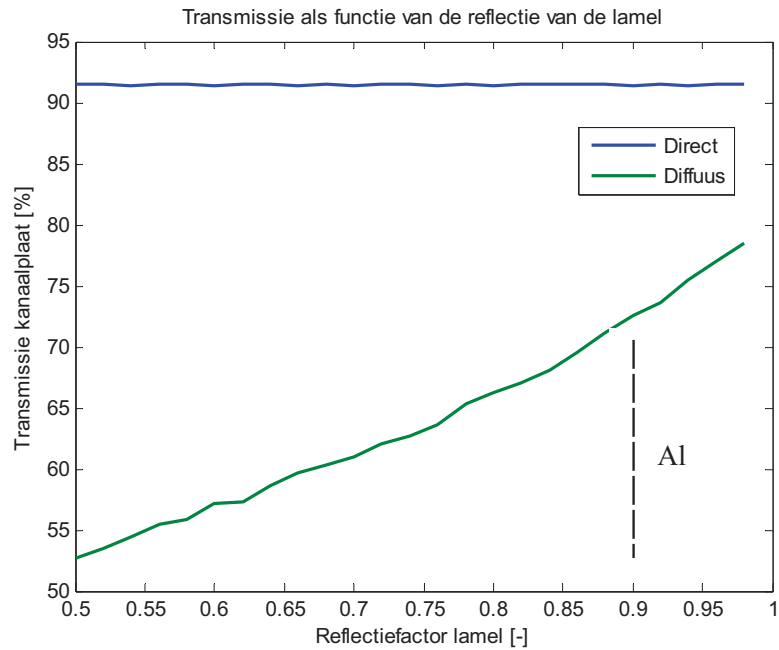
Tabel 3. *Fysische eigenschappen van de materialen bij een lamellensysteem van AR gecoat glas met aluminium folie lamellen.*

Onderdeel	
AR coated Glas	
Dikte	4 mm
Brekingindex	1.223 (behorend bij een loodrechte transmissie van 98%)
Absorptiecoëfficiënt	0
Folie	
Dikte	0.02 mm
Transmissie	0.9093
Brekingindex (uitgerekend)	1.55
Lamel	
Hoogte	16 mm
Transmissie	0.00
Reflectie	0.5 – 0.9
Absorptie	1 – reflectie
Hoek t.o.v. vertikaal	0°

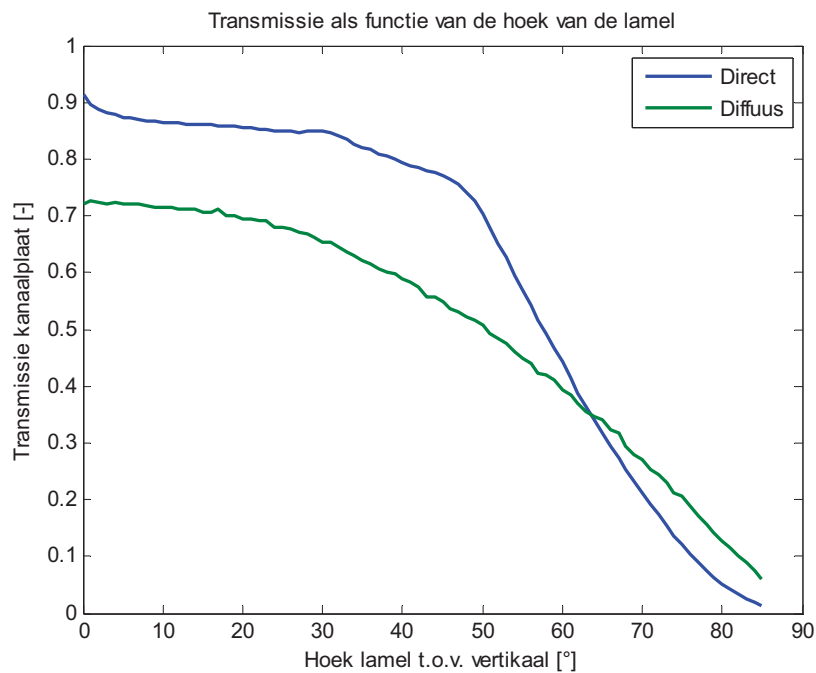
De berekeningen zijn gebaseerd op een dubbellaags AR-glasplaat met een transmissie van 98% loodrecht met tegen de bovenzijde van de spouw een 0.02 mm dikke folie met daaraan een lamel bevestigd. De brekingindices van het glas en de folie zijn uitgerekend op basis van een lichttransmissie van 98% bij een absorptie van nul.

Hoewel het licht onder een variabele hoek over de dag op het kasdek staat is de lichttransmissie tot een invalshoek van ca. 50-60° nagenoeg gelijk aan die bij loodrechte inval. Dus onder meeste praktische omstandigheden met direct opvallende straling blijft deze waarde gelden. De resultaten van de ray-tracing berekeningen zijn weergegeven in Figuur 7 en Figuur 8. In Figuur 7 is de lichttransmissie weergegeven als een functie van de reflectiecoëfficiënt van de lamel bij volledig geopende lamellen. Voor direct licht (blauwe lijn) is de transmissie onafhankelijk van de reflectiecoëfficiënt met een waarde van 92%. De transmissie voor diffuus opvallend licht neemt bijna lineair toe met de reflectiecoëfficiënt van de lamel. De maximale waarde hiervan is ca. 72% (bij een reflectie coëfficiënt van 90% van de lamel). Wat laag is voor tuinbouwtoepassingen.

In Figuur 8 is de lichttransmissie weergegeven als een functie van de hoek van de lamel. De transmissie voor direct licht (blauwe lijn) en diffuus licht (groen lijn) hebben bijna hetzelfde verloop als functie van de hoek van de lamel. Alleen de absolute waarde voor direct licht (maximum 92%) is hogere dan bij diffuus licht (maximum 72%). Deze waarden zijn te laag voor tuinbouwtoepassingen. De invloed van condensatie is hierbij niet meegenomen. De verwachting is echter dat bij volledige condensatie op het AR gecoat glas de transmissie voor 50% (alleen condensatie op de buitenzijden) richting de transmissie van ongecoat standaard glas gaat (Tabel 2).



Figuur 7. Transmissie als functie van de reflectie van de lamel (lamellen geheel open). De lamel is geplaatst tussen AR gecoat glas en de geleidende folie is LPT 4 micron. De blauwe lijn is direct opvallend licht en de groene lijn is diffuus opvallend licht.



Figuur 8. Transmissie als functie van de hoek van de lamel. De lamel is geplaatst tussen AR gecoat glas en de geleidende folie is LPT 4 micron. De reflectie van de lamel is 90%. De blauwe lijn is direct opvallend licht en de groene lijn is diffuus opvallend licht.

4.1.4 Variant 3: AR gecoat glas met multilaagsfolie

Voor deze variant wordt uitgegaan van AR gecoat glas en lamellen van een multilaags folie. Voor ijzervrij glas is de absorptie coëfficiënt zeer laag en is in Tabel 4 nul verondersteld. De reflectie van de multilaagsfolie is 99% (literatuurwaarde). Met deze combinatie wordt verwacht dat de transmissie van het systeem maximaal is. De details van de materialen die bij de berekeningen gebruikt zijn, zijn in Tabel 4 weergegeven.

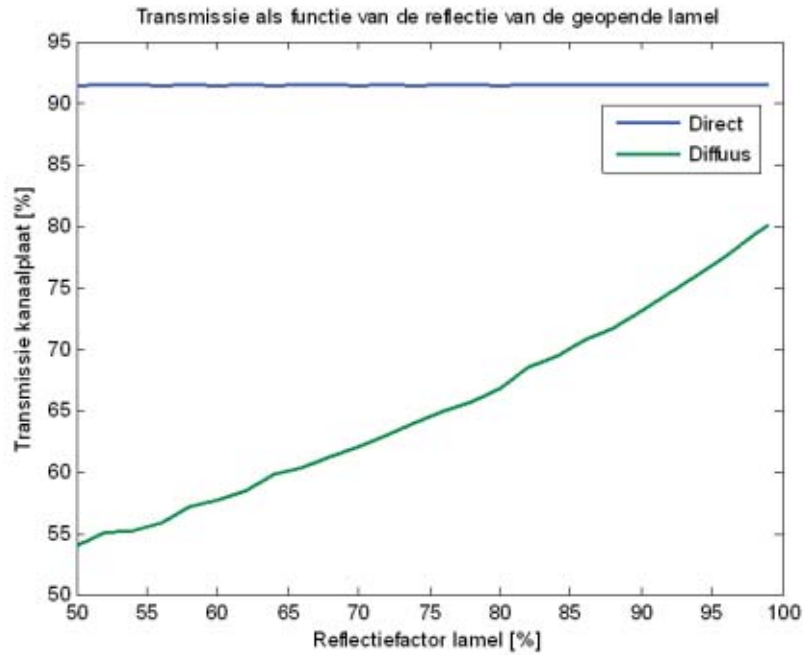
Tabel 4. *Fysische eigenschappen van de materialen van een lamellensysteem van AR gecoat glas met multilaags folie.*

Onderdeel	
AR coated Glas	
Dikte	4 mm
Brekingindex	1.223 (behorend bij een loodrechte transmissie van 98%)
Absorptiecoëfficiënt	0
Folie	
Dikte	0.02 mm
Transmissie	0.99
Brekingindex (uitgerekend)	Ca. 1.15
Lamel	
Hoogte	16 mm
Transmissie	0.00
Reflectie	0.5 – 0.9
Absorptie	1 – reflectie
Hoek t.o.v. vertikaal	0°

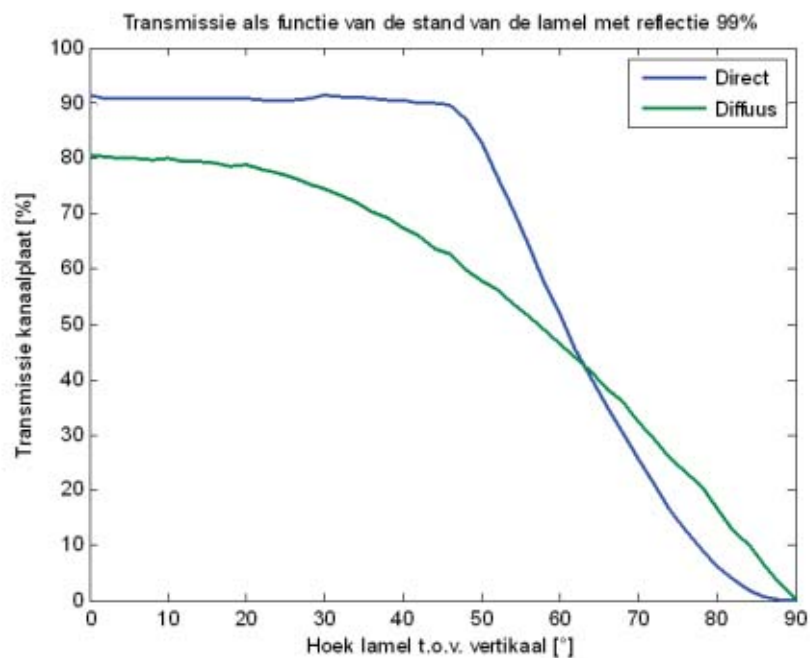
Onderstaande resultaten gelden voor een dubbellaags AR-glasplaat met een transmissie van 98% loodrecht met tegen de bovenzijde van de spouw een 0.02 mm dikke folie met daaraan een lamel bevestigd. Op basis van de 98% is voor de glasplaat de brekingindex uitgerekend bij een absorptie van nul. O.b.v. de gemeten transmissie van de folie is de bijbehorende brekingindex uitgerekend bij een absorptie van nul.

De resultaten van de ray-tracing berekeningen zijn weergegeven in Figuur 9 en Figuur 10. In Figuur 9 is de lichttransmissie weergegeven als een functie van de reflectiecoëfficiënt van de lamel. Ook hier is voor direct licht (blauwe lijn) de transmissie van 92% onafhankelijk van de reflectiecoëfficiënt van de lamel. De transmissie voor diffuus opvallend licht neemt bijna lineair toe met de reflectiecoëfficiënt van de lamel. De maximale waarde hiervan is ca. 80% (bij een reflectiecoëfficiënt van 99% van de lamel) wat goed is voor tuinbouw toepassingen.

In Figuur 10 is de lichttransmissie weergegeven als een functie van de hoek van de lamel bij volledig geopende lamellen. De transmissie voor direct licht (blauwe lijn) en diffuus licht (groen lijn) hebben bijna hetzelfde verloop als functie van de hoek van de lamel. Alleen de absolute waarde voor direct licht (maximum 92%) is hogere dan bij diffuus licht (maximum 80%). Deze waarden zijn beide goed voor tuinbouw toepassingen. De lagere lichttransmissie van 92% t.o.v. de hoge transmissie van het AR-gecoat glas (ca. 95% voor dubbelglas) ontstaat voornamelijk door het lichtverlies van de elektrisch geleidende laag (ITO).



Figuur 9. Transmissie als functie van de reflectie van de lamel (lamellen geheel open). De lamel is geplaatst tussen 2 lagen AR gecoat glas en de geleidende folie is LPT 4 micron. De blauwe lijn is direct opvallend licht en de groene lijn is diffuus opvallend licht.



Figuur 10. Transmissie als functie van de hoek van de lamel. De lamel is geplaatst tussen AR gecoat glas en de geleidende folie is LPT 4 micron. De reflectie van de lamel is 99% (3M multilaagfolie).

4.2 Warmte-isolatie

De warmte-isolatie is bepaald volgens NEN 2697 (NEN 2697, 1e druk, oktober 1995). Deze norm geeft een berekeningsmethode voor de warmtedoorgangscoefficiënt (U) van enkele glasplaten en van isolerend dubbelglas, die beide in de tuinbouw worden gebruikt. Om productvergelijking mogelijk te maken zijn in onderstaande tabel de omstandigheden waarbij de warmtedoorgangscoefficiënt van de ruit moet worden bepaald beschreven:

Tabel 5. Omstandigheden voor de bepaling van de warmtedoorgangscoefficiënt.

de luchttemperatuur in de kas:	15°C
de luchttemperatuur buiten:	4°C
de temperatuur van gewas en/of bodem:	15°C
de stralingstemperatuur van de hemel:	-1°C
de ventilatiehoeveelheid:	0.278 e-3 m ³ /(m ² s)
de relatieve luchtvochtigheid buiten:	90%
de hellingshoek van het kasdek:	26°
de verdamping van het gewas en/of bodem:	3700 W/m ² *)

*) De verdamping van het gewas die in deze norm wordt aangegeven is onrealistisch hoog. Het is niet bekend hoe deze waarde is vastgesteld. Duidelijk is dat deze verdamping in Nederland nooit voor kan komen omdat er maximaal 1000 W/m² aan warmte in een kas kan worden gebracht. Om deze reden en het feit dat de condensatieformule gebaseerd is op een verdampingsfactor die in de norm niet helder wordt gedefinieerd, is de condensatie niet meegenomen. Verder is aangenomen dat het lamellen systeem luchtdicht afgesloten is zodat in het systeem geen condensatie optreedt.

Het lamellenmateriaal is zo dun dat het temperatuurverschil loodrecht op de lamellen nihil is.

De warmte-uitwisseling vindt op drie manieren plaats:

- Via convectie.
- Via geleiding. De geleiding door het glas en de lamellen wordt meegenomen. De geleiding in de lucht is wel aanwezig maar zal gering zijn bij de convectie.
- Door straling. Via infrarood straling wordt er warmte uitgewisseld tussen het glas en de omgeving.

In de NEN norm zijn deze verschillende manieren van warmtetransport beschreven met formules. De formules beschrijven het warmtetransport tussen twee parallelle platen die op een kleine afstand van elkaar liggen.

De warmteoverdracht aan de buitenkant van de kas, boven de glasplaat wordt in de norm gegeven door:

$$q_{e,c} = C_{e,c} (\theta_{e,o} - \theta_e)$$

waarin:

$q_{e,c}$	de warmteoverdracht aan het buitenoppervlak door convectie in W/m ²
$\theta_{e,o}$	de temperatuur van het buitenoppervlak, in °C
θ_e	de temperatuur van de buitenlucht, in °C
$C_{e,c}$	een constante, experimenteel bepaald; $C_{e,c} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$

De warmteoverdracht door convectie aan het binnenoppervlak wordt in de norm met de volgende formule beschreven:

$$q_{i,c} = c_{i,c} \sqrt[3]{[\theta_i - \theta_{i,o}]^4} \quad (4.1)$$

Waarin:

$c_{l,c}$ een constante, experimenteel bepaald; $3 \text{ W/m}^2\text{K}^{4/3}$

Deze vergelijking wordt in deze berekening ook gebruikt.

De glasplaat heeft een warmtegeleidingcoëfficiënt van 1 W/mK en is 4 mm dik. De emissiecoëfficiënt van glas is 0.84 . De emissiecoëfficiënt van de vloer is 1 . De transmissie van infrarode straling (IR) wordt niet meegenomen omdat glas geen IR doorlaat. De temperatuur van beide glasplaten met en zonder lamel wordt berekend evenals de luchttemperatuur tussen de twee glasplaten. Deze berekening gebeurt iteratief waarbij de fluxen tussen de verschillende onderdelen steeds opnieuw worden berekend en daarmee de nieuwe temperaturen van de platen en de tussenliggende lucht. De iteratie stopt wanneer de temperaturen constant blijven. De berekening is uitgevoerd op basis van onderstaande eigenschappen van de folie waarvan de lamellen zijn gemaakt. In Tabel 6 is een overzicht weergegeven van de reflectie, transmissie en de absorptie van de LPT folie.

Tabel 6. Gemeten en berekende waarden van de reflectie, transmissie en de absorptie van LPT folie.

Gemiddelde waarde (2,5 -2500 μm) (Max Planck gewogen)			
Materiaal	Reflectie	Transmissie	Absorptie
Bayer Epurex LPT 4micron	0.05	0.45	0.50
Bayer Epurex LPT 6micron	0.03	0.43	0.54
Combinatie lamel en glas	0.23	0	0.77

In Tabel 7 zijn de berekende U-waarden te zien voor verschillende configuraties.

Tabel 7. Berekening U-waarden voor de verschillende combinaties.

No.	Materiaal	U waarde [$\text{W/m}^2\text{K}$]
1.	Enkel glas	7.07
2.	Dubbel glas	3.28
3.	Lamel 4 micron	2.93
4.	Lamel 6 micron	2.87
5.	Lamel en glas	3.21

Voor het geval dat de lamellen open staan wordt de U-waarde gelijk aan de waarde onder nummer 3 in 0. Dit omdat de emissiecoëfficiënt van het scharniermateriaal dan bepalend is voor de emissiecoëfficiënt. In gesloten toestand is de U-waarde gelijk aan de onder nummer 2 genoemde waarde. Uit de berekeningen volgt dus een U-waarde die weinig verandert in open- en dicht stand van de lamel. Dit is het geval omdat voor de lamellen een polymeer gebruikt wordt met een hoge emissiecoëfficiënt.

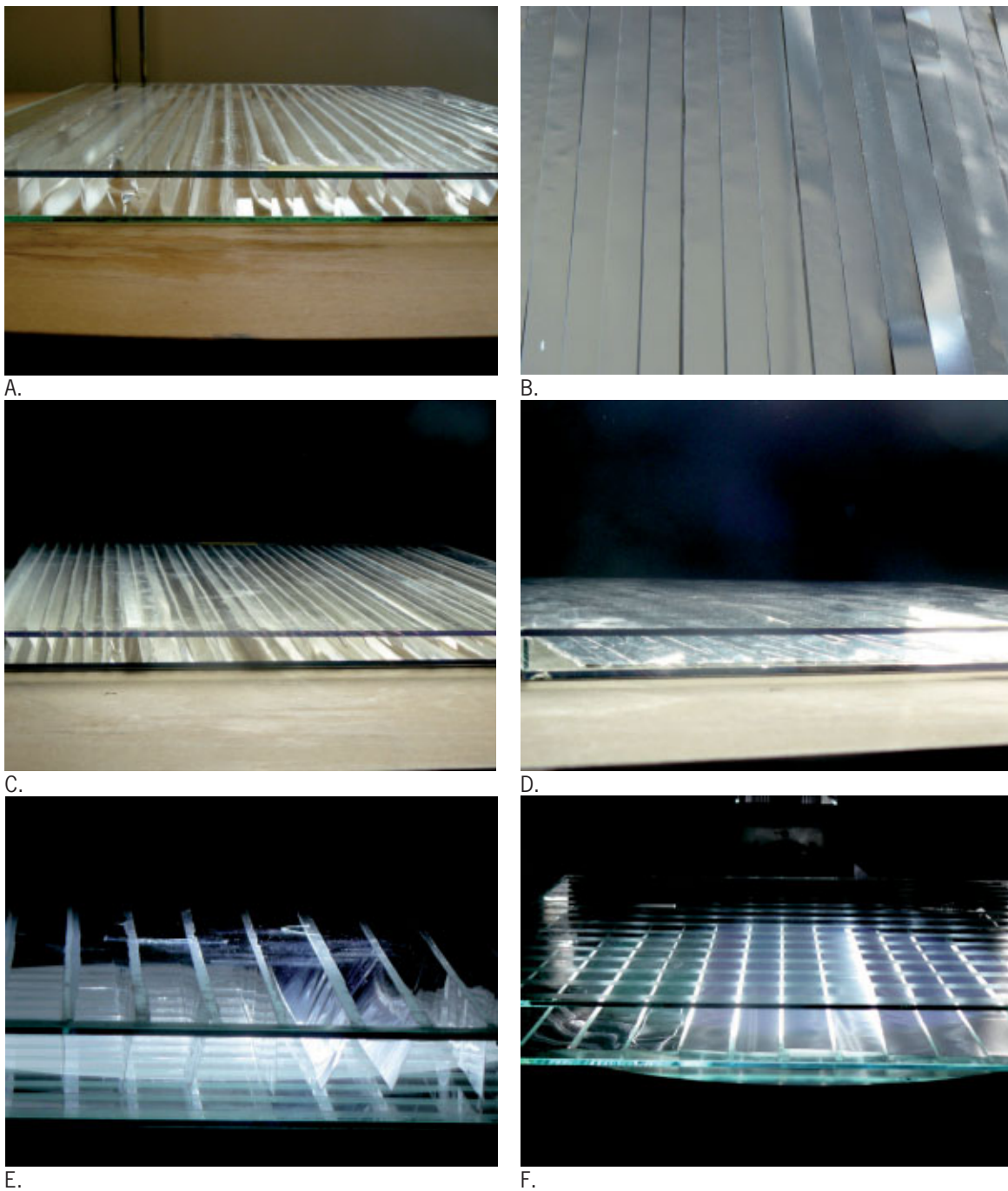
5 Metingen

5.1 Prototype

Op basis van lamellen van multilaags 3M folie zijn een aantal prototypes vervaardigd met een afmetingen van 500x500 mm. Een overzicht van de gebruikte materialen en afmetingen is weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8. Afmetingen en samenstelling van drie prototypen lamellensysteem.

Nr.	Lamellen-systeem	Hoogte [mm]	Lamelbreedte [mm]	Onderglas	Bovenglas
1.	Prototype	16	12	GroGlass™ met TCO laag	GroGlass™ met TCO laag
2.	Demomodel	16	12	GroGlass™ met TCO laag	GroGlass™ met TCO laag
3.	Nieuw ontwerp	35	30	GroGlass™ AR met 5mm stroken geleidend polymeer	GroGlass™ AR met 12mm stroken geleidend polymeer



Figuur 11. A. Foto zijaanzicht van het prototype lamellensysteem; B. Foto bovenaanzicht van het prototype lamellensysteem in gesloten toestand; C. Demomodel lamellensysteem in open positie; D. Demomodel lamellensysteem in gesloten positie; E. Nieuw ontwerp lamellensysteem in open positie; F. Nieuw ontwerp lamellensysteem in gesloten positie.

5.2 Lichttransmissie

Met de lichtmeetapparatuur van Wageningen UR Glastuinbouw is de lichttransmissie van de lamellensystemen in open- en dichtstand gemeten. De waarden voor diffuus (hemisferisch) licht zijn bepaald op basis van metingen onder een invalshoek van 0, 15, 30, 45, 60 en 75° en zowel dwars als parallel aan de lamelrichting gemeten (gemiddelde waarde). De meetresultaten zijn in Tabel 9 weergegeven.

Tabel 9. Lichttransmissies van drie lamellensystemen volgens NEN 2675.

Nr.	Lamellensysteem	Lichttransmissie [%]			
		Open stand		Gesloten stand	
		direct	diffuus	direct	diffuus
1.	Prototype	76,1	60,0	2,5	3,0
2.	Demomodel	72,3	64,3	4,5	4,4
3.	Nieuw ontwerp	85,2	74,0	8,0	10,2

Uit de resultaten van Tabel 9 blijkt dat de lichttransmissies van de drie lamellensystemen lager zijn dan met de modelberekeningen voorspeld was. Deze verschillen zijn te verklaren doordat de glasplaten aan de boven- en onderzijde voorzien moesten worden van een elektrisch geleidende coating om voldoende elektrostatische kracht te generen. Ook is de achterzijde van de lamellen voorzien van scharnierfolie met een elektrisch geleidende coating. Deze coating vermindert de lichttransmissie en -reflectie van de materialen. Door deze aanpassingen liggen de transmissiewaarden lager dan de door de rekenmodellen voorspelde waarden en zijn aan de lage kant. De lichttransmissies zijn wel aanzienlijk beter dan van het lamellen systeem van de ZonWindKas (transmissie voor diffuus licht ca. 38% in open stand). De ZonWindKas heeft een warmte opbrengst van ca. 200 kWh/m² terwijl de Elkas en Fresnelkas respectievelijk 150 kWh/m² en 245 kWh/m² leveren en daarnaast respectievelijk ca. 20 kWh/m² en 40 kWh/m² aan elektrische energie.

In gesloten stand zijn de lichttransmissiewaarden nog te hoog voor de nieuwe normen voor lichtafscherming voor assimilatie belichting (98% reductie).

6 Conclusies

Het elektrostatistische regelbaar lamellensysteem is getest voor tuinbouwtoepassingen. Dit zijn lichtregeling bij potplanten, afscherming bij assimilatiebelichting en vermindering van de warmtetoevoer in de zomer. Het systeem heeft zowel in open als gesloten toestand een goede warmte-isolatie (U-waarde ca. $3 \text{ W/m}^2\text{K}$). In het voorgestelde systeem worden de lamellen met elektrostatistische krachten open en dicht geregeld zodat er nauwelijks bewegende delen noodzakelijk zijn. Door opsluiting tussen dubbelglas treedt er geen vervuiling en condensatie op in het systeem. Het lichtverlies wordt voornamelijk bepaald door meervoudige reflecties tussen de lamellen en lichtabsorptie van het elektrisch geleidend scharnier en het afdek materiaal. Wanneer standaard materialen voor het lamel gebruikt worden, zoals standaard glas en aluminiumfolie, is de lichttransmissie voor direct en diffuus licht te laag voor tuinbouwtoepassingen. Uit de berekeningen blijkt dat alleen met AR gecoat glas en een multilaagsfolie de voor de tuinbouw interessante specificaties bereikt worden. Het systeem biedt dan aantrekkelijke eigenschappen: een goede lichttransmissie in combinatie met een hoge isolatiewaarde. In de praktijk blijkt echter dat voor de onder- en boven afdekmaterialen evenals voor het lamelmateriaal elektrisch geleidende coating gebruikt moeten worden die de hoge lichtreflecties en daarmee de lichttransmissie van het systeem verminderen. Door deze genoemde knelpunten zijn de best praktisch haalbare lichttransmissies lager. Metingen aan de eerste prototypes geven waarden tussen 72-76% voor direct licht en 60-64% voor diffuus licht. Deze transmissiewaarden zijn voor tuinbouwtoepassingen in het koude seizoen aan de lage kant. Voor korte en bewolkte dagen in het koude seizoen zal zelfs voor potplanten een hogere lichttransmissie beter voldoen. Anderzijds zal de lichttransmissie aanzienlijk beter zijn dan van het lamellen systeem van de ZonWindKas (transmissie voor diffuus licht ca. 38% in open stand). De ZonWindkas heeft een warmte opbrengst van ca. 200 kWh/m^2 terwijl de Elkas en Fresnelkas respectievelijk 150 kWh/m^2 en 245 kWh/m^2 leveren en daarnaast respectievelijk ca. 20 kWh/m^2 en 40 kWh/m^2 aan elektrische energie. Een aangepast lamelontwerp resulteert in een transmissie van 85% voor direct- en 74% voor diffuus licht. De elektrostatistische kracht bij dit ontwerp bleek echter onvoldoende. In gesloten stand zijn de lichttransmissiewaarden nog te hoog voor de nieuwe normen voor lichtafscherming voor assimilatie belichting (98% reductie). Voor niet-tuinbouwtoepassingen heeft het systeem goede potenties.

De berekeningen tonen aan dat een lamellensysteem theoretisch goed kan werken als concentratorsysteem. Hierbij wordt overbodige straling gereflecteerd naar een collector. Experimenteel is echter gebleken dat de lamellen, die gesneden zijn uit een hoogreflecterende multilaags kunststoffolie, niet strak en vlak zijn. Hierdoor treedt er in de praktijk geen goede focussing op. Daarom kan geconcludeerd worden dat op dit moment het elektrostatistische lamel systeem niet geschikt is als zonneconcentrator.

Bijlage I.

Symbolen lijst

α	Dakhelling in graden
β_i	Hoek van de lamellen in graden t.o.v. de horizon
ϕ_i	Hoek van de weerkaatste straling in graden t.o.v. de horizon
δ	Declinatie van de zon
b	Breedtegraad in graden
h_a	Hoogte van de neerwaartse compartiment te midden van de lamellen in millimeters
h_s	Elevatiehoek van de zon in graden
h_t	Hoogte van het compartiment in millimeters
i	Hoek tussen de middellijn en de weerkaatste straling in graden
n	Dagnummer
r	Hoek tussen de middellijn en de inkomende straal in graden
t	Tijd gedurende de dag in uren
x_i	Afstand tussen de eerste lamellen en de i^{de} in het horizontale vlak in millimeters

