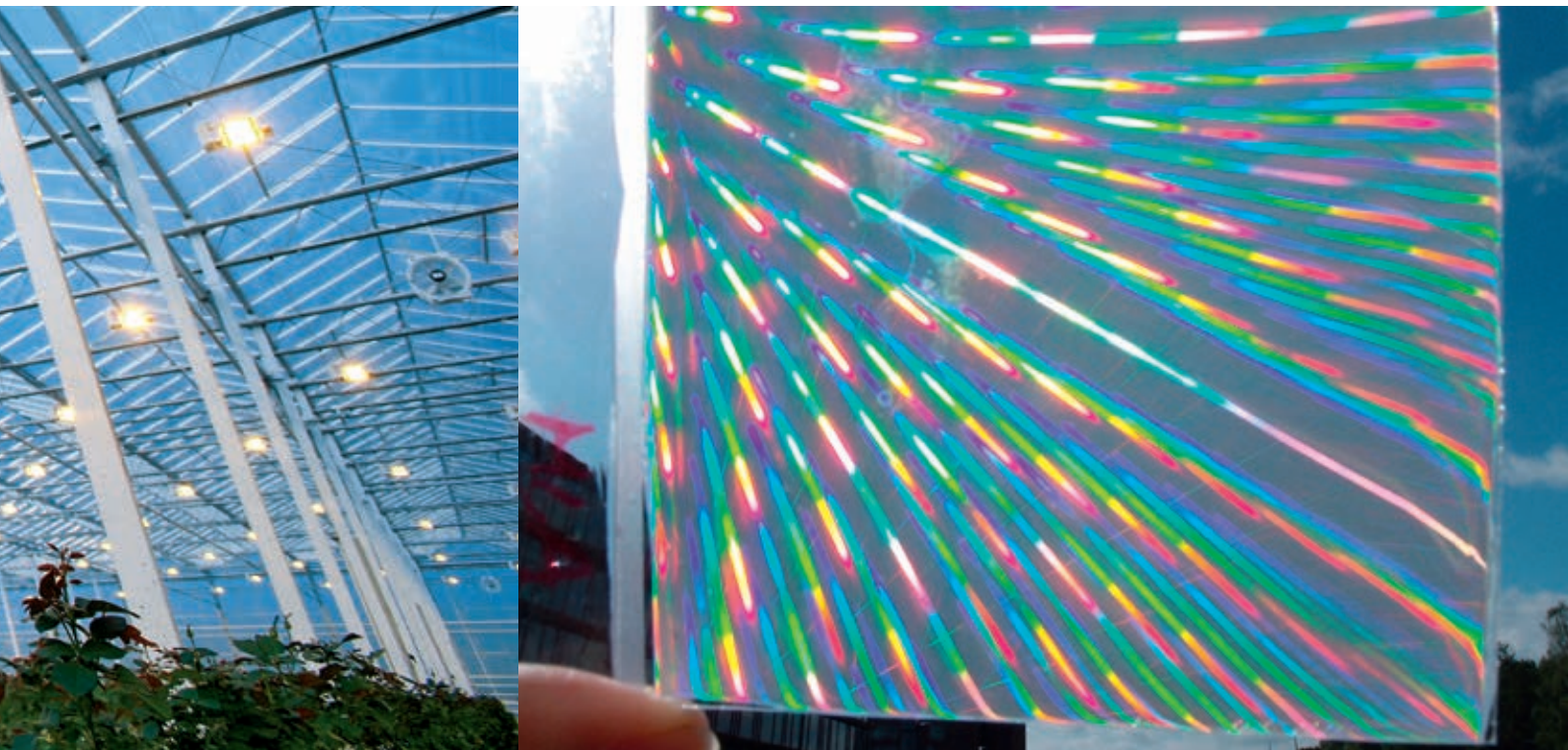




Verkenning mogelijkheden 3D-haze metingen

J.P.M. van Ruijven¹, V. Mohammadkhani¹, G.L.A.M. Swinkels¹

¹ Wageningen UR Glastuinbouw



Abstract NL

Diffuus kasdek materiaal verhoogt de productie van diverse gewassen in vergelijking tot helder glas, zoals eerder in plantproeven is aangetoond door Wageningen UR Glastuinbouw. Tot nu toe worden diffuse kasdek materialen gekarakteriseerd door de zogenoemde haze-waarde, welke echter geen informatie geeft over het lichtspreads patroon. In dit project is een nieuwe methode ontwikkeld om de lichtspreading onder diffuus kasdek materiaal te karakteriseren. Resultaat van deze methode is een waarde voor de F-scatter (voorwaartse lichtspreading). De F-scatter geeft meer informatie over mogelijke hogere gewasproductie bij gelijke hemisferische transmissie. Verder onderzoek moet aantonen wat het effect van een hogere lichtspreading en dus een hogere F-scatter is op plantproductie.

Abstract UK

Diffuse greenhouse covermaterial increases production of a variety of crops, as is proven earlier by Wageningen UR Greenhouse Horticulture. Until now, diffuse greenhouse covermaterials are characterised by the so-called haze-value, which does not give any information about the scatter pattern of the transmitted light. Within this project a new methodology is developed to characterise the forward scatter through diffuse greenhouse covermaterial. Result of this method is a value for F-scatter (forward scatter). The F-scatter provides more information about possibly higher crop production at equal hemispherical transmittance. Further research has to prove the effect is of a wider scatter pattern (and thus a higher F-scatter) on crop production.

© 2012 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO), onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Introductie	7
2	Selectie diffuse kasdekmaterialen	9
	2.1 Selectiecriteria	9
	2.2 Geselecteerde materialen	9
3	Meetmethodes	11
	3.1 Haze-factor	11
	3.2 Hemisferische transmissie	11
	3.3 Lichtspreiding	11
4	Ontwikkelen methodiek F-scatter	15
	4.1 Maat voor lichtspreiding	15
	4.2 Resultaten loodrechte F-scatter	16
5	Resultaten plantproeven	21
6	Conclusies	23
7	Aanbevelingen	25
8	Referenties	27
Bijlage I	Weergave lichtspreiding	29
Bijlage II	Dubbelzijdig gestructureerd materiaal	31
Bijlage III	Hoekafhankelijke spreidingsmeting	33

Samenvatting

Diffuus kasdek materiaal verhoogt de productie van diverse gewassen in vergelijking tot helder glas, zoals eerder in plantproeven is aangetoond door Wageningen UR Glastuinbouw. Tot nu toe worden diffuse kasdek materialen gekarakteriseerd door de zogenoemde haze-waarde, welke echter geen informatie geeft over het lichtspreads patroon. Dit lichtspreads patroon zorgt voor de doordringing van licht in het gewas. De oorzaak van verhoogde plantproductie onder diffuus glas is nog niet volledig duidelijk, maar als één van de oorzaken wordt deze doordringing van licht in het gewas genoemd. In dit project is een nieuwe methode ontwikkeld om het lichtspreads patroon onder diffuus kasdek materiaal te karakteriseren. De lichtspreading van kasdek materiaal is met een voor de glastuinbouw nieuw meetinstrument gemeten, waarna een verkenning is gedaan naar de mogelijkheden van het gebruiken van dit meetinstrument om diffuus kasdek materiaal op een eenduidige manier te karakteriseren. Hierdoor kunnen materialen goed met elkaar vergeleken worden. De meetopstelling geeft een kwantitatief beeld van de lichtspreading van diffuus kasdek materiaal. De karakterisatie van de lichtspreading zal de F-scatter (van forward scatter) worden genoemd.

De lichtspreading van bestaande en in ontwikkeling zijnde soorten diffuus kasdek materiaal is in dit project onderzocht. Uit dit onderzoek blijkt dat de huidige karakterisatie van diffuus kasdek materiaal, een kwantitatieve methode die de haze-waarde oplevert, niet specifiek genoeg is om de spreiding van het licht aan te duiden. Bij de nieuwe karakterisatiemethode bepaalt een scattermeter de lichtspreading van het diffuse sample. De gemeten lichtspreading wordt vergeleken met de lichtspreading van een Lambertiaanse diffusor (een materiaal met een lage transmissie, dat evenveel licht in alle richtingen verstrooit), wat in de optica gezien wordt als een ideale diffusor. Er is hiervoor gekozen omdat er nog geen kennis is over de ideale lichtspreading in een kas. Deze optimale lichtspreading in een kas kan eventueel voor elke gewasgroep anders zijn. De F-scatter is een waarde die de afwijking van de Lambertiaanse diffusor aangeeft. Wanneer na toekomstig onderzoek meer bekend is over de optimale lichtspreading voor een bepaald gewas, zal de vergelijking met de Lambertiaanse diffusor vervangen worden door een vergelijking met deze gewasspecifieke optimale lichtspreading. Binnen dit project is alleen de loodrechte F-scatter bepaald. De meetopstelling heeft echter wel de mogelijkheid om de lichtspreading bij verschillende hoeken van lichtinval te bepalen. Toekomstig onderzoek hiernaar is nodig.

Verschillende typen diffuus glas verstrooien het licht op een andere wijze, met bijvoorbeeld een voorkeur voor een bepaalde richting. Een vergelijking van de F-scatter met de haze-waarde van de materialen laat zien dat een hoge haze-waarde niet altijd betekent dat het materiaal een hoge F-scatter heeft en dus de Lambertiaanse diffusor niet benadert. Een hoge F-scatter betekent wel altijd dat het materiaal ook een hoge haze-waarde heeft. Wat het effect van een hoge F-scatter op planten is, is nog niet bekend. Het lijkt er daarnaast ook op dat een hoge F-scatter een lage hemisferische transmissie betekent.

Met deze nieuwe karakterisatiemethode is gekeken naar resultaten die behaald zijn in proeven met diffuus glas bij Wageningen UR Glastuinbouw. In die proeven bleek een toenemende haze-waarde een toenemende productie te betekenen, bij gelijke hemisferische transmissie van het kasdek materiaal. Ook een toenemende F-scatter betekent in die proeven een toenemende productie. Echter, de scatterpatronen van de verschillende samples zijn erg vergelijkbaar en de F-scatter van die materialen is relatief laag. Bovendien ging het in deze praktijkproeven maar om een beperkt aantal verschillende samples, waardoor het moeilijk is om een trend te ontdekken. Er kunnen dus nog geen conclusies worden getrokken voor materialen met een volledig ander spreidingspatroon en een hogere F-scatter. In toekomstig onderzoek kan de F-scatter meer duidelijkheid geven over het effect van het lichtspreads patroon op plantproductie. Hiervoor zullen meer glastypes gemeten moeten worden met de meetopstelling en ook meer glastypes worden getest op plantproductie.

1 Introductie

Het programma Kas als Energiebron (KaEB) heeft als ambitie dat nieuw te bouwen kassen vanaf 2020 energieneutraal, economisch rendabel en minder afhankelijk van fossiele brandstoffen zijn. Om deze ambitie te verwezenlijken zijn zeven transitiepaden opgesteld waarin het onderzoek gestuurd wordt, waarvan licht er één is. Binnen het transitiepad licht worden twee richtingen onderscheiden: efficiënter kunstlicht en beter benutten van natuurlijk licht.

Kasdek materiaal is van invloed op de hoeveelheid natuurlijk licht dat de kas binnen komt, de spreiding van het binnenkomende licht in de kas en de isolatiewaarde van de kas. Nieuw te ontwikkelen kasdek materiaal moet binnen deze categorieën een verbetering geven om richting de doelen van het programma Kas als Energiebron te gaan:

- Binnenlaten van meer licht door het ontwikkelen van kasdek materiaal met een verhoogde hemisferische transmissie
- Het binnenkomende licht beter verdelen over het gewas door het toepassen van diffuus kasdek materiaal
- Het verlagen van het energieverlies via het kasdek door het toepassen van dubbel glas met een hoge isolatiewaarde

Momenteel is er veel aandacht voor het toepassen van diffuus glas, glas waarbij directe inkomende lichtstralen van de zon in verschillende richtingen verstrooit worden, oftewel diffuus worden gemaakt. Proeven uitgevoerd door Wageningen UR Glastuinbouw in tomaat (Dueck *et al.* 2012), komkommer (Hemming *et al.* 2007A, Dueck *et al.* 2009), paprika (Eveleens *et al.* 2010) en roos (Garcia *et al.* in press 2012) en potplanten (Hemming *et al.* 2007B) tonen een verhoogde productie aan onder diffuus glas. Er is ook aangetoond dat diffuus licht een effect kan hebben op de kwaliteit van het gewas, bijvoorbeeld door een vermindering in de hoeveelheid verbrand blad in roos (Garcia *et al.* in press 2012). Of de manier van lichtverstrooiing een effect heeft op het gewas is nog niet helemaal duidelijk. In de proeven is niet aangetoond of er een invloed valt te verwachten van de verdeling van de haze over het gehele vlak rondom het instalingspunt, t.o.v. verdeling naar enkele plekken van dat vlak (zie Hoofdstuk 4). In dit project wordt geprobeerd diffuus licht beter te karakteriseren, in het bijzonder het spreidingspatroon.

Vrijwel altijd gaat het diffuus maken van kasdek materiaal ten koste van de hemisferische transmissie. Diffuus licht zorgt voor een andere lichtonderschepping door plantdelen in de kas dan direct licht, waardoor de lichtdoordringing in het gewas hoger is. Ook de verticale verdeling van licht over de hoogte van een plant verandert hierdoor en schaduwlijnen van constructie-elementen worden minder scherp of verdwijnen. De huidige methode om diffusiviteit te definiëren is gebaseerd op een methode om de helderheid van plastics te bepalen, waarbij een zogenaamde haze-waarde wordt toegekend aan het materiaal. De haze-waarde (naar ASTM D-1003) is een kwantitatieve maat en geeft het percentage van de loodrecht invallende straling weer dat na transmissie door het materiaal heen meer dan 1,5° afwijkt van loodrecht. Deze waarde geeft dus de hoeveelheid licht weer die verstrooid wordt door het materiaal, maar niet de richtingen waarin het verstrooid wordt. Twee materialen met dezelfde haze-waarde kunnen een volledig verschillende spreiding van het licht veroorzaken. De spreiding van het licht zorgt voor de doordringing van het licht in het gewas, één van de factoren die genoemd worden als oorzaak voor meerproductie onder diffuus glas (Dueck *et al.* 2012). Hoe breder de verstrooiing van het licht is, hoe makkelijker het licht langs een bladlaag in het gewas kan komen om diepere bladlagen te bereiken. De mogelijkheid bestaat dat niet de hoeveelheid licht die door het kasdek materiaal verspreid wordt van invloed is op plantproductie, maar dat dit komt door de breedte van de verstrooiing. De in dit project ontwikkelde methode voor het meten van de verstrooiing van licht is dan een betere maat voor diffusiteit dan de nu gebruikelijke haze-waarde. Wellicht zijn de verschillen in lichtspreiding belangrijk voor plantengroei, productie en fotosynthese.

Binnen het project 'Verkenning mogelijkheden 3D-haze metingen' wordt de diffusiviteit van kasdek materiaal met een voor de glastuinbouw nieuw meetinstrument gemeten. Met dit meetinstrument is het mogelijk om een kwantitatieve meting te doen naar de spreiding van licht door transparante materialen. In de huidige meetmethode wordt minder informatie meegenomen in de vergelijking, waardoor materialen dezelfde waarde kunnen krijgen, maar volledig anders omgaan met

licht. Er is een verkenning gedaan naar de mogelijkheden van het gebruiken van dit meetinstrument om de lichtspreading van diffuus kasdek materiaal op een eenduidige manier te karakteriseren, zodat diffuse materialen met elkaar vergeleken kunnen worden. Deze karakterisering van de spreading zal de F-scatter (van forward scatter) gaan heten. Daarnaast is het altijd noodzakelijk om de hemisferische transmissie van het materiaal te weten, omdat de hoeveelheid beschikbaar licht een grote invloed heeft op plantproductie.

In het '3D-haze project' zal ook aanvullende kennis verkregen worden over de experimentele omstandigheden van de proeven met diffuus licht in Bleiswijk. Er zal een aanzet worden gegeven voor het gebruiken van F-scatter metingen om verschillen in gewasproductie onder diffuus materiaal te verklaren, door de meetresultaten te koppelen aan resultaten van praktijkproeven met diffuus glas zoals uitgevoerd in Bleiswijk. Daarnaast zal worden onderzocht of er een correlatie bestaat tussen de hemisferische transmissie, F-scatter en hazewaarde van diffuse materialen en het effect op productie. De verkregen methodiek om F-scatter meetresultaten uit te drukken kan ook gekoppeld worden aan 3D-plantengroei modellen (Sarikioti *et al.* 2011), waarin gerekend kan worden aan optimale lichtbenutting van planten onder bepaalde lichtomstandigheden. De meetresultaten uit het '3D-haze project' maken het mogelijk om bestaande kasdekmaterialen beter te modelleren.

De resultaten van dit onderzoek naar karakterisering van haze creëren een beter begrip over het ontstaan van meerproductie onder diffuus glas en kunnen op die manier bijdragen aan het verbeteren van de energie-efficiëntie van de glastuinbouw. Met de resultaten van de F-scatter meting kan de ideale lichtspreading onderzocht worden. Daarna kunnen met deze informatie nieuwe kasdekmaterialen ontwikkeld worden die rekening houden met de ideale lichtspreading voor het gewas gedurende een dag of een jaar. De resultaten van de metingen kunnen gebruikt worden in 3D-plantmodellen, om de productie onder verschillende kasdekken te bepalen en onder exact dezelfde omstandigheden jaarrond met elkaar te kunnen vergelijken. Een verhoging van de productie betekent een verhoging van de efficiëntie en daarmee van de energiebesparing.

2 Selectie diffuse kasdekmaterialen

2.1 Selectiecriteria

Het ontwikkelen van een methodiek om de voorwaartse spreiding (F-scatter) van licht door een kasdek inzichtelijk te maken, vraagt om een gedegen keuze in de te onderzoeken kasdek materiaal samples. Er moet worden voorkomen dat materialen buiten de methodiek vallen, of dat materialen, met elk specifieke eigen karakteristieken dezelfde F-scatter toegewezen krijgen. Een brede selectie van materialen is gemaakt, waarin een groot aantal verschillende typen diffuse kasdekmaterialen voorkomen.

In de eerste plaats moeten er samples in de selectie opgenomen zijn die op verschillende manieren diffuus gemaakt zijn. Een aantal bekende methoden om dit te doen zijn etsen en walsen van glas, het aanbrengen van een prismatische structuur of een regelmatige microstructuur op het oppervlak van het materiaal en het tijdelijk aanbrengen van een diffuserende coating. In de tweede plaats moeten er een aantal samples gekozen worden met een gelijkwaardige 1D-hazefactor, om de verschillen in lichtspreiding onder materialen met een gelijkwaardige hazefactor aan te tonen. Om een link naar de praktijk te leggen, wordt daarnaast een aantal samples onderzocht die onderzocht zijn bij de praktijkproeven met komkommer, roos en tomaat bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk. Op deze manier kan er onderzocht worden welke soort lichtspreiding een hogere plantproductie tot gevolg heeft. Andere voorwaarden aan het meedoen in dit onderzoek van een sample zijn de afmeting en de beschikbaarheid voor Wageningen UR Glastuinbouw. De opstelling waarin de lichtspreiding wordt gemeten kan alleen meten aan samples die groter zijn dan 20x20mm en kleiner zijn dan 500x500mm. Naast de geselecteerde diffuse materialen is er ook een helder referentiemateriaal meegenomen in het onderzoek.

2.2 Geselecteerde materialen

Op basis van de bovenstaande selectiecriteria en beschikbaarheid zijn de volgende samples van diffuus kasdek materiaal uitgekozen om onderzocht te worden op F-scatter waarde. Om geen bedrijfsgevoelige informatie weer te geven in dit rapport, zijn de geselecteerde materialen anoniem weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2.1. Geselecteerde diffuse kasdekmaterialen, anoniem weergegeven.

Materiaal	Haze ($\pm 5\%$)	Hemisferische transmissie ($\pm 0,5\%$)	Praktijkproef	Productiemethode
Referentie	0%	83,0%	Ja	Floatglas
Referentie Lambertiaanse diffusor	94,7%	40,0%	Nee	Coating
Sample 1	41,4%	82,9%	Ja	Geëts
Sample 2	58,7%	83,9%	Ja	Gewalst
Sample 3	73,2%	82,4%	Ja	Prismatisch
Sample 4	48,0%	78,7%	Nee	Microstructuur
Sample 5	93,4%	70,5%	Nee	Micro/nanostructuur
Sample 6	91,7%	72,2%	Nee	Micro/nanostructuur
Sample 7	93,8%	67,7%	Nee	Micro/nanostructuur

Het heldere referentiemateriaal is floatglas met een hemisferische transmissie van 83% zoals het standaard in de glastuinbouw wordt gebruikt, zogenaamd 'standaardglas'. Als diffuse referentie wordt een ideale Lambertiaanse diffusor gebruikt. Een Lambertiaanse diffusor verspreidt het licht evenwichtig over alle hoeken, zodat er een homogene lichtverdeling ontstaat op een halve bol (hemisfeer) rondom het materiaal. Op een plat vlak onder zo'n diffusor ontstaat dan een cirkel met een afnemende lichtintensiteit naar de buitenkant van de cirkel toe.

Sample 1, 2 en 3 zijn samples die te vergelijken zijn met het glas dat gebruikt is in de proeven met diffuus glas bij tomaat in Bleiswijk (Dueck *et al.* 2012). Het glas uit die proeven is in dit project niet te gebruiken, omdat het te groot (95*120cm) en niet te snijden is (gehard glas). Er is gekozen voor glassamples die met dezelfde productiemethode gemaakt zijn, ongeveer dezelfde haze-factor hebben en een gelijkwaardige hemisferische transmissie als het glas uit de proeven.

Samples 1 en 4 hebben gelijkwaardige 1D-haze factoren, evenals samples 5, 6 en 7, wat de waarde van een F-scattermeting kan aantonen. Het toepassen van een tijdelijke coating is de enige van de verschillende methodes om diffuus glas te maken die ontbreekt.

3 Meetmethodes

3.1 Haze-factor

De huidige manier om de spreiding van licht door kasdek materiaal te meten is afgeleid van een standaardnorm voor de doorzichtigheid van transparante plastics: de ASTM D1003 norm (ASTM, 2011). De kritieke hoek in de bepaling van de haze-factor van kasdek materiaal op de meetapparatuur van Wageningen UR is $1,5^\circ$, in plaats van $2,5^\circ$ die geldt voor de ASTM D1003. De meting wordt uitgevoerd op een Ulbricht meetbol, waarin het licht over het volledige binnenoppervlak van de bol verspreid wordt. Een sensor meet de totale intensiteit van de doorgelaten straling. Het licht dat binnen de kritieke hoek van $1,5^\circ$ voor de haze waarde valt, valt door een poort recht tegenover de opening voor de inkomende straling en komt hierdoor niet in de bol terecht. Hierdoor neemt de intensiteit van de straling in de bol af, zie Figuur 3.1. De intensiteit in de bol met een geopende poort wordt gemeten en gedeeld door de intensiteit met een gesloten poort. Deze berekende waarde is de haze factor, het percentage van de doorgelaten straling die meer dan $1,5^\circ$ afwijkt van loodrecht. Bij zeer diffuse materialen kan deze waarde oplopen tot ongeveer 95%.

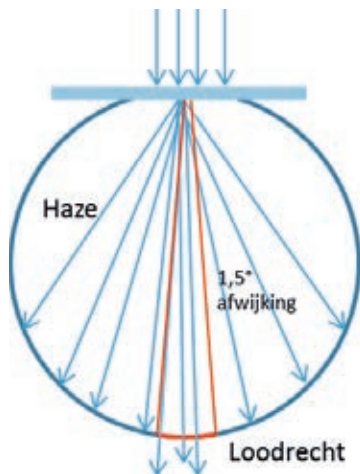


Figure 3.1. Haze-meting Ulbricht bol, meetapparatuur Wageningen UR.

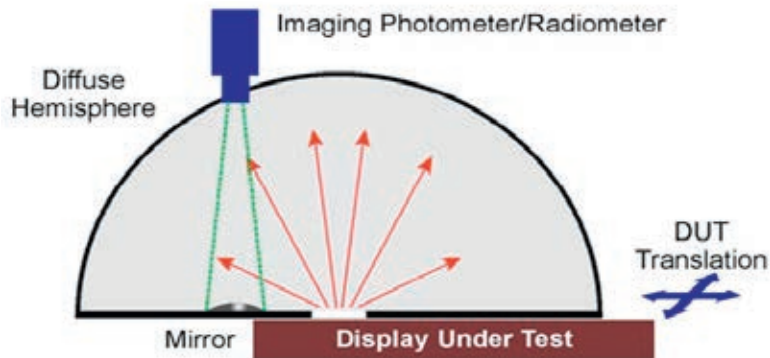
3.2 Hemisferische transmissie

De hemisferische transmissie van een kasdek materiaal is de doorlaatbaarheid van het materiaal voor PAR-licht (400-700nm), gewogen naar de hoeken van inval van de zon gedurende het jaar. Deze hemisferische transmissie wordt bepaald aan de hand van hoekafhankelijke metingen bij Wageningen UR Glastuinbouw volgens een protocol opgesteld in samenwerking met TNO (Ruigrok *et al.* 2010).

3.3 Lichtspreiding

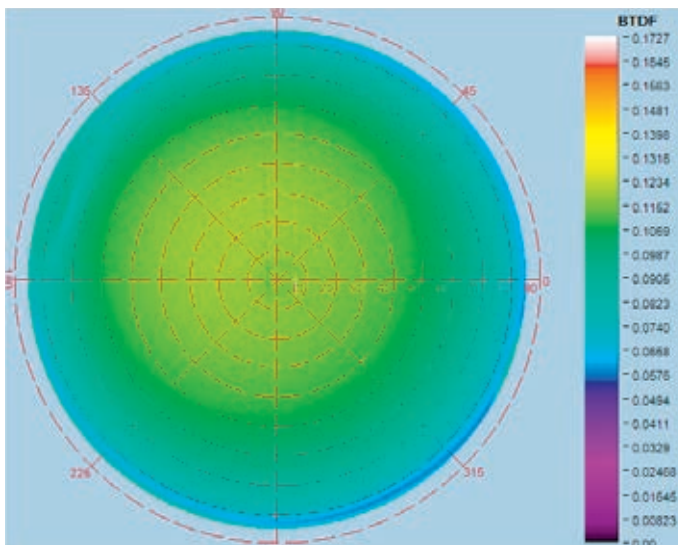
De driedimensionale spreiding van het licht bij transmissie door kasdek materiaal (F-scatter) wordt gemeten op een Imaging Sphere for Scatter and Appearance Measurement, zoals weergegeven in Figuur 3.2. Het te meten sample wordt voor een opening van 20mm aan de vlakke zijde van de halve bol geplaatst. Een beweegbare halogeenlamp kan het sample onder verschillende hoeken belichten, voor dit project wordt alleen gekeken naar de F-scatter van loodrechte transmissie. De doorgelaten straling bereikt de gekromde binnenzijde van de halve bol, waar het door een diffuus reflecterende coating voor $\sim 20\%$ wordt gereflecteerd naar de vlakke binnenzijde van de halve bol. Eventuele niet uniformiteit van de coating wordt gecorrigeerd in de software, door een referentiemeting uit te voeren met een materiaal waarde lichtspreiding van bekend is. Daar is naast de sample opening een bolle spiegel geplaatst, die een beeld van het volledige oppervlak van

de halve bol reflecteert naar een fotospectrometer die daar loodrecht boven staat. Op deze manier is een beeld gecreëerd van de verdeling van intensiteit van het doorgelaten licht over de halve bol. Om directe bestraling van de spiegel vanuit de opening in de vlakke zijde van de halve bol te voorkomen, is er een schot tussen geplaatst.



Figuur 3.2. Imaging Sphere for Scatter and Appearance Measurement (Yeo, 2006).

De gemeten lichtspreading wordt uitgedrukt in een hoeveelheid licht per ruimtehoek (steradiaal), de zogenaamde bidirectional transmittance distribution function (BTDF). Voor een ideale (Lambertiaanse) diffusor is de hoeveelheid straling per ruimtehoek gelijk. Bij een grotere hoek van uitstraling neemt de totale hoeveelheid straling af, maar ook het beschouwde oppervlak neemt af. Het afnemen van het oppervlak en de hoeveelheid licht is voor een Lambertiaanse diffusor evenredig met de cosinus van de hoek ten opzichte van de normaal, waardoor het voor een kijker lijkt alsof het scherm in alle richtingen evenveel licht verspreidt. In Figuur 3.3. is de gemeten spreading voor een Lambertiaanse diffusor weergegeven in BTDF waarden. De Figuur is opgebouwd uit een matrix van 963 bij 963 meetwaarden. Met deze meetwaarden kan de spreading van het licht door een materiaal op verschillende manieren worden weergegeven, zoals te zien is in Bijlage 1.



Figuur 3.3. Radarplot van de BTDF waarden van een Lambertiaanse diffusor.

Wanneer deze cosinus-relatie niet wordt meegenomen in het meetprotocol, wordt een zogenaamde cosinus gecorrigeerde waarde van de BTDF gevonden, de CCBTDF. De CCBTDF waarde geeft de totale hoeveelheid licht aan die op één punt terechtkomt. Dit is weergegeven in Figuur 3.4. In de Figure 3.3. en 3.4 is duidelijk te zien dat voor een Lambertiaanse diffusor de totale hoeveelheid licht die op een punt terechtkomt bij grotere hoeken afneemt, terwijl de hoeveelheid licht gecorrigeerd voor het beschouwde oppervlak ongeveer gelijk blijft.

Uit deze meting blijkt dat de meetopstelling in staat is om een goede weergave te maken van de spreiding van licht onder diffuus kasdek materiaal. In de volgende hoofdstukken wordt een methodiek ontwikkeld die een waarde voor deze lichtspreading koppelt aan Figure 3.3. en 3.4.

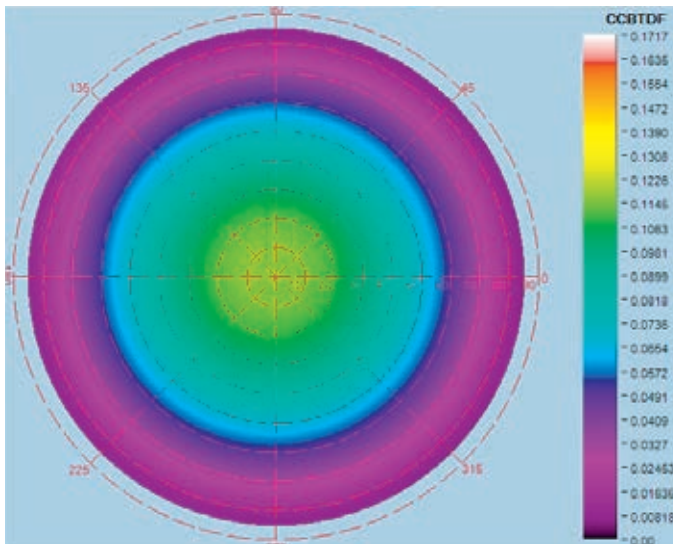


Figure 3.4. Radarplot van de cosinus gecorrigeerde BTDF waarden van een Lambertiaanse diffusor.

4 Ontwikkelen methodiek F-scatter

4.1 Maat voor lichtspreading

Het is erg lastig om de lichtspreading van materialen op een objectieve manier met elkaar te vergelijken op basis van alleen een figuur. Daarom is er in dit project een methodiek ontwikkeld die het mogelijk maakt om de meetresultaten van de scattermeter, zoals weergegeven in Hoofdstuk 3.3, te vergelijken door er een getalswaarde aan te geven. Omdat een getal nooit alle informatie uit een Figuur kan bevatten, zal het uiteindelijke resultaat van de maat voor lichtspreading worden weergegeven in combinatie met een Figuur waarin de spreidingsverdeling te zien is.

In 2009 is er een onderzoek gedaan naar de ideale lichtverstrooiing voor komkommer (Dueck *et al.* 2009), waarbij uitsluitend gebruik gemaakt werd van de haze-waarde van het kasdek materiaal. De daadwerkelijke spreading van het licht in deze proef is niet bekend. Omdat er nog geen beeld is van de ideale spreading van licht op planten, wordt in dit project een Lambertiaanse diffusor als referentie aangehouden (zie Figuur 3.4.). Hoewel er geen zekerheid is dat een dergelijke ideale diffusor ook ideaal is voor de lichtverdeling in het gewas, en daarmee voor de gewasgroei, is dit de meest voor de hand liggende keuze. De in Hoofdstuk 2 geselecteerde samples worden vergeleken met deze Lambertiaanse diffusor. De maat voor de lichtspreading, vanaf nu F-scatter waarde genoemd (van forward scatter), is de mate waarin de lichtspreading van een sample overeenkomt met de lichtspreading onder deze ideale diffusor. De F-scatter van deze Lambertiaanse diffusor is daarmee dus 100%. Helder floatglas verstrooit het licht nauwelijks, waardoor de F-scatter van dit materiaal 0% wordt.

Voor een plant is het belangrijk hoeveel licht er op het blad valt en niet zozeer wat de intensiteit van dit licht is. Daarom wordt ervoor gekozen om in deze methode de CCBTDF waarden te gebruiken als startpunt voor de berekening van de F-scatter. De meting levert een matrix van 963 bij 963 CCBTDF-waarden op. Er wordt nu een correctie voor de transmissiewaarde van het sample uitgevoerd, door de matrixwaarden te delen door het totaal van alle waarden in de matrix. De waarden in de transmissie-gecorrigeerde matrix geven zo de fractie van de totale transmissie die in een bepaalde richting wordt doorgelaten weer.

De F-scatter is een waarde die de spreading van het licht aangeeft ten opzichte van een Lambertiaanse diffusor. Het verschil met de Lambertiaanse diffusor wordt bepaald door de transmissie-gecorrigeerde matrix van de Lambertiaanse diffusor af te trekken van de transmissie-gecorrigeerde matrix van het sample. Van de nu berekende 'verschilmatrix' worden de absolute waarden genomen en wordt de standaarddeviatie bepaald. Door de standaarddeviatie van het sample te delen door de standaarddeviatie van floatglas (maximale afwijking van ideale diffusor) en deze waarde van 1 af te trekken, wordt ervoor gezorgd dat de F-scatter van floatglas nul en van een Lambertiaanse diffusor één is. Deze waarde wordt vermenigvuldigd met 100%, om te komen tot een percentage van benadering van een ideale diffusor.

$$\text{F-scatter} = (1 - \text{Standdev}/\text{floatglas}) * 100\%$$

In Figuur 4.1. worden de waarden voor F-scatter van de onderzochte samples weergegeven. De blauwe lijn in deze Figuur laat zien dat de waarden voor de F-scatter van een aantal samples erg dicht bij de 100% komen, terwijl er nog veel ruimte voor verbetering is om gelijk te zijn aan een Lambertiaanse diffusor. Om de gemeten waarden wat verder uit elkaar te trekken, wordt er de formule aangepast tot onderstaande formule:

$$\text{F-scatter} = (1 - \text{Standdev}^{0,5}/\text{floatglas}) * 100\%$$

Met deze formule geldt nog steeds dat de F-scatter van een Lambertiaanse diffusor 100% en de F-scatter van floatglas 0%.

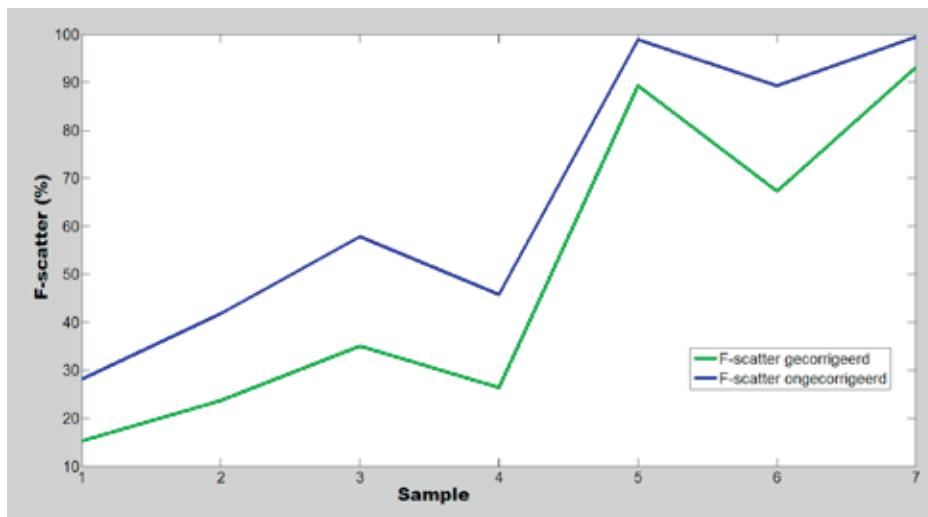


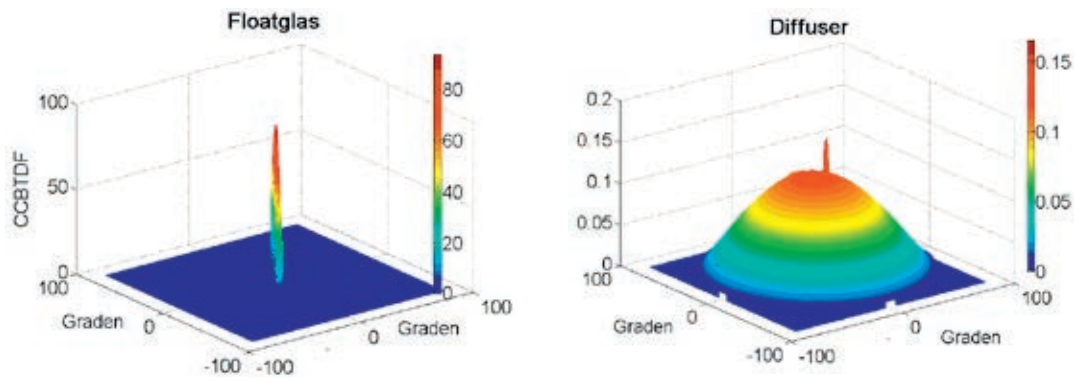
Figure 4.1. F-scatter waarden ongecorrigeerd en gecorrigeerd.

De F-scatter geeft dus aan in hoeverre een sample de Lambertiaanse diffusor benadert. Hoe dichter een sample een Lambertiaanse diffusor benadert, hoe gelijkwaardiger het sample het licht over alle hoeken verdeelt. Hierdoor wordt het beeld van de zon op de plant zo groot mogelijk gemaakt, waardoor hotspots worden voorkomen die fotoinhibitie kunnen veroorzaken bij hoge lichtintensiteiten (de hotspots worden uitgesmeerd over een groter oppervlak, waardoor de intensiteit per oppervlakte-eenheid wordt verkleind). Dit betekent ook dat het licht in de kas onder een grotere hoekspreiding een blad benadert, waardoor schaduwlijnen (t.g.v. roeden, spanten) minder worden of verdwijnen en het licht dieper in het gewas doordringt. Op deze manier geeft de lichtspreiding die veroorzaakt wordt door het kasdek materiaal een mogelijke verklaring voor de verhoogde productie onder diffuus kasdek materiaal.

In een ideaalbeeld zou de Lambertiaanse diffusor hier mogelijk vervangen kunnen worden door de ideale spreiding voor een bepaald gewas of bepaalde gewasgroep.

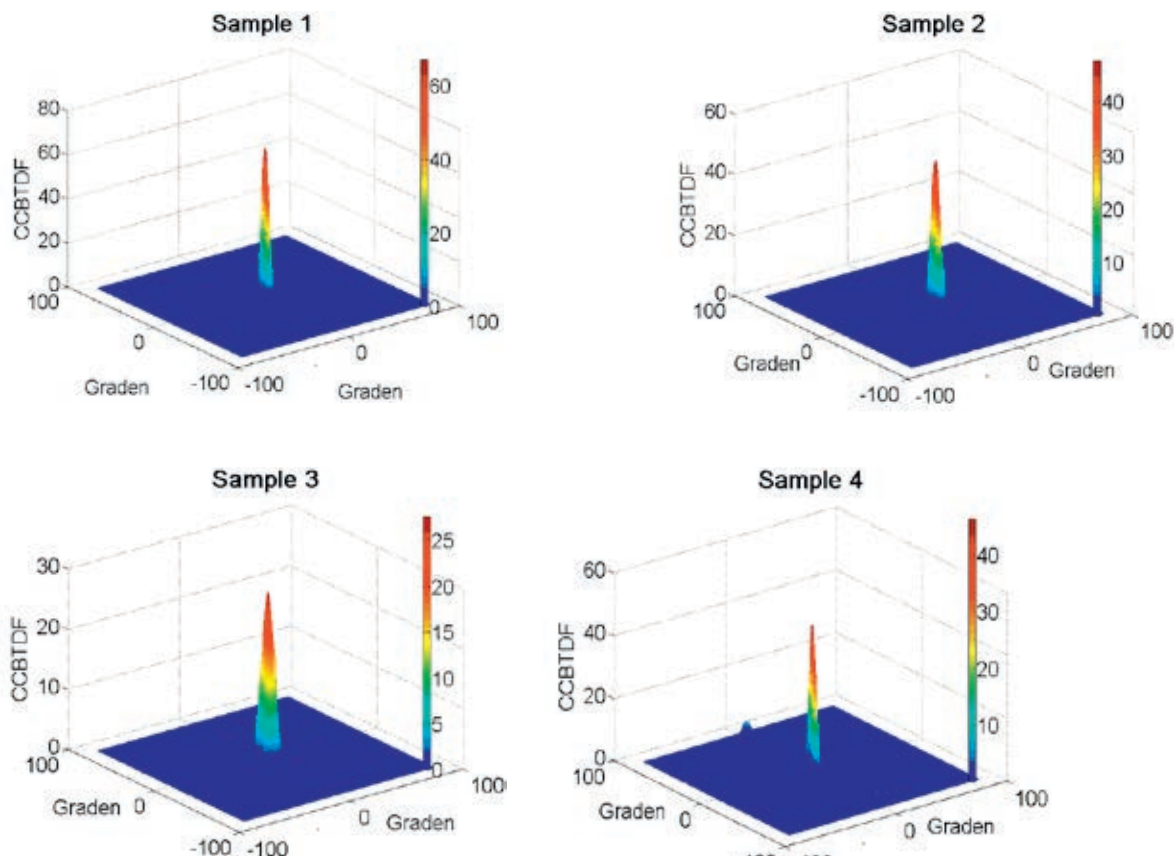
4.2 Resultaten loodrechte F-scatter

In de Figure 4.2a en b zijn respectievelijk de 3D plots van de spreiding van het floatglas en de Lambertiaanse diffusor weergegeven. Hierin is te zien dat het floatglas de inkomende straling nauwelijks verstrooit. De F-scatter van dit materiaal wordt op 0% gesteld. De Lambertiaanse diffusor verdeelt het licht over alle mogelijke hoeken, zodat op een plat vlak de intensiteit per oppervlakte-eenheid naar buiten toe afneemt. Dit materiaal heeft een F-scatter van 100%. In deze methode is het niet mogelijk dat een materiaal een grotere waarde heeft dan 100%, doordat een gemeten sample altijd vergeleken wordt met een ideale diffusor. Een materiaal dat doorgelaten lichtstralen focust op een punt (lenzen) kan in theorie een waarde krijgen die lager is dan 0%, als het brandpunt van de lens precies op de wand van de meetopstelling ligt.



Figuur 4.2. 3D plot van de lichtspreading onder a. floatglas ($F\text{-scatter} = 0\%$) b. Lambertiaanse diffusor ($F\text{-scatter} = 100\%$).

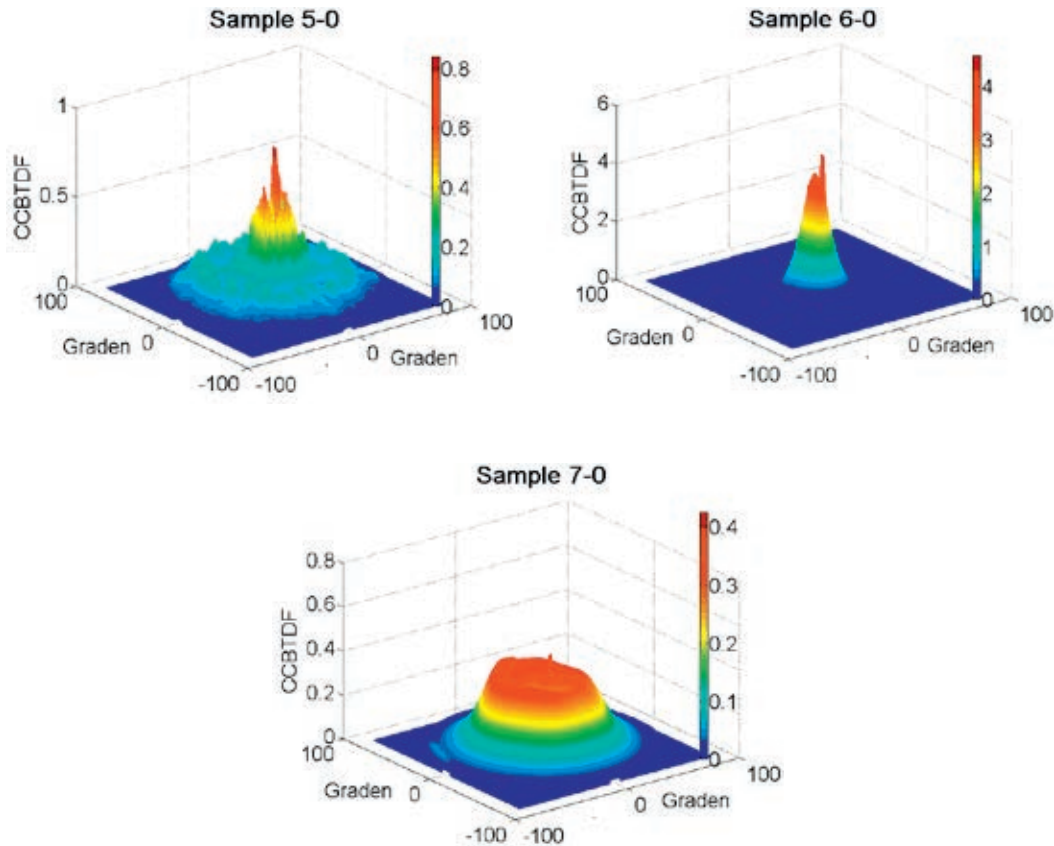
De waarden op de Z-as van de Figure verschilt enorm. Dit komt in de eerste plaats doordat de waarden in deze figuren niet zijn gecorrigeerd voor de transmissie. Hierdoor krijgt het ene sample veel meer licht in de bol dan het andere sample, waardoor de waarden verschillen. In de tweede plaats wordt dit verschil veroorzaakt door het verschil in spreading tussen de samples. Wanneer een sample het licht meer verspreidt in de ruimte, worden de CCBTDF waarden lager. Er is voor gekozen om de Z-assen niet allemaal hetzelfde weer te geven, omdat dan de ruimtelijke verdeling van het licht minder duidelijk weergegeven wordt.



Figuur 4.3. 3D plots van spreading van Sample 1-4. Sample 1: $F\text{-scatter} = 15,3\%$; Sample 2: $F\text{-scatter} = 23,7\%$; Sample 3: $F\text{-scatter} = 35,1\%$; Sample 4: $F\text{-scatter} = 26,4\%$.

In Figuur 4.3. is te zien dat de spreading van het licht onder het materiaal van sample 1-3 op het oog gelijkwaardig is. De berekende $F\text{-scatter}$ laat zien dat er wel degelijk verschillen tussen de materialen bestaan. De hemisferische transmissie van deze samples is nagenoeg gelijk, dus het verschil in CCBTDF waarden ontstaat doordat het licht over een groter oppervlak verspreidt wordt. Van Sample 1 naar Sample 3 wordt de piek van de spreading steeds breder. Dit

gaat gelijkwaardig met de oplopende waarde voor de haze-factor, zoals te zien is in Tabel 4.1. Figuur 4.3. laat zien dat dit niet noodzakelijkerwijs het geval hoeft te zijn, omdat er ook veel ongelijkmatiger verdelingen mogelijk zijn. Sample 4 geeft naast de piek recht in het midden nog 2 kleine pieken aan beide zijden van deze piek. De F-scatter van Sample 4 is daardoor iets hoger dan die van Sample 2, omdat de middelste piek en kleine pieken iets dichterbij de waarden van de Lambertiaanse diffusor komen.



Figuur 4.4. 3D plots van de spreiding van samples 5-7. Sample 5-0: F-scatter = 89,3%, Sample 6-0: F-scatter = 67,3%; Sample 7-0: F-scatter = 93,1%.

De materialen van Samples 5-7 benaderen de ideale diffusor beter dan Sample 1-4. De F-scatter is hierdoor ook veel hoger. Dit is te zien in Figuur 4.4. Vooral sample 7 benadert de ideale diffusor behoorlijk goed in vorm, maar ook in F-scatter (93,1%). Omdat deze samples op beide zijden een andere regelmatige structuur hebben met een effect op licht, geven de omgedraaide samples een ander spreidingspatroon. In Bijlage 2 is te zien dat de F-scatter daardoor niet erg verandert, terwijl het patroon wel anders wordt. Samples 1-3 hebben allen een onregelmatige structuur die het licht diffuus maakt, sample 4 heeft aan beide zijden dezelfde regelmatige structuur. Omdraaien van deze samples geeft daarom exact dezelfde spreiding.

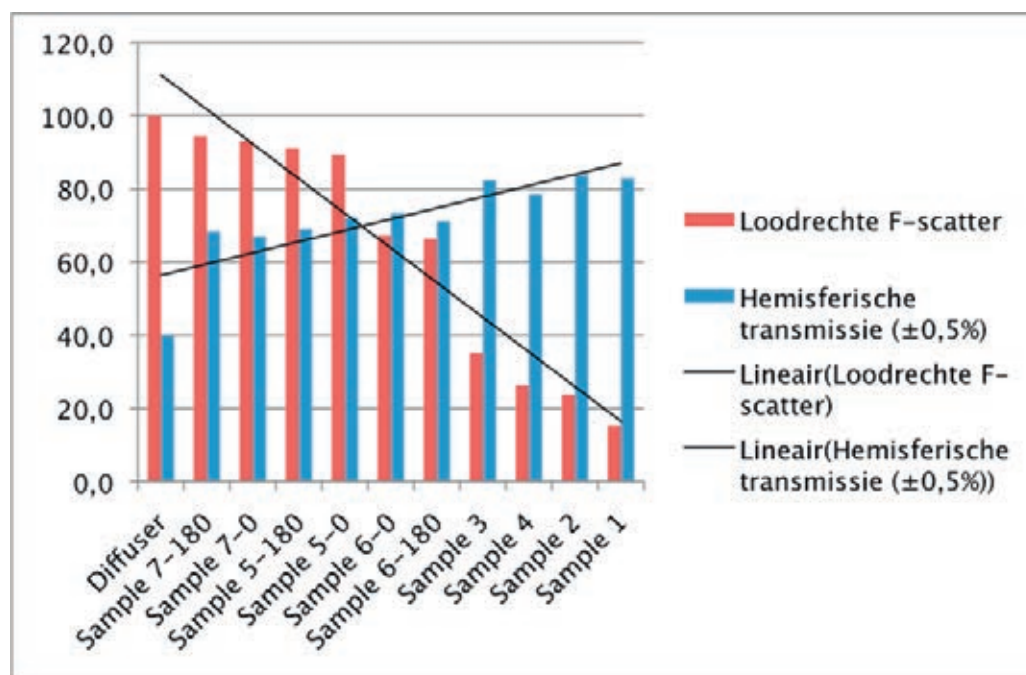
In de gebruikte meetopstelling is het mogelijk om de samples in plaats van loodrecht ook onder verschillende hoeken te beschijnen. De zon staat bijna nooit loodrecht op het kasdek en zal daardoor ook nooit de lichtspreiding vertonen zoals hierboven gemeten. Om de mogelijkheden van deze metingen aan te tonen is het gebruiken van de loodrechte F-scatter voldoende. In Bijlage 3 zijn de resultaten van metingen onder hoeken weergegeven. Toekomstig onderzoek zal ertoe moeten leiden dat er door middel van een weging van de instraling onder bepaalde hoeken een soort hemisferische of hoekafhankelijke F-scatter geformuleerd wordt. Dit valt echter buiten het bereik van dit onderzoek.

In Tabel 4.1. wordt de F-scatter van de samples gekoppeld aan de haze-waarde en de hemisferische transmissie. Door de waarden in Tabel 4.1. lijkt het erop dat de hemisferische transmissie afhankelijk is van de F-scatter van een materiaal.

Tabel 4.1. Overzicht van de gemeten waarden van de samples.

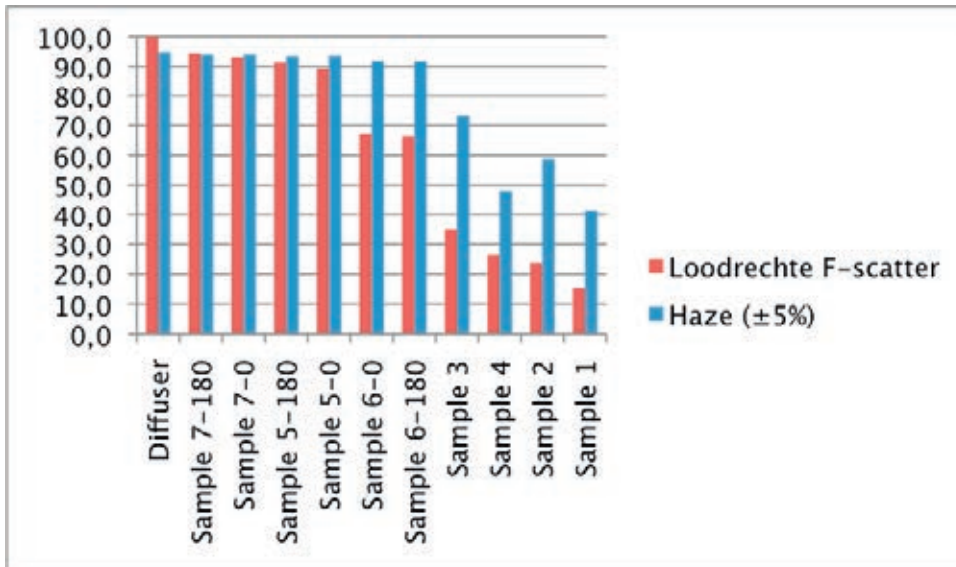
Materiaal	Hemisferische transmissie ($\pm 0,5\%$)	Haze ($\pm 5\%$)	Loodrechte F-scatter
Referentie	83,0%	0%	0%
Referentie Lambertiaanse diffusor	40,0%	94,7%	100%
Sample 1	82,9%	41,4%	15,3%
Sample 2	83,9%	58,7%	23,7%
Sample 3	82,4%	73,2%	35,1%
Sample 4	78,7%	48,0%	26,4%
Sample 5-0	72,1%	93,5%	89,3%
Sample 5-180	69,1%	93,4%	91,2%
Sample 6-0	73,3%	91,8%	67,3%
Sample 6-180	71,2%	91,7%	66,4%
Sample 7-0	67,1%	93,8%	93,1%
Sample 7-180	68,4%	93,8%	94,4%

Figuur 4.5. laat zien dat een hogere F-scatter zorgt voor een lagere hemisferische transmissie. Echter, binnen dit onderzoek zijn de samples onder andere geselecteerd op de manier waarop ze diffuus zijn gemaakt. Bij de geëtste, gewalste en prismatische samples kunnen aangebrachte anti-reflectiecoatings dit beeld verstoren. De samples met micro/nanostructuren kan deze coating niet worden toegepast en wordt geprobeerd de structuren zo te kiezen dat de hemisferische transmissie verhoogd wordt en het licht diffuus gemaakt wordt. Toch lijkt het erop dat het uitsmeren van de beschikbare hoeveelheid licht over een grote spreiding van hoeken een negatief effect heeft op de hemisferische transmissie. Dit spreiden van het licht lijkt een toename in reflectie tot gevolg te hebben. Misschien kan er ergens een optimum gevonden worden, waarbij met zo min mogelijk verlies van transmissie een goede spreiding van het licht over de planten bereikt kan worden. Dit valt echter buiten de scope van dit onderzoek, maar zou met behulp van de F-scatter kunnen worden uitgezocht in vervolgonderzoek.



Figuur 4.5. Vergelijking tussen de F-scatter en de hemisferische transmissie. De trendlijnen laten zien dat het er bij deze samples op lijkt dat bij een toenemende F-scatter de hemisferische transmissie verlaagd wordt.

Volgens Figuur 4.6. lijkt er enig verband te bestaan tussen de haze-waarde en de F-scatter. Een hoge F-scatter is altijd gekoppeld aan een hoge haze-waarde, terwijl een lage F-scatter ook een hoge haze-waarde kan hebben (zie bijvoorbeeld Sample 2). In een extreem geval zou het kunnen dat een materiaal het licht in een ring net buiten het gebied met loodrechte straling stuurt, waardoor een hoge haze-waarde wordt bereikt, maar het materiaal een lage F-scatter heeft.



Figuur 4.6. Vergelijking tussen de haze-waarden en de F-scatter van de onderzochte samples.

5 Resultaten plantproeven

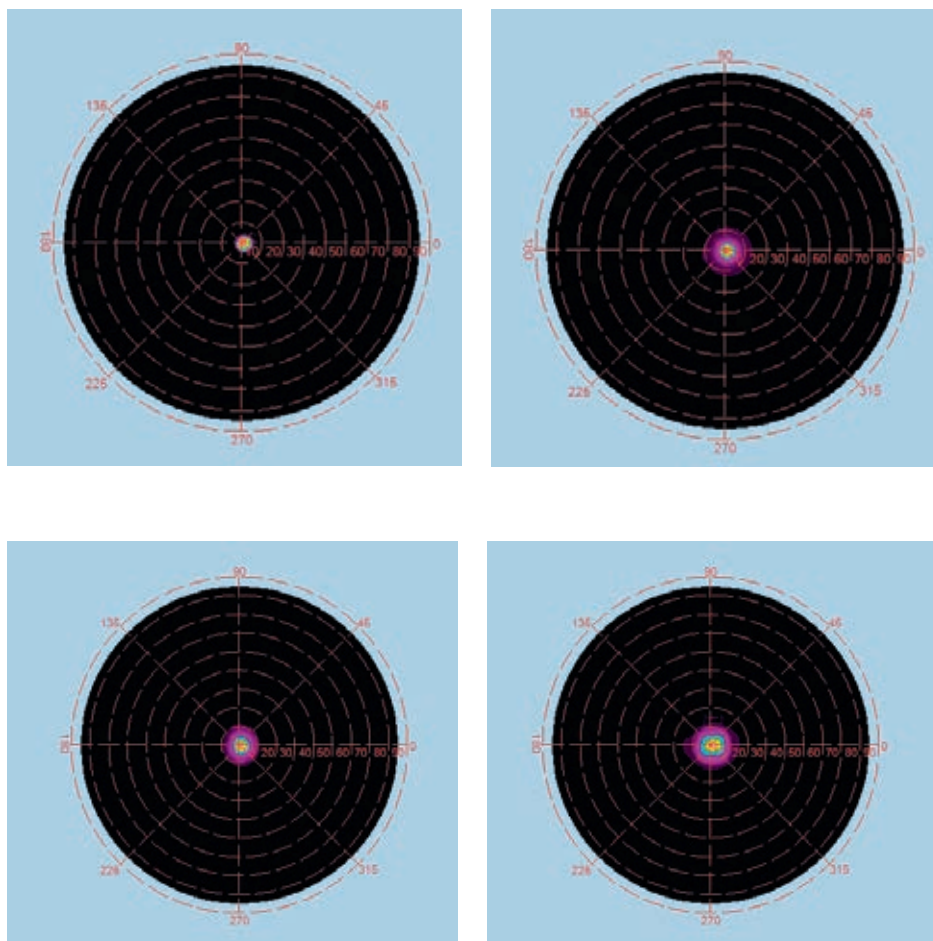
Verschillende experimenten laten een positief effect zien van de omzetting van direct licht in diffuus licht op productie van gewassen in een kas (Dueck *et al.* 2012, Hemming *et al.* 2007A, Dueck *et al.* 2009, Eveleens *et al.* 2010, Garcia *et al.* in press 2012, Hemming *et al.* 2007B). In de proef van Dueck *et al.* (2012) is het effect van de hazewaarde van een materiaal op de productie onderzocht. Daarvoor zijn vier onderzoekskassen uitgerust met ander kasdek materiaal: floatglas en glas met haze-waarden van 45%, 62% en 71%. Het glas met een haze-waarde van 62% had een 3% hogere hemisferische transmissie dan de andere samples en zal daarom niet in deze redentatie worden meegenomen. Welke lichtspreading bij de haze-waarden hoort was tot nu toe niet bekend.

Het glas met een haze-waarde van 45% heeft in tomaat een meerproductie gegeven van 8%, terwijl het glas met een haze-waarde van 71% een meerproductie van 11% gaf, zie Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Meerproductie in proeven vergeleken met F-scatter en haze-waarde.

	Hemisferische transmissie	Haze ($\pm 5\%$)	F-scatter	Meerproductie in proeven
Sample 1	82%	41,4%	15,3%	8%
Sample 2	85%	58,7%	23,7%	9%
Sample 3	82%	73,8%	35,1%	11%

Het referentieglass dat gebruikt is in het praktijkonderzoek is hetzelfde glas dat gebruikt is in dit project en geeft dus dezelfde lichtspreading, te zien in Figuur 5.1.



Figuur 5.1. Spreading van het licht door (met de klok mee vanaf linksboven): referentieglass, 41%, 59% en 74% haze.

Bij een oplopende haze-waarde wordt in tomaat een oplopende productie gevonden. Uit dit onderzoek blijkt dat ook de F-scatter toeneemt naarmate de haze-waarde toeneemt en de productie. Dit zal echter niet voor alle materialen opgaan, zoals in Hoofdstuk 4 werd vermeld. Figuur 5.1. laat zien dat niet zozeer de grotere hoeveelheid licht die verspreid wordt een effect heeft op de productie, maar de grotere spreiding van het licht over de verschillende hoeken. Dit wordt in de F-scatter beter uitgedrukt dan in de haze-waarde.

Over de productie onder kasdekmaterialen met een hoge F-scatter zoals gemeten voor Samples 5-7 en de referentie Lambertiaanse diffusor is nog niets bekend. In de kas werkt het waarschijnlijk op een andere manier, omdat er geen puntbron gebruikt wordt die een klein oppervlak van het kasdek materiaal gebruikt, maar de zon die het volledige kasdek beschijnt. Het spreidingspatroon wat door het kasdek gecreëerd wordt, komt dan vanaf elk stukje van het dek en zorgt ervoor dat het licht op een oppervlak boven het gewas nog overal met dezelfde intensiteit terecht komt, alleen onder verschillende hoeken. Deze hoeken zijn van belang voor het doordringen in het gewas en het verwijderen van schaduwlijnen en hotspots. Meer onderzoek is hier nodig.

Wellicht valt er nog een toename in de productie te realiseren wanneer een materiaal ontwikkeld wordt met een hoge F-scatter en een hemisferische transmissie gelijkwaardig aan die van floatglas zonder anti-reflectie-coating.

6 Conclusies

In eerder onderzoek is geconcludeerd dat de diepere doordringing van licht onder diffuus glas één van de verklaringen kan zijn voor de verhoogde productie van gewassen in de kas (Dueck, 2012). De doordringing van licht in het gewas wordt veroorzaakt door het spreidingspatroon van het licht binnen de kas. Deze verkenning naar de mogelijkheden van het meten van de lichtspreiding door diffuus kasdek materiaal leverde de volgende conclusies op:

- Dit onderzoek gebruikt een meetopstelling die een goed beeld geeft van de lichtspreiding onder diffuus kasdek materiaal

De resultaten van de meting geven een gedetailleerd beeld van de richtingen waarin het licht door het kasdek materiaal wordt afgebogen. Een voldoende hoge resolutie (963x963) kan gebruikt worden om het volledige oppervlak onder een diffuus materiaal te kunnen karakteriseren. Met de meetopstelling kunnen naast loodrechte ook transmissiemetingen naar de spreiding onder andere hoeken van lichtinval uitgevoerd worden.

- Vanuit de gemeten waarden voor de lichtspreiding is een informatieve en selectieve eenheid ontwikkeld, de zogenaamde F-scatter, die de lichtspreiding van een materiaal karakteriseert

De F-scatter komt voort uit een vergelijking tussen een gemeten sample en een Lambertiaanse diffusor, een ideale diffusor die de totale lichtintensiteit evenredig verdeelt. De waarde van de F-scatter geeft dus aan in hoeverre een sample overeenkomt met deze optisch ideale diffusor. Deze Lambertiaanse diffusor geeft optisch dan wel een ideale spreiding, dit wil niet zeggen dat er ook een ideale spreiding ontstaat voor productie van planten in een kas. Eigenlijk moet in het ideale geval in de vergelijking de Lambertiaanse diffusor vervangen worden door een vergelijking met een lichtspreiding die ideaal is voor een specifiek gewas of een specifieke gewasgroep. Deze ideale lichtspreiding is eventueel te berekenen in softwaresimulaties.

- De kasdek materialen die tot op heden gebruikt zijn in plantproeven, hebben een lage F-scatter waarde

Bij proeven met tomaat, komkommer, rozen en potplanten met diffuus glas met een oplopende haze-waarde zijn toenemende producties gevonden. Het materiaal dat in deze proeven is gebruikt, is meegenomen in dit onderzoek. Het blijkt dat bij deze materialen ook de F-scatter toeneemt bij een toenemende productie. De F-scatter van deze materialen is relatief laag, vergeleken met andere materialen die in dit onderzoek zijn meegenomen. In vervolgonderzoek zal duidelijk moeten worden of een hogere F-scatter waarde nog een verhoging van de productie tot gevolg heeft. Om het effect van een hogere F-scatter op planten aan te kunnen tonen, zullen materialen ontwikkeld moeten worden met een hoge F-scatter en dezelfde hemisferische transmissie als floatglas en de gebruikte diffuse materialen met een lage F-scatter uit eerdere experimenten.

- F-scatter en hemisferische transmissie lijken een relatie te hebben

Er lijkt een relatie te bestaan tussen de F-scatter en de hemisferische transmissie. Hoe hoger de F-scatter, hoe verder het licht verspreid wordt. Het vermoeden bestaat dat hierdoor ook de reflectie toeneemt en daardoor de transmissie afneemt. Aanvullend onderzoek moet dit vermoeden onderbouwen.

7 Aanbevelingen

De resultaten van de verkenning naar de mogelijkheden van het meten van de lichtspreiding, leiden tot de volgende aanbevelingen:

- Onderzoeken mogelijkheden hemisferische F-scatter

Dit onderzoek is een verkenning van de mogelijkheden voor het meten van de lichtspreiding door verschillende kasdekmaterialen. In dit rapport is de F-scatter uitgewerkt voor loodrechte transmissiemetingen. Omdat de zon in Nederland nooit loodrecht op een kasdek schijnt, moet de F-scatter onder hoeken ook meegenomen worden. De spreiding kan ook onder hoeken gemeten worden, waarmee een soort hemisferische F-scatter kan worden bepaald. Metingen van de lichtspreiding onder hoeken van verschillende materialen zijn weergegeven in Bijlage 2.

- Kwantificeren van de relatie tussen F-scatter en plantproductie middels praktijkproeven

Met de resultaten van deze verkenning naar de mogelijkheden van het toepassen van metingen van de lichtspreiding in de glastuinbouw in het achterhoofd, is het noodzakelijk om uit te zoeken wat het effect van lichtspreiding is op de gewasgroei onder diffuus kasdek materiaal. In deze nieuwe onderzoeken kan de in dit '3D-haze project' ontwikkelde maat voor spreiding (F-scatter) gebruikt worden om de toegepaste materialen in plantproeven te karakteriseren. Er zullen materialen met verschillende lichtspredingen moeten worden onderzocht (zoals Sample 5 en Sample 7) en worden vergeleken met de huidige diffuse materialen. Uitgangspunt hierbij moet wel zijn dat de materialen een gelijke hemisferische transmissie hebben, die in de buurt ligt van het heldere referentiemateriaal (83%). Hieruit zal misschien blijken dat een optimale lichtspreiding compenseert voor het productieverlies dat optreedt bij een verlies aan transmissie.

- Ontwikkelen gewas(groep)specifieke F-scatter

De gemeten samples worden nu vergeleken met een Lambertiaanse diffusor. Het is beter om de metingen te vergelijken met een lichtspreiding die voor een bepaald gewas een maximale productie geeft. De ideale lichtspreiding voor een gewas of een gewasgroep is echter nog niet bekend. Met 3D-plantmodellen waarin de lichtspreiding over een gewas meegenomen wordt, zou de ideale lichtspreiding gedurende het jaar bepaald kunnen worden. Deze optimale lichtspreiding kan dan in de F-scatter bepaling voor een bepaald gewas meegenomen kunnen worden, waardoor een gewasspecifieke F-scatter ontstaat. Materialen die op die manier ontwikkeld worden, moeten dan getest worden op planten van het specifieke gewas, om de 3D-plantmodellen te verifiëren. Binnen dit onderzoek kan ook een antwoord gegeven worden op de vraag wat het effect van een grotere spreiding op de productie van planten is.

8 Referenties

ASTM Standard D1003-11e1

Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D1003-11E01

Dueck, T.A.; Poudel, D.; Janse, J.; Hemming, S. (2009)

Diffuus licht - wat is de optimale lichtverstrooiing?, Wageningen: Wageningen UR, Glastuinbouw (Nota / Wageningen UR, Glastuinbouw 308)

Dueck, T.A.; Janse, J.; Kempkes, F.; Tao, L.; Elings, A.; Hemming, S. (2012)

Diffuus licht bij tomaat, Wageningen: Wageningen UR, Glastuinbouw (Nota / Wageningen UR, Glastuinbouw 1158)

Eveleens-Clark, B.A.; Lagas, P.; Driever, S.M.; Zwinkels, J.; Bij de Vaate, J.; Kaarsemaker, R.C. (2010)

40kg Paprika, Rapport Wageningen UR Glastuinbouw

Garcia Victoria, N.; Kempkes, F. (2012, in press)

Effect van diffuus kasdek met Anti Reflectiecoating bij Roos, Wageningen: Wageningen UR, Glastuinbouw (Nota / Wageningen UR, Glastuinbouw 1128)

Hemming, S.; Jongschaap, R.E.E.; Janse, J.; Dueck, T.A. (2007A)

Effecten van diffuus licht op komkommer : resultaten van een teelt experiment Wageningen : Wageningen UR, Glastuinbouw (Nota / Wageningen UR, Glastuinbouw 446)

Hemming, S.; Van Noort, F.; Hemming, J.; Dueck, T. (2007B)

Effecten van diffuus licht op potplanten. Resultaten van een teeltexperiment, Wageningen: Wageningen UR, Glastuinbouw (Nota / Wageningen UR, Glastuinbouw 454)

Ruigrok, J.; Swinkels, G.L.A.M. (2010)

Lichtmeetprotocol kasdekmaterialen, TNO-rapport: 034-DTM-2010-03385

Sarlikioti, V.; De Visser, P.H.B.; Marcelis, L.F.M. (2011)

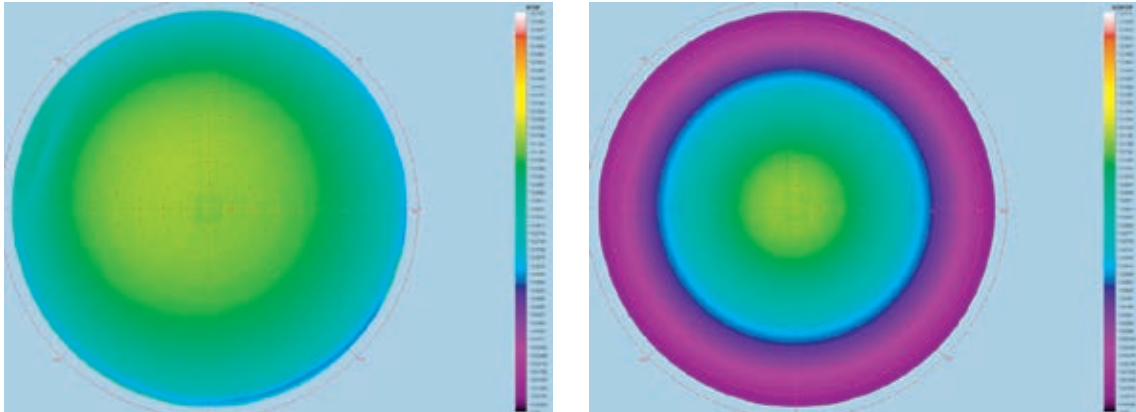
Exploring the spatial distribution of light interception and photosynthesis of canopies by means of a functional-structural plant model, *Annals of Botany* 107 (2011): pp. 875-883

Yeo, R. (2006)

The Imaging Sphere™, the First Appearance Meter?, NPL/CORM 5th Oxford Conference, June 2006

Bijlage I Weergave lichtspreading

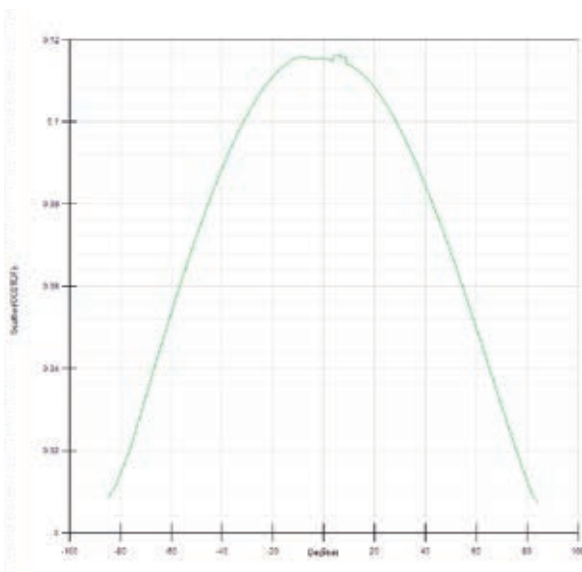
De lichtspreading, zoals gemeten op de Imaging Sphere for Scatter and Appearance measurement, kan op verschillende manieren worden weergegeven. Er is een verschil tussen lichtspreading uitgedrukt in BTDF en een cosinus gecorrigeerde weergave van de BTDF. De BTDF is een weergave van de lichtspreading zoals die te zien is op de bolwand in de meetopstelling. De cosinus gecorrigeerde BTDF geeft weer hoe het licht verspreid wordt over plat vlak. Beide meetresultaten zijn weergegeven in Figuur I.1.



Figuur I.1. BTDF meetwaarde en de cosinus gecorrigeerde BTDF waarde van een Lambertiaanse diffusor

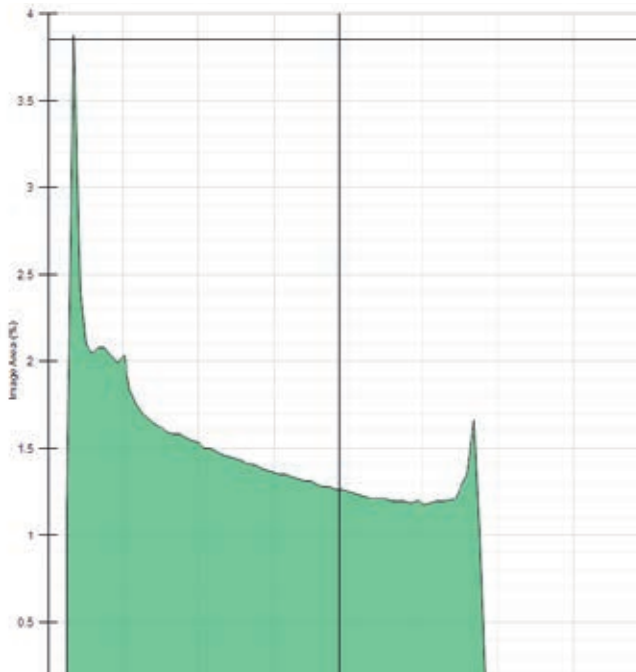
In Figuur I.1 is te zien dat een Lambertiaanse diffusor op een bolwand ervoor zorgt dat de lichtintensiteit op elk punt van de halve bol ongeveer even hoog is. Op het platte vlak, zoals in het rechter deel van Figuur I.1, neemt de intensiteit naar de buitenkant van de Figuur af, doordat een steeds groter oppervlak beschreven moet worden door dezelfde hoeveelheid licht.

Met de software van de gebruikte meetopstelling kan een doorsnede van de lichtspreading gemaakt worden, zoals weergegeven in Figuur I.2. Er kan gekozen worden in welke richting de doorsnede gemaakt moet worden. Met deze Figuur kan er goed gezien worden over welke hoeken het licht verspreid wordt.



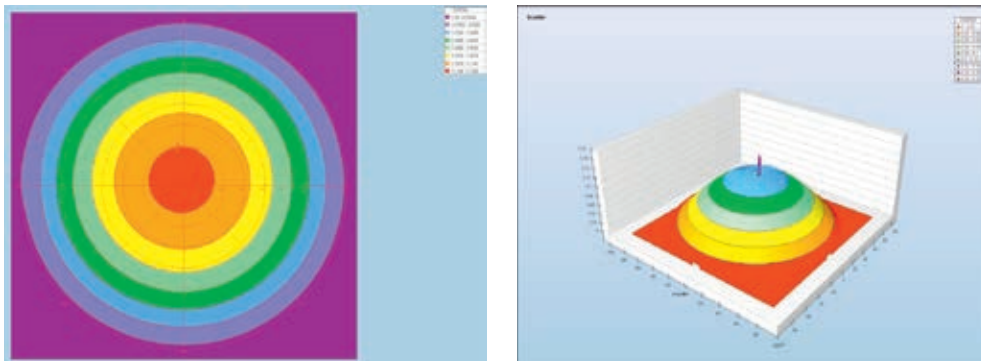
Figuur I.2. Dwarsdoorsnede van de lichtspreading van een Lambertiaanse diffusor.

Figuur I.3 laat een Histogram zien waarin wordt aangegeven hoeveel procent van het oppervlak een bepaalde CCBTDF-waarde heeft. In dit onderzoek wordt hier niets mee gedaan.



Figuur I.3. Histogram van een Lambertiaanse diffusor.

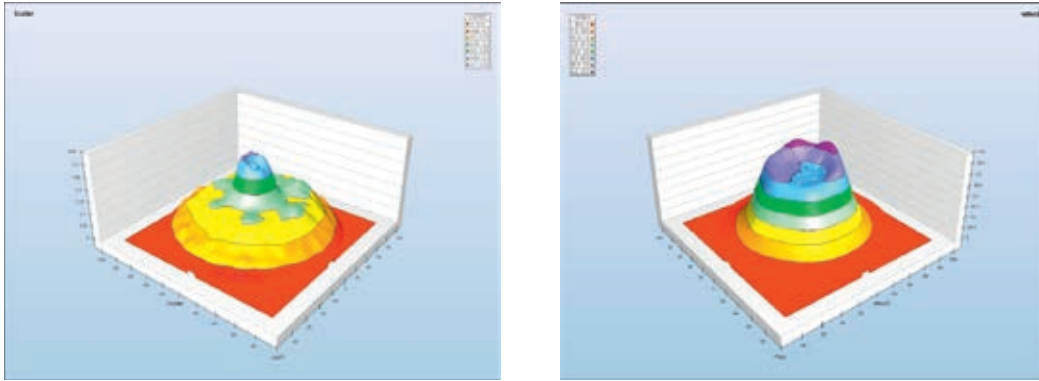
Daarnaast kan de lichtspreading ook nog weergegeven worden in 2D- en 3D-isoplots, weergegeven in Figuur I.4. Een 2D-isoplot van de CCBTDF waarde laat goed zien hoe het licht vanuit een puntbron verspreid wordt op een plat vlak.



Figuur I.4. 2D- en 3D-isoplots van een Lambertiaanse diffusor.

Bijlage II Dubbelzijdig gestructureerd materiaal

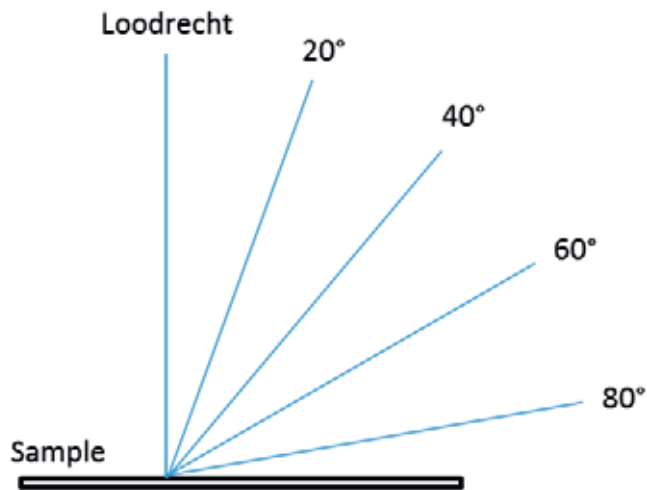
Bij samples waar aan beide zijden van het materiaal een (andere) structuur zit met een effect op de spreiding van licht dat door het materiaal heen gaat, ontstaat een ander spreidingspatroon wanneer het sample omgedraaid wordt ten opzichte van de lichtbron. Figuur II.1 laat zien dat voor sample 7 de lichtspreading verandert wanneer het sample wordt omgedraaid. De F-scatter van de spreiding in sample 7 verandert echter niet zoveel bij het omdraaien van het sample. Dit wil niet zeggen dat dit geldt voor alle samples met aan beide zijden een structuur dat een effect op licht heeft.



Figuur II.1. 3D-isoplots van sample 7 met een verschillende oriëntatie van het sample. De F-scatter is respectievelijk 94,4% en 93,1%.

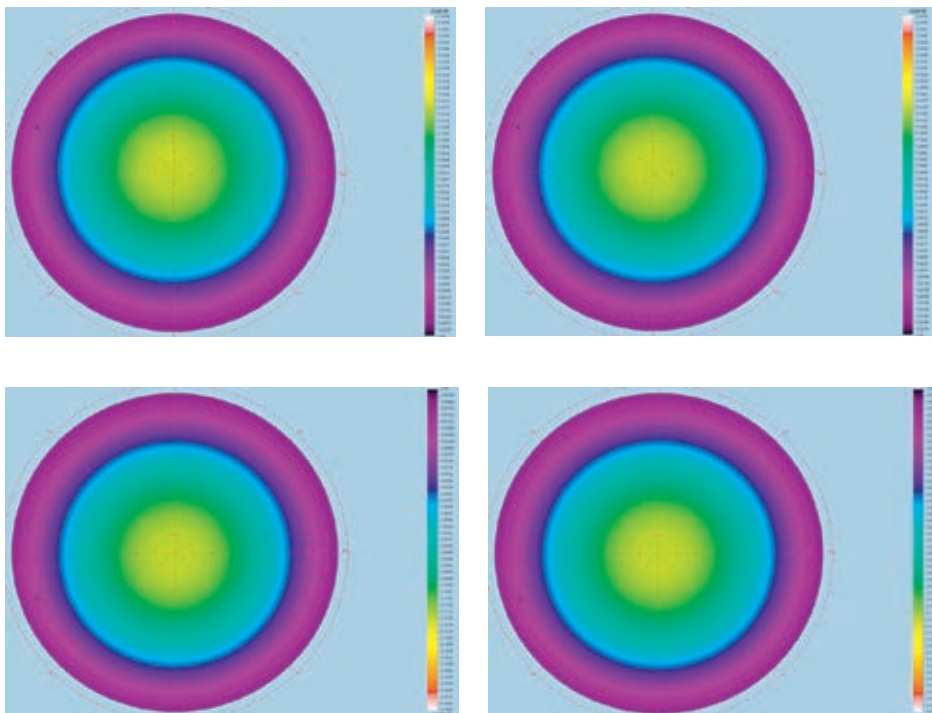
Bijlage III Hoekafhankelijke spreidingsmeting

Met de Imaging Sphere for Scatter and Appearance measurement kan naast de spreiding van licht voor loodrecht invallende straling, ook de lichtspreiding gemeten worden voor onder hoeken invallende straling. In deze Bijlage wordt een idee gegeven van het effect dat onder hoeken invallend licht heeft op de spreiding van het licht door een sample. Figuur III.1 geeft aan hoe de hoeken van inval zijn gespecificeerd.



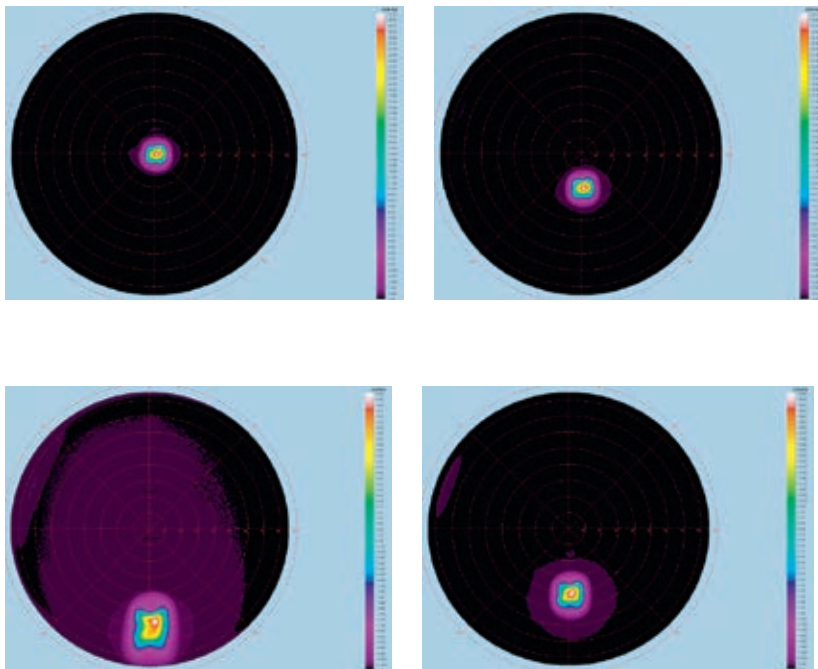
Figuur III.1. Hoeken van instraling.

Figuur III.2 geeft de lichtspreiding weer van een Lambertiaanse diffusor onder verschillende hoeken. Hieruit blijkt dat lichtspreiding bij een Lambertiaanse diffusor onafhankelijk is van de richting van het inkomende licht. Linksboven beginnend neemt de hoek van instraling met de klok mee steeds 20° toe, vanuit de richting van de kijker gezien naar boven.



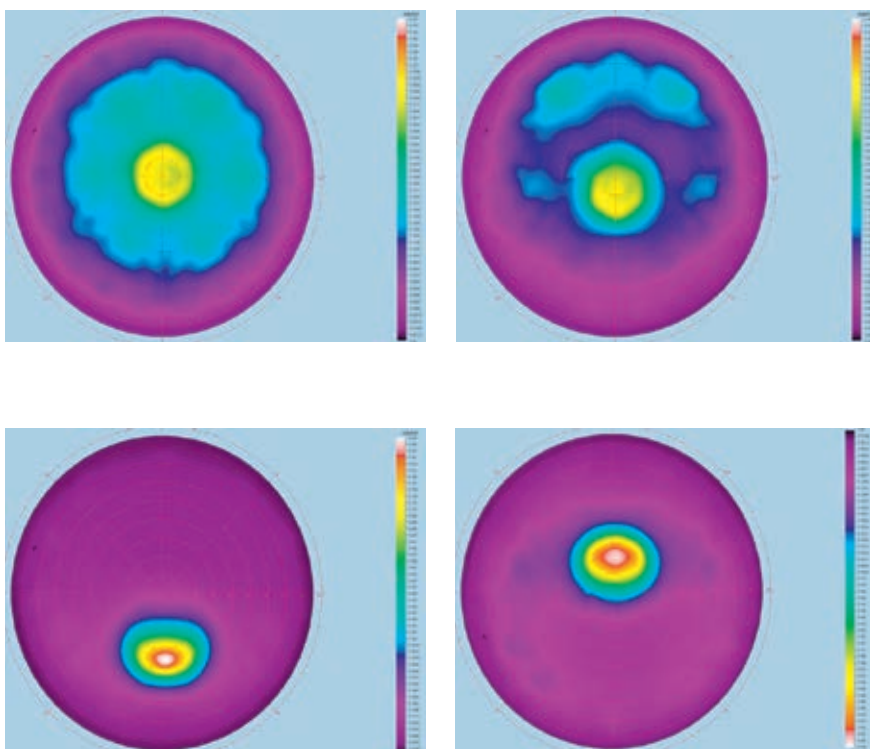
Figuur III.2. Hoekafhankelijke metingen van een Lambertiaanse diffusor, vanaf linksboven met de klok mee in hoek toenemend van 0° tot 60°.

Wanneer dezelfde Figuur gemaakt wordt voor Sample 3 (één van de samples die gebruikt is in de plantproeven met diffuus glas), is te zien dat het spreidingsgebied van het sample iets groter wordt (dankzij het grotere oppervlak dat beschenen wordt) en dat het gelijk aan de hoek van instraling opschuift naar beneden. Dit is duidelijk te zien in Figuur III.3.



Figuur III.3. Hoekafhankelijke metingen van Sample 3, vanaf linksboven met de klok mee in hoek toenemend van 0° tot 60°.

Sample 7, met diffuse structuren aan beide zijden van het materiaal, reageert iets anders op het veranderen van de hoek van inval van de lichtbundel, te zien in Figuur III.4.



Figuur III.4. Hoekafhankelijke metingen van Sample 7, vanaf linksboven met de klok mee in hoek toenemend van 0° tot 60°.

Het is niet duidelijk welke lichtspreading beter is voor planten en in hoeverre dit effect al meespeelt in de proeven met diffuus licht zoals uitgevoerd in Bleiswijk.

