

4.2 Welke optische eigenschappen zijn relevant en waarom?

Alle binnenkomende straling in de kas moet eerst het kasomhullingsmateriaal en eventueel het schermmateriaal passeren. Onder de optische eigenschappen van een materiaal worden die eigenschappen verstaan die van invloed zijn op het gedrag van elektromagnetische golven die op het materiaal vallen. Het gaat hier om twee zaken: wat gebeurt er met de globale straling die van buiten op het materiaal valt en wat gebeurt er met de warmtestraling die van binnen naar het materiaal en die van het materiaal naar de hemel wordt gestraald.

De optische eigenschappen van een materiaal worden gekenmerkt door de transmissie, de reflectie en de absorptie. Deze drie eigenschappen geven respectievelijk aan welk gedeelte van de opvallende straling wordt doorgelaten, gereflecteerd of geabsorbeerd. De som van deze drie waarden is gelijk aan 1 voor een bepaald golflengtegebied. Omdat we geïnteresseerd zijn in de effectieve transmissie, reflectie en absorptie voor een golflengtegebied (b.v. PAR, NIR) moeten integraties plaatsvinden van zowel de invallende straling als de doorgelaten straling. Als in dit golflengtegebied een gevoeligheidscurve geldt moet deze bij de integratie in rekening worden gebracht.

Zodoende volgt de effectieve transmissie τ_{eff} voor loodrecht invallend zonlicht uit de verhouding van de doorgelaten en de ingestraalde energie. Deze worden berekend uit de spectrale transmissie τ_λ voor loodrecht invallend licht en de spectrale stralingsintensiteit S_λ van het loodrecht invallende zonlicht volgens:

$$\tau_{eff} = \frac{\int \tau_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int S_\lambda d\lambda}$$

De integratie is tussen de golflengtes van het betreffende golflengtegebied.

Voor de transmissie voor loodrecht invallende PAR straling τ_{PAR} moet rekening worden gehouden met de PAR gevoeligheidscurve die aangeeft welk deel c_λ van de straling bij een bepaalde golflengte relevant is voor de gewasgroei. Zodoende wordt dan:

$$\tau_{PAR} = \frac{\int \tau_\lambda c_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int c_\lambda S_\lambda d\lambda}$$

De reflectie en absorptie over een golflengtegebied voor loodrecht invallende straling worden op een vergelijkbare manier berekend uit de spectrale waarden door integratie over het betreffende golflengtegebied. Naast de transmissie, reflectie en absorptie voor loodrecht invallende straling zijn deze ook relevant voor diffuus invallende straling. Zodoende moet voor de transmissie voor diffuse straling ook geïntegreerd worden over alle invalshoeken.

Een andere eigenschap die veel wordt gebruikt, is de emissiecoëfficiënt. Deze geeft aan hoeveel straling het materiaal zelf afgeeft vergeleken met een ideaal ‘zwart lichaam’ bij dezelfde temperatuur. Voor elk materiaal geldt dat voor dezelfde golflengte de absorptie gelijk is aan de emissie. Omdat we in de praktijk te maken hebben met temperaturen tussen min 10 °C en plus 40 °C, worden bij zichtbaar licht meestal de termen transmissie, reflectie en absorptie gebruikt en

bij warmtestraling de term emissie. Ook hier geldt dat de emissiecoëfficiënt spectraal bepaald is. Zodat de effectieve waarde volgt uit integratie over het golflengtegebied. Zij is evenwel al gebaseerd op een oppervlak als diffuse straler.

4.2.1 PAR transmissie

4.2.1.1 Transmissie voor directe en diffuse straling

Er moet onderscheid worden gemaakt tussen diffuse en directe straling. Het directe aandeel van de globale straling is de zonnestraling welke direct vanaf de zon het aardoppervlak bereikt zonder gereflecteerd te worden. Deze straling valt dus in met de invalshoek die door de stand van de zon wordt bepaald. Op heldere dagen is het grootste aandeel van de straling directe straling. Ook dan wordt een deel verstrooid door de atmosfeer en dat deel bereikt het aardoppervlak als diffuse straling. Op bewolkte dagen is het grootste aandeel van de straling diffuus (hoofdstuk 2.3)

Zowel directe als diffuse straling vallen op de buitenkant van de kas. Een helder transparant kasomhullingsmateriaal laat het grootste gedeelte van het invallende licht door. Afhankelijk van de invalshoek treden reflectieverliezen op. Bij loodrecht invallend licht zijn deze reflectieverliezen ca. 8% en 2-4% van de straling wordt geabsorbeerd. Het resultaat is een lichttransmissie voor loodrecht licht van ca. 90%. Bij een invalshoek groter dan 45 graden nemen de reflectieverliezen snel toe, de transmissie neemt snel af (Figuur 27). Zodoende is de reflectie voor direct zonlicht in de winter zeer hoog en de transmissie zeer laag (Zabeltitz, 1986). De daggemiddelde transmissie voor direct zonlicht kan zodoende in de winter uitkomen op slechts ca 35 - 40% bij een nokrichting noord-zuid. De lichttransmissie kan ook aanzienlijk verlaagd worden door een verhoogde absorptie in het geval van verontreinigingen van het kasomhullingsmateriaal, dit kan de lichttransmissie van een materiaal meer dan 10% reduceren.

Lichtinval vanuit alle hoeken van de hemelbol, zoals optreedt bij bewolkt weer, wordt diffuus invallend licht genoemd. Hierbij is de hemelbol over het algemeen niet homogeen verlicht maar neemt de intensiteit af naar de horizon.

In West-Europese landen is de doorlatendheid voor diffuus licht bepalend voor de plantengroei, omdat gedurende het grootste deel van het jaar er bewolking is. In het winterseizoen is 75% van de invallende stralingssom diffuus. De transmissie van een kasomhullingsmateriaal voor diffuus invallend licht is ca. 10% lager dan die voor direct invallend licht, omdat de lichttransmissie bij toenemende invalshoeken afneemt.

Bij direct zonlicht zijn de lichtverschillen tussen plekken met en zonder slagschaduw in de kas zeer groot. Zonder slagschaduw wordt er in de kas nog ca. 86% van de lichtintensiteit buiten gemeten. Op plaatsen met slagschaduw valt dit terug tot ca. 40%, enigszins afhankelijk van de breedte van de schaduwbaan. De oppervlakte van de slagschaduw en de plaatsen in de kas waar ze voorkomt varieert met de stand van de zon. Een structureel lager lichtniveau op sommige plekken zal altijd tot uiting komen in een afwijkende productie of productkwaliteit. Zodra in of onder het dek het invallend licht diffuus verdeeld wordt gaat de uniformiteit in gemeten lichtintensiteit op plantniveau omhoog.

Bij diffuus licht, dus bij bewolkt weer, zijn de lichtverschillen relatief klein. Onder de goten en onder de spanten, c.q. tralies, wordt de laagste intensiteit gemeten, onder de nok tussen de spanten de hoogste. Het verschil dat wordt gemeten is afhankelijk van de hoogte van de kas en de breedte van de aanwezige constructiedelen.

PAR transmissie ombulling

In principe is de lichttransmissie van een kasomhullingsmateriaal afhankelijk van het type materiaal. Glas heeft een doorlatendheid van 89-91% voor loodrecht invallend licht, polymeren zoals ETFE of PVDF hebben een loodrechte doorlatendheid van 93-94%. Een traditionele kanaalplaat van PC heeft een loodrechte transmissie van 80%, een kanaalplaat van PMMA een loodrechte transmissie van rond de 89%. In Tabel 13 worden de doorlatendheden van verschillende gebruikelijke kasomhullingsmaterialen voor loodrechte PAR straling aangegeven, terwijl in Tabel 14 de doorlatendheden van verschillende gebruikelijke kasomhullingsmaterialen voor diffuse PAR straling zijn aangegeven. Deze is voor glas 82%, voor een traditionele PE- of EVA-folie rond de 81-82%, maar voor nieuwe materialen zoals ETFE is deze transmissie 88%. Een traditionele kanaalplaat van PC heeft een transmissie van 61% voor diffuus invallende straling en een kanaalplaat van PMMA een transmissie van rond de 76%.

Tabel 13 Doorlatendheid voor loodrechte PAR straling van verschillende kasomhullingsmaterialen

Materiaal	Dikte	Transmissie
Glas	4 mm	89-91%
PE folie	200 µm	89-91%
PE-IR folie	200 µm	89-91%
PE-Antidrop folie	200 µm	89-90%
EVA folie	180 µm	90-91%
PVC folie	200 µm	87-91%
ETFE folie	100 µm	93-95%
PVDF folie	100 µm	93-94%
PC plaat	12 mm	80%
PMMA plaat	16 mm	89%
PC zigzagplaat (dubbel)	25 mm	88%

Tabel 14 Doorlatendheid voor diffuse PAR straling van verschillende kasomhullingsmaterialen

Materiaal	Dikte	Transmissie
Glas	4 mm	82%
PE folie	200 µm	81%
EVA folie	180 µm	82%
ETFE folie	100 µm	88%
PVDF folie	100 µm	85%
PC plaat	12 mm	61%
PMMA plaat	16 mm	76%
PC zigzagplaat (dubbel)	25 mm	79%

PAR transmissie scherm

Als een scherm als schaduw scherm moet functioneren is vooral de PAR transmissie van belang. De PAR transmissie wordt door een schaduwdoek verlaagd. Bij voorkeur is de absorptiefactor in dat geval zo laag mogelijk, omdat alle geabsorbeerde straling in warmte wordt omgezet, die via ventilatie weer uit de kas moet verdwijnen.

Als een scherm primair als verduisteringsscherm moet functioneren, moet de PAR transmissie kleiner dan 0,001 zijn, ook ver-rode straling moet buiten gehouden worden.

Bij schermen die als energiescherm moeten functioneren zijn de optische eigenschappen in het zichtbare licht niet in eerste instantie van belang. Zou het veel voorkomen dat een dergelijk scherm gebruikt moet worden gedurende de dagperiode, dan is het gewenst dat de PAR transmissie zo hoog mogelijk is. In dat geval kan geen gealuminiseerd materiaal worden gebruikt, omdat daarvan de transmissie klein is.

Een geopende scherminstallatie vormt een opmerkelijk brede lichtdichte baan. Globaal treden er verschillen op in lichtintensiteit van ca. 10%. Deze verschillen veranderen echter niet van plaats. In een kas met een gesloten scherm in de lichtverdeling vrijwel egaal. Dit geldt voor alle schermmaterialen die zorgen voor diffuse straling onder het scherm.

4.2.1.2 Diffusiteit

Een ander belangrijk aspect is de mate van lichtverstrooiing door het kasomhullingsmateriaal. Dit wordt de diffusiteit van een materiaal oftewel de 'Haze' genoemd. De Haze is sterk afhankelijk van de oppervlaktestructuur of de aanwezigheid van bepaalde pigmenten. De diffusiteit van een kasomhullingsmateriaal is belangrijk voor de plantengroei. De bladtemperatuur in direct zonlicht daalt met toenemende diffusiteit, daardoor kunnen directe verbrandingsverschijnselen op bladeren en bloemen voorkomen worden. Daarnaast wordt het licht in de kas beter verspreid, slagschaduw ontstaat niet, het lichtniveau in de kas is meer uniform en het licht kan dieper in het gewas doordringen.

De Haze van kasomhullingsmaterialen varieert sterk, veel folies hebben een Haze van 25-30%. Bij een Haze van meer dan 50% worden de materialen diffuus genoemd.

4.2.1.3 Invloed constructiedelen, gevels, oriëntatie kas, dakhelling en invalshoek van de zonnestraling

Oriëntatie kas

De oriëntatie van de kas speelt ook een rol, namelijk indien de nok van de kas in oost-west richting gesitueerd wordt geeft dit de hoogste lichtdoorlatendheid in de wintermaanden (Tabel 15). Over het hele jaar genomen is de nokoriëntatie noord-zuid iets gunstiger (Elsner et al, 2000).

Tabel 15 Invloed van de oriëntatie van de kas op de lichtsom in Wh m⁻² d⁻¹

Week nummer	Oriëntatie van de kas	
	Oost-West	Noord-Zuid
2 (januari)	379	293
4 (januari)	426	322
6 (februari)	578	530
10 (maart)	1243	1226
14 (april)	1955	2104
20 (juni)	2720	2969
Totale jaar	588000	609000

Dakhelling

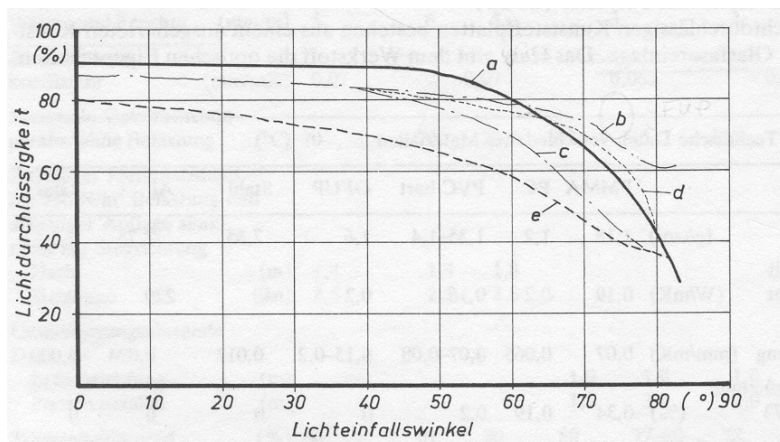
Uit onderzoek van Stoffers (1968) blijkt dat de invloed van de dakhelling van een kas met vlakke (glas)platen op zowel de ideaal diffuse straling als op de directe zonnestraling slechts gering is, zelfs in de wintermaanden bij lage zonnestand. De invloed van de oriëntatie is in dit geval belangrijker. In Tabel 16 zijn aangegeven de lichtdoorlatendheden bij drie verschillende dakhellingen bij schoon glas en zonder constructiedelen (theoretisch gedacht) bij diffuus licht en bij directe zonnestraling. De doorlatendheden zijn berekend voor de data 2 en 29 januari van 9.00 tot 15.00 uur. Globaal geeft een wijziging van de dakhelling van 10° gemiddeld een verbetering van de lichtdoorlatendheid van 1% bij zowel diffuse als directe straling.

Tabel 16 Invloed van de dakhelling op de transmissie van de kas (zonder constructiedelen) bij drie verschillende dakhellingen bij diffuus en direct stralingsinval

Oriëntatie Kas	Dakhelling in graden	Gemiddelde doorlatendheid in%		
		Diffuse straling	Directe straling op 2 januari	Directe straling op 29 januari
N-Z	20	85	60	65
	30	86	64	69
	40	87	65	69
O-W	20		75	73
	30		76	75
	40		74	74

Invalshoek straling op materiaal

De afhankelijkheid van de lichtdoorlatendheid van de invalshoek van de zonnestraling op een kasomhullingsmateriaal blijkt ook uit Figuur 27, waarbij op de verticale as de lichtdoorlatendheid is af te lezen en op de horizontale as de afwijking van de hoek loodrecht op het vlak in graden. Golfplaten hebben bij een lage zonnestand een hogere lichttransmissie dan enkel glas. In Figuur 27 is ook duidelijk het verschil tussen golfplaten b en c te zien, waarbij de golfrichting van materiaal b is aangebracht loodrecht op de invalshoek van het licht en die van materiaal c evenwijdig aan de lichtinvalshoek.



Figuur 27 Invloed van de invalshoek van de zonnestraling op de transmissie van verschillende kasdekmaterialen (horizontale as: afwijking van de hoek loodrecht op het vlak).

a = enkelglas,

b = glasvezelversterkte polyester golfplaten (golven loodrecht op de lichtinvalshoek),

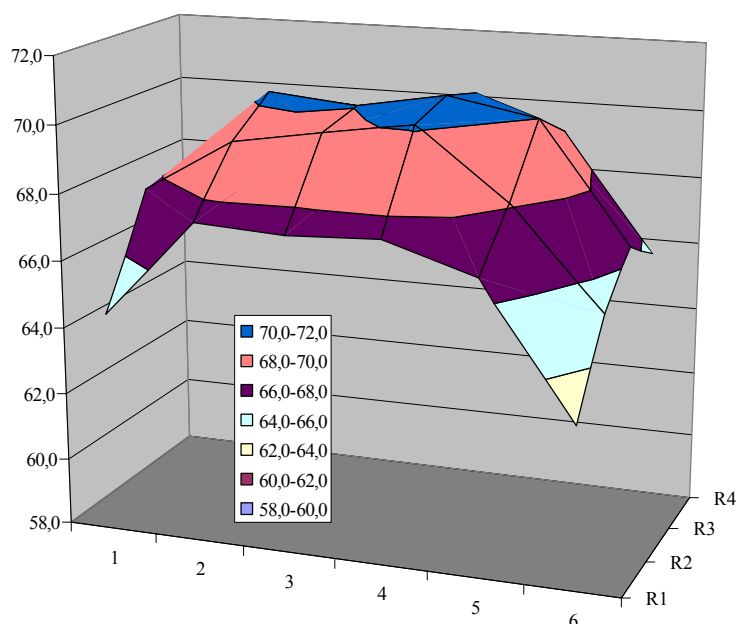
c = idem als b, echter hier golven evenwijdig aan de lichtinvalshoek,

d = PVC-plaat met trapeziumvormige doorsnede,

e = combinatie van noppenfolie en glas.

Constructiedelen

Bij direct zonlicht ontstaan lichtverschillen tussen plekken met en zonder slagschaduw. Zonder slagschaduw wordt er in de kas ca. 86% gemeten van de lichtintensiteit buiten. Op plaatsen met slagschaduw valt dit terug tot ca. 40%, enigszins afhankelijk van de breedte van de schaduwbaan. De oppervlakte van de slagschaduw en de plaatsen in de kas waar ze voorkomt varieert met de stand van de zon.



Figuur 28 Lichtverdeling in een vak tussen vier poten van een breedkapper, % buitenlicht bij bewolkt weer (PPO, eigen metingen)

Bij diffuus licht, bewolkt weer, zijn de lichtverschillen relatief klein. Onder de goten en onder de spanten, c.q. tralies, wordt de laagste intensiteit gemeten, onder de nok tussen de spanten de hoogste (Figuur 28). Het verschil dat wordt gemeten is afhankelijk van de hoogte van de kas en de breedte van de aanwezige constructiedelen. Een geopende scherminstallatie, indien aanwezig, vormt een opmerkelijk brede lichtdichte baan. Globaal treden er verschillen op in lichtintensiteit van -5% tot $+3\%$ (Figuur 28). Deze verschillen veranderen echter niet van plaats.

In een kas met een gesloten scherm in de lichtverdeling ook vrij egaal. Dit geldt voor alle schermmaterialen die zorgen voor diffuse straling onder het scherm.

Gevels

Langs buitengevels ontvangen de gewassen vaak meer licht dan midden in de kas. Het licht dat via de gevel de kas invalt wordt in mindere mate geabsorbeerd door constructiedelen en, afhankelijk van de lichtinval, minder of juist sterker gereflecteerd. In concentratiegebieden waar de kassen dicht op elkaar staan, en elkaar beschaduwden, kan het voordeel omslaan in een nadeel, zie effect tussengevels.

Langs tussengevels gaat licht verloren door absorptie van constructiedelen en glas. De reflectie van het licht tegen het glas zorgt, bij ongelijke belichting van de twee kanten, voor ongelijkheid. Langs de sterker belichte kant van de gevel kan de reflectie het lichtverlies opheffen of zelfs overtreffen. De minder belichte zijde ondervindt het negatieve effect van de lichtonderschepping in versterkte mate.

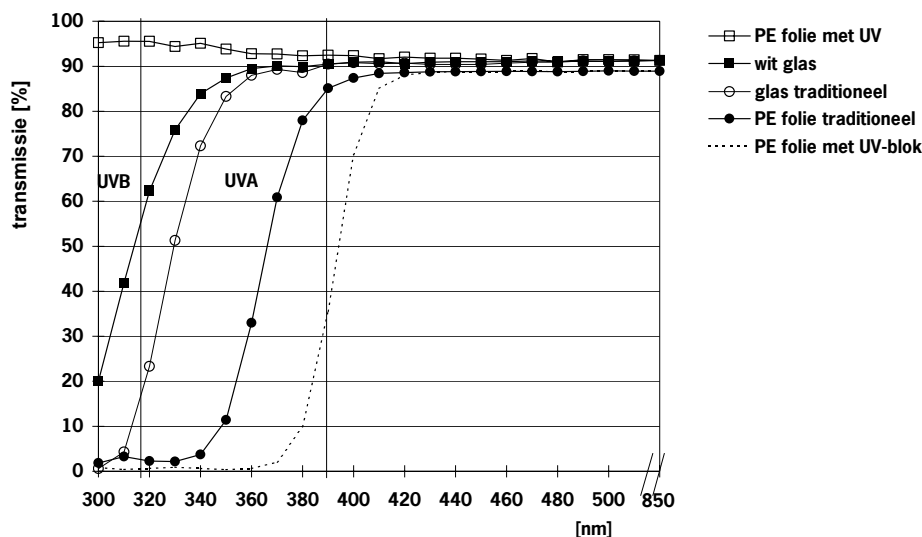
Lichtdicht maken van de gevels wordt in de praktijk reeds toegepast op bedrijven die assimilatiebelichting toepassen en de gevels met vaste witte schermfolies afspannen tot boven de lampen ter voorkoming van lichtuitstraling.

Effect lichtverdeling op sturing naar gewenst product (uniformiteit)

Een structureel lager lichtniveau op sommige plekken zal altijd tot uiting komen in een afwijkende productie of productkwaliteit. Naarmate de eisen ten aanzien van uniformiteit groter worden zal dit een toenemend ongewenst effect zijn

4.2.2 UV transmissie

De ultraviolette straling is het aandeel van de globale straling met korte golflengtes en dus een hoog energiegehalte. Algemeen worden twee UV golflengtebanden onderscheiden: UV-A (315-400 nm) en UV-B (280-315 nm). Traditioneel tuinbouwglas laat bijna geen UV-B straling door, alleen een groot gedeelte van de UV-A straling (vanaf 315 nm). Recent is er speciaal witglas op de markt gebracht, dit laat wel een gedeelte van de UV-B straling door. Figuur 29 geeft een overzicht van de UV doorlatendheid van een aantal kasomhullingsmaterialen. De meeste kasfolies zijn niet doorlatend voor UV-B straling, ze laten maar een klein gedeelte van de UV-A (boven de 360 nm) door. Er bestaan ook folies en platen, die alle UV-B en UV-A straling (beneden de 400 nm) eruit filteren. ETFE, PVDF en PMMA-platen laten zowel UV-B als ook UV-A straling door. Platen van PC laten helemaal geen UV-B en UV-A straling door.



Figuur 29 UV transmissie van verschillende kasomhullingsmaterialen

4.2.3 NIR transmissie

Het grootste gedeelte van de NIR straling (700-3.000 nm) in de globale straling is niet nodig voor de plantenfotosynthese. Het wordt geabsorbeerd door het gewas, de bodem, de kasconstructie en de kasinrichting en omgezet in warmtestraling. Een gedeelte wordt ook gereflecteerd. Het aandeel absorptie en reflectie binnen de kas is afhankelijk van de eigenschappen en de hoogte van het gewas, het reflectievermogen van de bodem en de constructiedelen. Afhankelijk van de optische eigenschappen van het kasomhullingsmateriaal, wordt de gereflecteerde NIR straling weer naar buiten gelaten. De opgenomen straling in de kas wordt, afhankelijk van de oppervlakte temperatuur, omgezet in warmtestraling (FIR straling), die wel of niet door het kasdek wordt doorgelaten naar buiten (dit wordt verder besproken in hoofdstuk 4.2.4).

In gebieden met een hoge intensiteit van de zonnestraling zijn hoge temperaturen in de kas de beperkende factor voor de gewasproductie in de zomermaanden. Dat is de reden waarom in Zuid-Europese landen de gewasproductie in de kas vooral in de wintermaanden plaatsvindt. Voor deze gebieden zou het zinvol zijn om kasomhullingsmaterialen te ontwikkelen met een hoge reflectie van de NIR straling. Hierdoor komt er minder energie in de kas binnen, waardoor de opwarming minder wordt. Ook voor West-Europese landen kunnen dit soort ontwikkelingen bijdragen aan het meer gesloten houden van kassen in de zomermaanden. Aan de andere kant wil men in de wintermaanden zo veel mogelijk energie binnenhalen om een deel van de verwarmingsbehoefte te dekken. Een variabel schermmateriaal met NIR reflectie, wat in de zomermaanden ook overdag dicht wordt getrokken, kan hier een oplossing bieden.

4.2.4 FIR transmissie

De transmissie van een kasomhullings- of schermmateriaal voor langgolvlige warmtestraling (FIR straling) heeft een grote invloed op de energiehuishouding van een kas. De in de kas komende globale straling wordt door in de kas aanwezige planten, bodem, kasconstructie en kasinrichting geabsorbeerd en gedeeltelijk gereflecteerd. Geabsorbeerde straling zorgt voor het opwarmen van deze delen. Een warm lichaam geeft deze warmte weer af o.a. in de vorm van warmtestraling, die volgens Stefan-Boltzmann afhankelijk is van de oppervlaktetemperatuur. Als een kasomhullings- of schermmateriaal niet doorlatend is voor warmtestraling, absorbeert deze de warmtestraling. Het kasdek zal zelf weer warmtestraling naar de hemel emitteren. Het resulterende warmteverlies is echter lager dan bij een FIR doorlatend dek. De doorlatendheid van een kasomhullings- of schermmateriaal voor warmtestraling heeft dus direct invloed op de energiebehoefte. Als een kasomhullingsmateriaal doorlatend is voor warmtestraling, kan in koude, heldere nachten in een onverwarmde kas de kasluchttemperatuur zelfs beneden de buitentemperatuur dalen, ook kan stralingsvorst aan het gewas ontstaan, omdat er een directe stralingsuitwisseling tussen relatief warm gewas en de koude hemel plaatsvindt.

Glas en natte materialen zijn nauwelijks of niet doorlatend voor FIR straling. De FIR transmissie hangt af van het type en de dikte van het materiaal. Met toenemende dikte neemt de FIR transmissie af. Basis PE-folies (droog) hebben een hoge FIR transmissie, welke door het toevoegen van speciale IR absorberende pigmenten verlaagd kan worden. In EVA-folies zorgt vinylacetaat (VA) voor de FIR absorptie. PMMA en PC zijn niet doorlatend voor warmtestraling.

Als de FIR doorlatendheid van materialen kleiner dan 20% is, worden deze materialen “thermisch” genoemd.

Voor de energieschermen spelen zowel de FIR reflectie als transmissie een grote rol. Om de warmtestraling zo veel mogelijk te blokkeren is het nodig dat de FIR transmissie zo klein mogelijk is. Vervolgens zal naarmate de FIR reflectie hoger is het warmteverlies van het gewas via warmtestraling lager zijn. Bij een gegeven transmissie neemt de emissie af bij toenemende reflectie (hoofdstuk 4.2.4 en 4.2.5).

Tabel 17 geeft de doorlatendheid voor langgolvlige warmtestraling van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen weer.

Tabel 17 Doorlatendheid voor langgolvlige warmtestraling (FIR straling) van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen

Materiaal	Dikte	Transmissie voor warmtestraling
Glas	4 mm	0%
PE folie	200 µm	40-60%
PE-IR folie	200 µm	20-40%
EVA folie	180 µm	20-40%
ETFE folie	100 µm	15-20%
PC plaat	12 mm	0%
PMMA plaat	16 mm	0%
Gebreid polyester wit	140 g m ⁻²	22%
Gebreid polyester wit	150 g m ⁻²	11%
Gebreid polyester zwart		5%
Polyester weefsel wit		12%
Polyester weefsel zwart		12%
Polyester weefsel transparant		ca. 50%
Polyester weefsel gealuminiseerd		3%
Zwart folie		0%

4.2.5 Emissie

De emissiecoëfficiënt van een kasomhullings- of schermmateriaal heeft bij een droog materiaal ook grote invloed op de energiehuishouding van de kas. Zij geeft aan hoeveel straling door het oppervlak wordt geëmitteerd ten opzichte van een zwarte straler (emissiecoëfficiënt= 1) met dezelfde oppervlaktetemperatuur. De emissiecoëfficiënt is gelijk aan de absorptiecoëfficiënt van het materiaal in hetzelfde golflengtegebied, dus bij dezelfde oppervlaktetemperatuur. Door absorptie van warmtestraling vanuit andere oppervlakken warmt het materiaal op, ook wordt warmtestraling afgegeven afhankelijk van zowel de oppervlaktetemperatuur als de emissiecoëfficiënt van het materiaal. Een uniform materiaal heeft aan beide kanten dezelfde emissiecoëfficiënt, materialen met een verschillende boven- en onderkant variëren in emissiecoëfficiënt. Een nat kasomhullings- of schermmateriaal, veroorzaakt door condensatie of regen, heeft altijd een emissiecoëfficiënt van >0,8. In Tabel 18 worden de emissiecoëfficiënten van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen weergegeven voor het FIR golflengtegebied.

Tabel 18 Emissiecoëfficiënten van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen (FIR straling)

Materiaal	Dikte	Emissiecoëfficiënt
Glas	4 mm	0,8
Hortiplus	4 mm	0,3
PE folie	200 µm	ca. 0,4
PE-IR folie	200 µm	ca. 0,7
EVA folie	180 µm	ca. 0,6
ETFE folie	100 µm	0,78
PC plaat	12 mm	0,83
PMMA plaat	16 mm	0,84
Gebreid polyester wit	140 g m ⁻²	63%
Gebreid polyester wit	150g m ⁻²	74%
Gebreid polyester zwart		75%
Polyester weefsel wit		78%
Polyester weefsel zwart		80%
Polyester weefsel transparant		50%
Polyester weefsel		0,6-0,7%
Zwart folie		0%

Samenvatting hoofdstuk 4.2

- Globale straling bestaat uit een direct en een diffuus stralingsaandeel. Omdat gedurende de winter ca. 75% van de globale straling diffuus is door bewolking, is naast de PAR transmissie voor direct invallend licht tevens de PAR transmissie voor diffuus invallend licht van belang. Afhankelijk van de invalshoeken treden reflectieverliezen op. Ook de dakhelling van de kas en de oriëntatie van kas is hierbij van belang.
- De lichtverstrooiing of haze van de kasomhullingsmaterialen is een maat voor de helderheid van het materiaal. Meer diffuus licht in de kas bevordert de lichtbenutting in een hoog gewas. Over de lichtverstrooiing van kasdek- en schermmaterialen is echter nog weinig bekend.
- De UV transmissie is afhankelijk van het type materiaal. Blank glas laat geen UV-B straling door, alleen grote gedeelten van de UV-A straling vanaf 320 nm. De meeste folies zijn niet doorlatend voor UV-B, ze laten maar een klein gedeelte van de UV-A straling boven de 360 nm door. Er bestaan ook folies en platen, die alle UV-B en UV-A straling (beneden de 400 nm) eruit filteren, zoals ETFE-folie en PMMA-platen. Anderen laten helemaal geen UV-B en UV-A straling door, zoals PC.
- De NIR straling is niet nodig voor de plantenfotosynthese maar draagt indirect bij aan de opwarming van de kas. Dit is een ongewenst effect in de zomer, maar zorgt in de winter voor een energiebesparend effect. Een variabel scherm met NIR reflectie kan hier mogelijk een oplossing bieden.
- De FIR transmissie (doorlatendheid voor langgolvlige warmtestraling) is afhankelijk van het type materiaal en de materiaaldikte. Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor FIR, ETFE in geringe mate en bij PE en EVA is dit afhankelijk van de samenstelling van de folies. Met toenemende FIR transmissie van het kasomhullings- of schermmateriaal stijgt het energieverbruik van de kas.
- De emissiecoëfficiënt van het materiaaloppervlak is ook belangrijk voor het energieverbruik van de kas. De emissiecoëfficiënt van glas, PMMA, PC is hoog. Door een lage emissiecoating kan deze verlaagd worden, het energieverbruik neemt dan af. De emissiecoëfficiënt van folie is lager en bij een droog materiaal dus gunstiger voor het energieverbruik.

4.3 Welke mogelijkheden zijn er om materiaaleigenschappen aan te passen?

4.3.1 Verhoging van de transmissie

4.3.1.1 Oppervlakte-coatings

Bij transparante materialen zal altijd een deel van het licht aan een grensvlak lucht / kasomhullingsmateriaal reflecteren. De lichtreflectie treedt op door de plotselinge verandering van de brekingsindices van lucht en het kasomhullingsmateriaal. Bij zowel lichtinval als bij lichtuitval treden reflectieverliezen op, die afhankelijk zijn van de invalshoek. Bij de ontwikkeling van een transparant kasomhullingsmateriaal moet er naar gestreefd worden om de reflectie zo klein mogelijk te houden.

Voor de beïnvloeding van de reflecties bij glas en kunststof plaatmaterialen kan gedacht worden aan het aanbrengen van oppervlakte-coatings, bij kunststof folies is dit lastiger, gezien het productieproces van deze folies en de geringe massa hiervan. Er zijn twee coating-methoden bekend om reflectievermindering te bereiken, namelijk op basis van interferentie-coatings en op basis van brekingsindexverlaging.

Coating met interferentielagen

Bij de eerste methode wordt gebruik gemaakt van interferentie van het licht in de opgebrachte coating(s). Door een coating met een laagdikte van een kwart van de golflengte (kwart lambda laag genoemd) oftewel $d = \lambda / (4n)$ (met d de laagdikte, λ de golflengte van het licht en n de brekingsindex) en een brekingsindex van $n_c = n$ te kiezen, ontstaat uitdoving van de gereflecteerde lichtgolf waardoor de reflectie afneemt en dus de transmissie toeneemt. Het probleem is dat de optimale uitdoving optreedt voor één golflengte en één invalshoek. Deze methode wordt vaak toegepast bij lenzen van fotoapparatuur, waarbij een groot aantal interferentielagen zorgt voor een werking over het gehele zichtbare gebied en waardoor de lenzen veelal een blauwe kleur hebben. Voor fotolenzen geldt dat de invalshoek bij normale brandpuntsafstanden binnen redelijke grenzen vrijwel loodrecht is. Voor kasomhullingsmaterialen zou door goede keuze van aantal lagen, materialen en diktes de transmissie voor het gewenste golflengtegebied kunnen worden geoptimaliseerd. Er is een fabrikant geweest die claimde een tweezijdig vierlaags gecoat tuinbouwglas op de markt te kunnen brengen met een lichttransmissie loodrecht van 96%, maar dit is helaas niet haalbaar gebleken.

Coating met lage brekingsindex

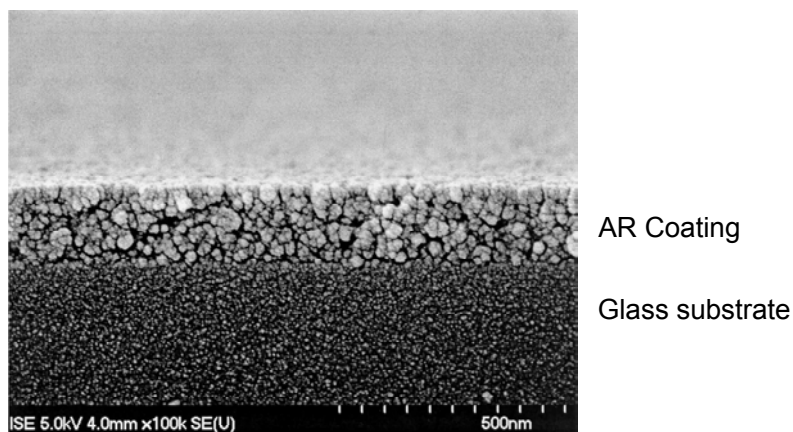
Een tweede methode is het aanbrengen van één of meerdere coating(s) met een lagere brekingsindex waardoor de reflectie afneemt. Omdat de reflectie sterk afhankelijk is van het brekingsindexverschil tussen beide media is het theoretisch mogelijk om met een groot aantal coatinglagen, waarbij de brekingsindex in iedere laag toeneemt tot de waarde van het kasomhullingsmateriaal zelf bereikt is, de reflecties op te heffen in een breed golflengtegebied. In

de praktijk blijken er echter geen materialen beschikbaar te zijn met een brekingsindex tussen 1,0 en 1,3 zodat deze opzet niet mogelijk is. Mede om financiële redenen wordt in de praktijk vaak één coatinglaag aangebracht met een brekingsindex van 1,3. Bepaalde kunststof coatings of anorganische materialen zoals fluorides hebben de gewenste lagere brekingsindex. Volgens Out en Breuer (1995) is met één coatinglaag van MgF_2 op glas een transmissieverhoging voor diffuus licht mogelijk van 84% naar 89%.

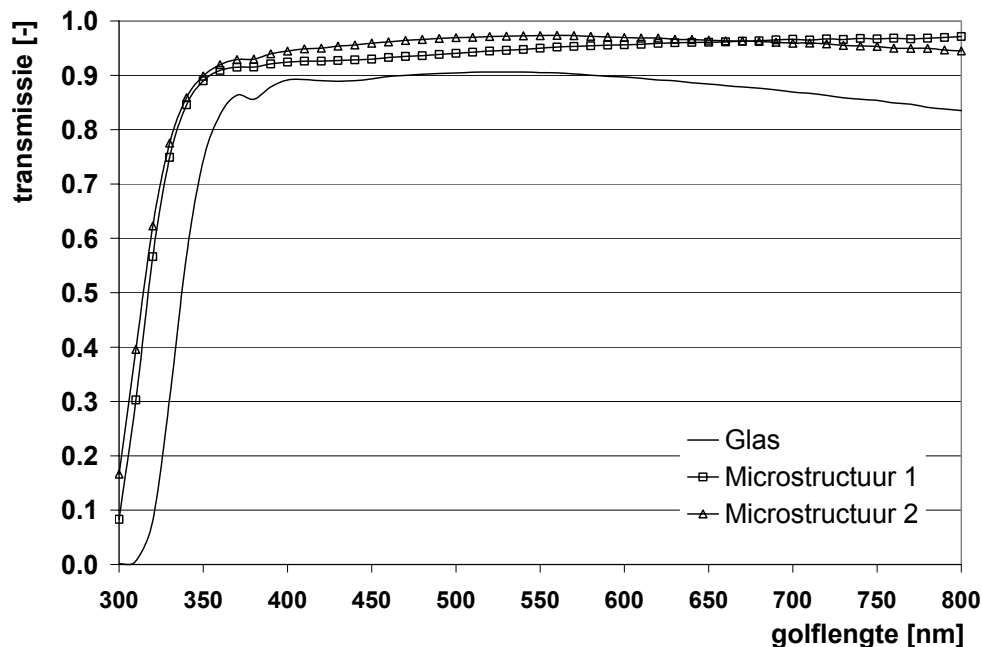
4.3.1.2 Oppervlakte structuur

Microstructuur

Met behulp van een microstructuur op het materiaal kan de reflectie aanzienlijk verminderen. Oppervlaktestructuren die kleiner zijn dan de golflengte van het licht hebben nauwelijks invloed op de breking van het licht en resulteren in een geleidelijke overgang van de brekingsindex aan het grensvlak, waardoor de lichtverliezen door reflecties aan een glasplaat verminderen van ca. 8% naar 1% (Kursawe en Hofmann, 2000). In de kastuinbouw en bij zonnecollectoren kunnen de materialen met verminderde reflectie ingezet worden om meer zonne-energie te winnen. Door een microstructuur op glas aan te brengen kan de transmissie voor loodrecht invallend licht van 89% tot 95-96% verhoogd worden (Figuur 31), voor diffuus licht is dit van 89 tot 93%. Door de firma Flaberg GmbH in Fürth (D) zal verdere productie opgestart worden (Sonneveld, 2003). Microstructuur coatings kunnen zowel aangebracht worden op gehard glas als op gewoon glas (afhankelijk van het fabricageproces).



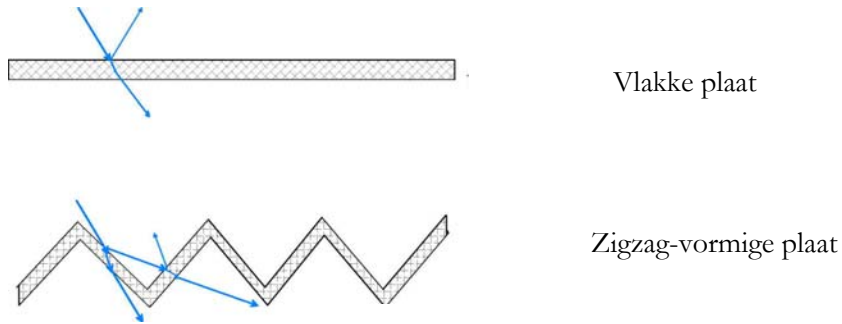
Figuur 30 Microscopopname van een microstructuur coatinglaag



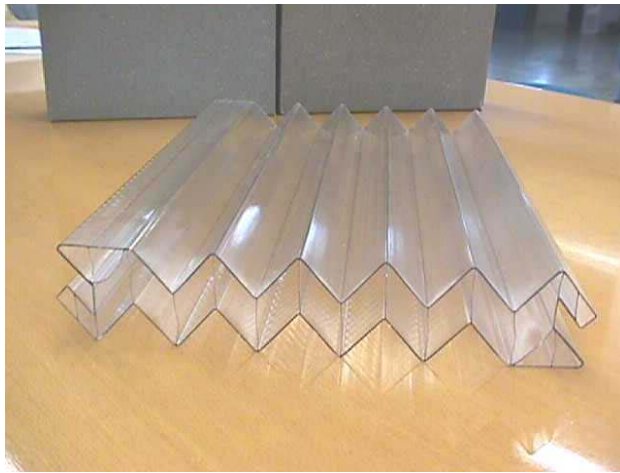
Figuur 31 Transmissie van verschillende ruiten met een microstructuur coating (Sonneveld, 2003)

Zigzag-structuur

De markt vraagt om relatief goedkope materialen met goede lichttransmissie, hoge warmte-isolatie en lange levensduur. De toepassing van coatings en dubbellaagse glasdekken met luchtsponw zijn dan opties. Echter, ook andere materialen kunnen hierbij worden beschouwd, zoals harde en flexibele kunststoffen. Harde kunststoffen hebben ten opzichte van glas het voordeel dat ze in vele gewenste vormen zijn te produceren. Dit maakt het bijvoorbeeld mogelijk de lichttransmissie te verbeteren door gebruik te maken van een (eventueel dubbellaags) zigzag-gevormd materiaal (Sonneveld, 2002). Onderzoek uitgevoerd door A&F (voorheen IMAG) samen met General Electric Plastics heeft aangetoond dat het technisch mogelijk is om een dubbelwandige, geëxtrudeerde kunststofplaat in zigzag-vorm te maken, die ongeveer dezelfde doorlatendheid voor diffuus licht heeft als enkelglas van 4 mm en waarmee gelijktijdig een energiebesparing op jaarbasis behaald kan worden van ca. 20% (Figuur 33). Dit wordt bereikt door de betere isolatiewaarde van deze plaat. Het principe van de lichtreflectie en -transmissie bij een vlakke plaat en een zigzag-constructie is weergegeven in Figuur 32. De productiewijze maakt het aan het materiaal toevoegen van pigmenten en coatings mogelijk, waardoor optimalisatie van transmissie, reflectie en absorptie van licht, warmte-isolatie, condensgedrag en de krasbestendigheid kan worden bereikt bij dit soort platen.



Figuur 32 Het principe van de transmissie en reflectie van een lichtstraal, die een vlakke plaat treft (boven) en een zigzag-vormige plaat (onder)



Figuur 33 PC-zigzag plaat, dubbelwandig met zijdelingse klikverbinding

4.3.2 Verandering van het stralingspectrum

Alle binnenkomende straling in de kas wordt gefilterd door het omhullingsmateriaal, al dan niet in combinatie met een schermmateriaal. Een deel van de straling wordt geabsorbeerd en gereflecteerd door de omhulling en een deel wordt doorgelaten in de kas (transmissie) en bereikt de planten. Een omhullingsmateriaal met spectraalselectieve eigenschappen kan gebruikt worden om de morfologie en fysiologie van de planten te beïnvloeden. De spectraalselectiviteit kan bereikt worden met verschillende fysische principes: absorptie, reflectie, fluorescentie, interferentie, fotochromisme of thermochromisme (Hoffmann en Waaijenberg, 2001). Het integreren van verschillende pigmenten in transparante kunststoffen of het toevoegen van een coating op het materiaaloppervlak, om de gewenste selectiviteit te bereiken, kan resulteren in een verandering van de optische eigenschappen van materialen. Zodoende moeten dus altijd alle relevante optische eigenschappen in combinatie worden beoordeeld. De genoemde principes met de hiervoor geschikte materialen worden hieronder meer in detail beschreven.

4.3.2.1 Absorptie

Absorptie is een fysisch proces waarbij een gedeelte van de straling als het ware ‘ingeslikt’ wordt. Als de straling het materiaal passeert, wordt daarbij de intensiteit gereduceerd en wordt de geabsorbeerde energie omgezet in warmte (Meyer, 1969). In fotoselectieve omhullingen gebaseerd op het principe van spectraal selectieve absorptie wordt de globale straling in het ultraviolet (UV), het zichtbare (PAR) en het nabije infrarood (NIR) selectief geabsorbeerd. Uiteraard wordt complementair de globale straling ook selectief gereflecteerd.

Het UV deel van de globale straling draagt bij aan de afbraak van de polymeer-structuur (veroudering). Daarom worden speciale additieven toegevoegd gedurende het productieproces, die de levensduur van het materiaal verlengen. Niet gestabiliseerde kunststoffen (zonder additieven) worden binnen enkele maanden afgebroken door het UV licht en zijn dus niet geschikt als omhullingsmateriaal. PE-folies met UV absorbers zijn veel meer geschikt. In het algemeen zijn deze dus niet meer transparant voor UV-B straling. Sommige kunststoffolies filteren ook de UV-A straling eruit en worden dan ‘UV-bloc’ kunststoffolies genoemd. Verschillende pigmenten veroorzaken de selectieve absorptie in kasfolies of –platen. Materialen met absorptie pigmenten, die werken in het UV gebied laten het hele zichtbare licht door en zijn daarom transparant. Ze hebben normaal een hoge PAR doorlatendheid.

Materialen met absorptie pigmenten, die in het zichtbare gebied werken, tonen de doorgelaten kleur, terwijl de andere kleur wordt geabsorbeerd. De PAR transmissie wordt verlaagd door de aanwezige hoeveelheid pigment in het polymeer (Daponte, 1997). Het hoofddoel van deze materialen is schaduw geven. Er zijn vele gekleurde kunststof omhullingsmaterialen op de markt in paars, blauw, groen, rood, enz. Soms worden deze materialen, in het bijzonder degenen die het verrood absorberen, ook gebruikt voor fotomorfogenese (Hoffmann, 1999a).

Naast absorptie pigmenten in het UV of zichtbare gebied van het spectrum zijn er ook materialen die absorberen of reflecteren in het nabije infrarood gebied (NIR, 700-3.000 nm). Het hoofddoel van deze materialen is koeling. Sinds vele jaren werken wetenschappers en bedrijven aan omhullingsmaterialen om de binnentemperatuur significant omlaag te brengen. Echter er zijn nog geen kunststoffolies met NIR absorberende of reflecterende pigmenten commercieel beschikbaar. Er zijn een aantal prototypen van verschillende producenten, welke op dit moment in de internationale tuinbouwpraktijk getest worden.

Materialen met absorptie van rode en ver-rode straling

Met speciale filters is het mogelijk om bepaalde golflengtes uit de globale straling te filteren. In het zogenaamde ‘vloeibaar-dak’ systeem worden vloeistoffen gebruikt die de spectrale samenstelling van de natuurlijke straling veranderen. Deze vloeistoffen worden door de spouwruimte van dubbellaagse platen op een kasdek gepompt. Nadat in de eerste proeven delen van de infrarood straling uitgefilterd werden om temperatuureffecten te bereiken (bijv. Morris et al., 1958; Canham, 1962) werden later delen van het zichtbare licht uitgefilterd voor specifiek onderzoek van de plantmorfologie.

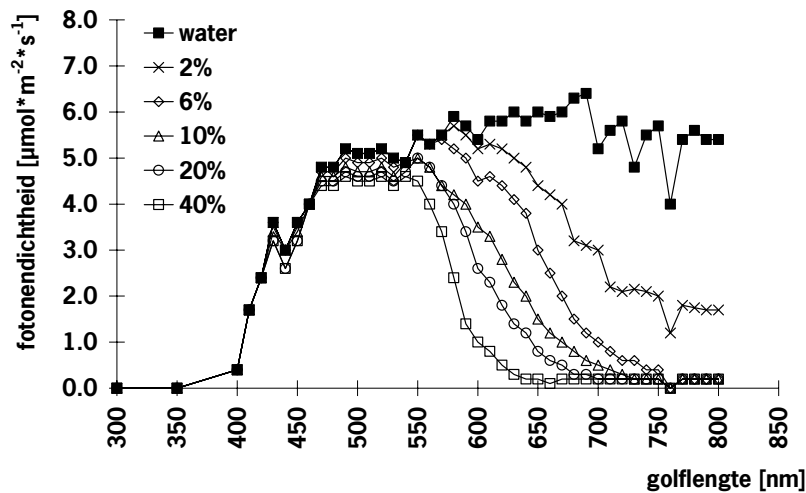
Pettersen (1984) werkte met een CuSO_4 -oplossing in het 'vloeibare-dak' systeem. Door de concentratie te wijzigen absorbeert deze blauwkleurige oplossing meer verrood straling, maar ook meer rode straling (Figuur 34). Als gevolg hiervan neemt de R:FR-verhouding (rood-verrood verhouding) toe met toenemende concentratie tot aan een 10% CuSO_4 -oplossing en neemt dan weer af. Tegelijkertijd neemt de verhouding van blauwe tot rode straling (B:R) af evenals blauw tot verrood (B:FR) (Tabel 19) en de doorlatendheid voor PAR. Het schaduwgevend effect bij een 6% CuSO_4 -oplossing is 34% en deze stijgt tot 58% bij een 40% CuSO_4 -oplossing (Rajapakse et al., 1992). Naast CuSO_4 werden andere stoffen gebruikt, die de complementaire kleur absorberen volgens hun eigen kleur en aldus de spectrale verdeling van de straling wijzigen (Tabel 20). Mortensen en Strømme (1987) beschreven de constructie van het 'vloeibare-dak' met verschillende kleurstoffen. De auteurs benadrukken dat reeds kleine wijzigingen van de R:FR verhouding tot dezelfde effecten leiden als grote wijzigingen van de B:R verhouding (Mortensen et al., 1987).

Tabel 19 Verhouding R:FR (rood-verrood), B:R (blauw-rood) en B:FR (blauw-verrood) van CuSO_4 oplossingen met verschillende concentraties in water (Rajapakse et al., 1992)

CuSO ₄ concentratie [%]	rood:verrood		blauw:rood	blauw:verrood
	smal 655-665 nm: 725-735 nm	breed 600-700 nm: 700-800 nm	400-500 nm: 600-700 nm	400-500 nm: 700-800 nm
0	1,1	1,1	0,7	0,9
2	1,9	2,1	1,0	2,0
4	2,8	3,3	1,2	4,1
6	4,0	5,2	1,4	7,7
8	4,7	6,4	1,7	11,6
10	4,7	6,7	2,1	14,0
15	3,5	6,0	3,2	19,1
20	1,7	3,0	3,8	14,0
30	1,3	2,8	7,7	18,6
40	1,1	2,0	11,4	20,9

Tabel 20 Spectrale absorptie van verschillende kleurstoffen opgelost in water of geïntegreerd in een polymeer (0 geen absorptie; + geringe absorptie; ++ gemiddelde absorptie; +++ hoge absorptie; ↑ toenemende verhouding ; ↓ afnemende verhouding)

kleurstof	absorptie			Verandering verhouding	
	blauw	rood	verrood	blauw:rood	rood/verrood
neutraal, water	0	0	0	0	0
blauw-verrood, CuSO ₄	0	+	+++	↑↑	↑↑↑
Blauw	0	+++	0	↑↑	↓↓↓
Groen	+	+	0	↓	↓
Geel	+++	0	0	↓↓↓	0
Oranje	++	0	0	↓↓	0
Rood	+	0	0	↓	0



Figuur 34 Absorptie van CuSO₄-oplossingen met verschillende concentraties en water (Rajapakse et al., 1992)

Gekleurde folies

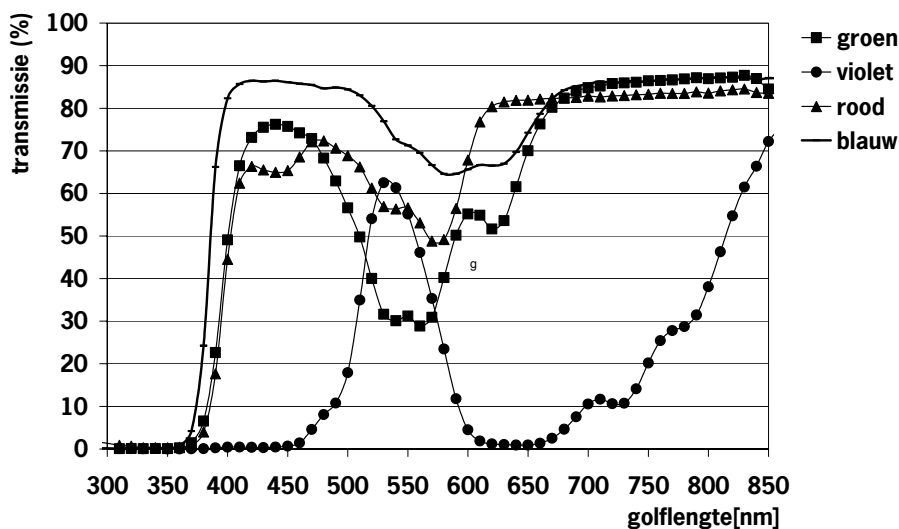
De eerste pogingen om gekleurde filters in de vorm van kunststof folie te gebruiken werden gedaan door Israëlische wetenschappers in de zestiger jaren. Kadman-Zahavi et al. (1976) gebruikte gekleurd celluloid. Niet alleen de betrokkenheid van phytochroom maar ook de deelname van een B/UV-A fotoreceptor wordt vergelijkbaar geacht aan de onderzoeken met CuSO₄ (Khattak en Pearson, 1997; Oyaert et al., 1997). Thans zijn er echter veel verschillende gekleurde kunststoffolies beschikbaar op de markt (Figuur 35). Een verscheidenheid aan

producten is getest door Hoffmann (1999b), maar alleen verrood absorberende prototypes waren in staat om de stengellengte significant te reduceren.

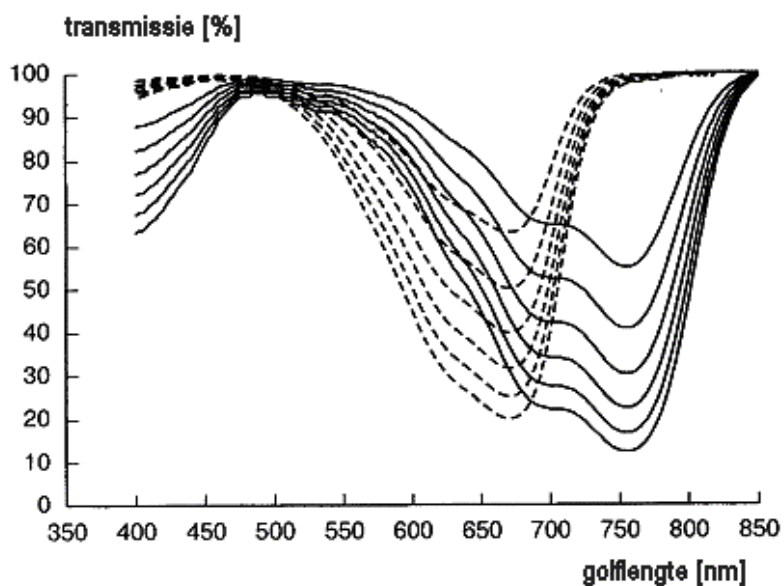
Met de ontwikkeling van fotoselectieve kasomhullingen of schaduwmaterialen, die de R:FR verhouding verhogen, kunnen tuinders en sierteeltproducenten de kosten reduceren van groeiregulerende chemicaliën, het gezondheidsrisico van het personeel en consumenten verkleinen en ook een vermindering van de milieuvervuiling bevorderen (Rajapakse et al., 2000). De eerste kunststoffolie prototypes met een specifieke verandering van de R:FR verhouding zijn geproduceerd door Mitsui Chemicals. Een kleurstof met een maximum absorptie bij 670 nm (rood) of een kleurstof met een maximum absorptie bij 755 nm (verrood) is opgenomen in een polymeer (PMMA of PET) (Figuur 36). Onder deze kunststoffolies veranderde de R:FR verhouding respectievelijk naar 0,5 of 1,5. De totale lichtdoorlatendheid van deze folies is afhankelijk van de pigmentconcentratie.

Het eerste commerciële product met een specifieke wijziging van de R:FR verhouding werd ontwikkeld door BPI Agri (Visqueen) samen met de Universiteit van Reading (BPI Agri, 2004). Zij ontwikkelden kleurstoffen gebaseerd op phthalocyanine derivaten, die een gelijke spectrale transmissie hebben als de kleurstoffen ontwikkeld door Mitsui Chemicals (Figuur 37). De absorptie karakteristieken van phthalocyanines laten een selectieve filtering van noodzakelijke golflengten toe, voor opwekking van één van de twee phytochrome vormen. De kunststoffolie wordt gebruikt als een scherm binnen een glazen kas. Het wordt aanbevolen om deze ieder jaar te vervangen als gevolg van de duurzaamheid van de pigmenten.

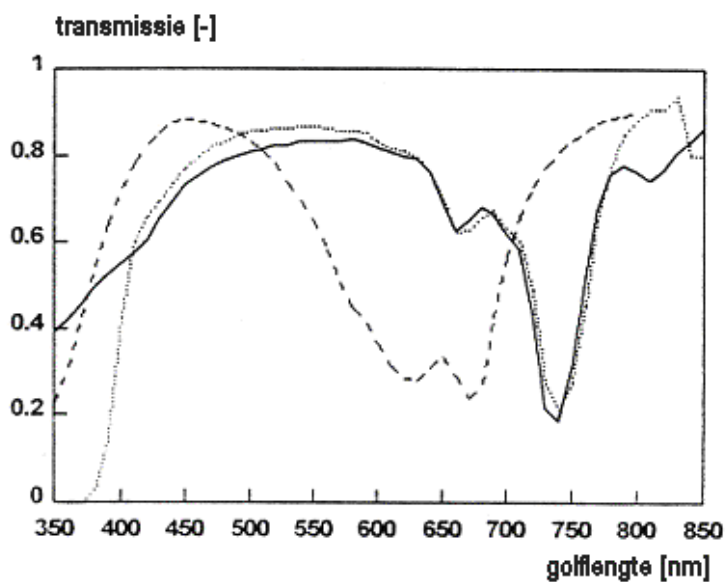
A&F (voorheen IMAG) werkte ook aan verbeteringen van verrood absorberende filters. Zij vond twee pigmenten die de lichtdoorlatendheid verbeteren en ook de transmissie in het UV gebied. De absorptie in verrood is vergelijkbaar met de Japanse en Engelse filters (Figuur 38).



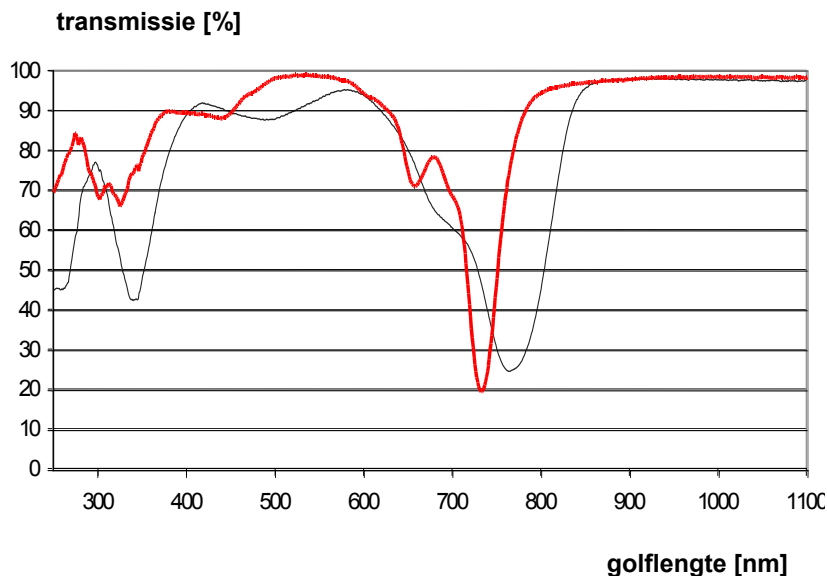
Figuur 35 Transmissie van verschillende gekleurde kunststoffolies, die absorberende pigmenten in het zichtbare gebied bevatten (Hoffmann, 1999c)



Figuur 36 Transmissie van een kleurstof (Mitsui Chemicals) met verschillende concentraties van 5 tot 17,5 mg/l in 2,5 mg/l stappen, opgelost in toluen
 verrood-absorberende kleurstof (—) en rood-absorberende kleurstof (- - -)
 (Murakami et al., 1997)



Figuur 37 Transmissie van verschillende phthalocyanines (BPI Agri)
 verrood-absorberende kleurstoffen Zn phthalocyanine (—), Cu phthalocyanine (···) en
 rood-absorberende kleurstof (- - -) (Haeringen et al., 1998)



Figuur 38 Transmissie van verschillende verrood absorberende pigmenten in olie gevonden door Agrotechnology & Food Innovations

Materialen met absorptie van ultraviolette straling

Onlangs is er specifieke aandacht gegeven aan het gebruik van speciale UV absorberende pigmenten in kunststoffolies. UV-B doorlatende folies reduceren de stengelstrekking van sommige planten. Het gebruik van UV-B transparante materialen zal minder effect hebben in de zomer tijdens een hoge PAR straling en hoge buitentemperaturen (Hoffmann, 1999b). Het gebruik van chemische groeibevorderaars kan gereduceerd worden in combinatie met nieuwe klimaatregel-strategieën. Echter het gebruik van deze chemicaliën kan niet vervangen worden door UV-B transparante materialen voor de productie van planten met een intensieve lengtegroei (Hoffmann, 1999b). In het algemeen is het effect van UV-B straling op de bloei gering.

Naast de reductie van planthoogte dragen UV-B transparante omhullingsmaterialen bij aan het harden van planten. Als jonge planten gekweekt zijn onder een UV-B transparant omhullingsmateriaal kan vermeden worden dat directe zonbestraling in een latere buitencultuur schade geeft.

Ook is het mogelijk om meer intensieve bloemkleuren te verkrijgen als UV-B transparante omhullingsmaterialen worden gebruikt. Verder kan UV-B straling kleuren van bladeren veroorzaken. Tot nu toe is er zeer weinig praktijkgericht onderzoek naar het samengaan van kleuren en smaak uitgevoerd. Het is wel bekend dat de productie van flavonoiden gestimuleerd kan worden door kunstmatige UV bestraling, waardoor de smaak van verschillende kruiden en groenten verbetert. Aan de andere kant heeft UV-B straling een negatief effect op rozen, namelijk het ontstaan van het zgn. 'petal blackening'. Dit kan voorkomen worden door zgn. UV-bloc materialen toe te passen als omhulling (Raviv et al.,1988; Zieslin en Havelly, 1969).

Als de verhouding blauwe straling en UV-B straling laag is, kan een verhoogde infectie (bijv. botrytis) verwacht worden (Raviv en Reuveni, 1998; Reuveni et al., 1994). Daarom filteren de zgn. anti-botrytis kunststoffolies alle UV straling eruit <380 nm. Doordat de oriëntatie van insecten verbeterd wordt door UV straling is een toename van ziektes te verwachten, die veroorzaakt worden door bijv. trips en witte vlieg onder UV transparante materialen. Een toenemende tweedelijns schade veroorzaakt door meer virusoverdracht kan waargenomen worden. Aan de andere kant is een UV transparant materiaal voordelig voor de bestuiving van sommige planten, aangezien ook hommels UV straling nodig hebben voor oriëntatie (Benoit, 1998).

Commerciële materialen met en zonder UV blokkerende pigmenten zijn op de markt verkrijgbaar.

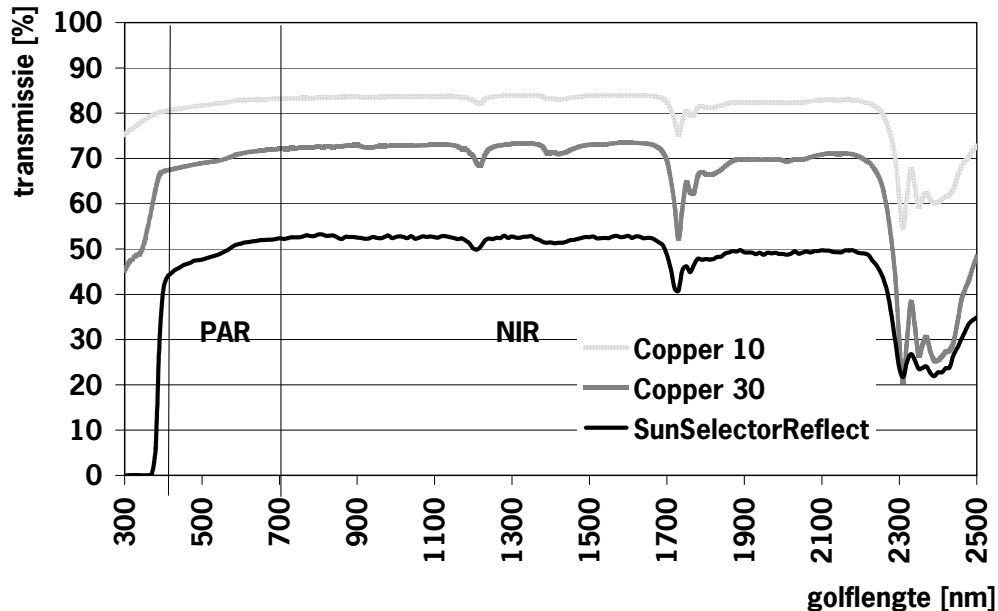
4.3.2.2 Reflectie

Om een schaduw effect te bereiken in kassen zijn er omhullings- of schermmaterialen beschikbaar die reflecterende oppervlaktes bevatten. Transparante kasomhullingsmaterialen bevatten fijn verdeelde metaaldeeltjes in het polymeer. Afhankelijk van het type metaal (bijvoorbeeld koper of aluminium) worden delen van de zonnestraling gereflecteerd (Daponte, 1997). De lichtdoorlatendheid van deze materialen wordt hierdoor gereduceerd. De meeste reflecterende materialen zijn niet selectief in het zichtbare gebied; zij reduceren de totale PAR straling en hebben aldus een schaduwgevend effect (Figuur 39). Dit soort folies kunnen worden gebruikt in gebieden met hoge instraling.

Er zijn ook folieprototypen met een selectieve reflectie in het NIR gebied. Deze hebben een positieve invloed op het kasklimaat zonder de plantengroei te veel te beïnvloeden (hoofdstuk 4.2.3).

Schermen

Schermmaterialen hebben juist de taak om straling te reflecteren. Schaduwschermen doen dit in het PAR gebied, energieschermen doen dit hoofdzakelijk in het FIR gebied. Een schermmateriaal met een selectieve reflectie in het NIR gebied maar juist een hoge PAR transmissie zou een mogelijkheid bieden om tijdens de zomermaanden ongewenste straling buiten de kas te houden.



Figuur 39 Transmissie van verschillende commerciële reflectie folies (Sun Selector Reflect van Ginegar, Israël en Copper 10 en 30 van Werra Plastic, Duitsland)

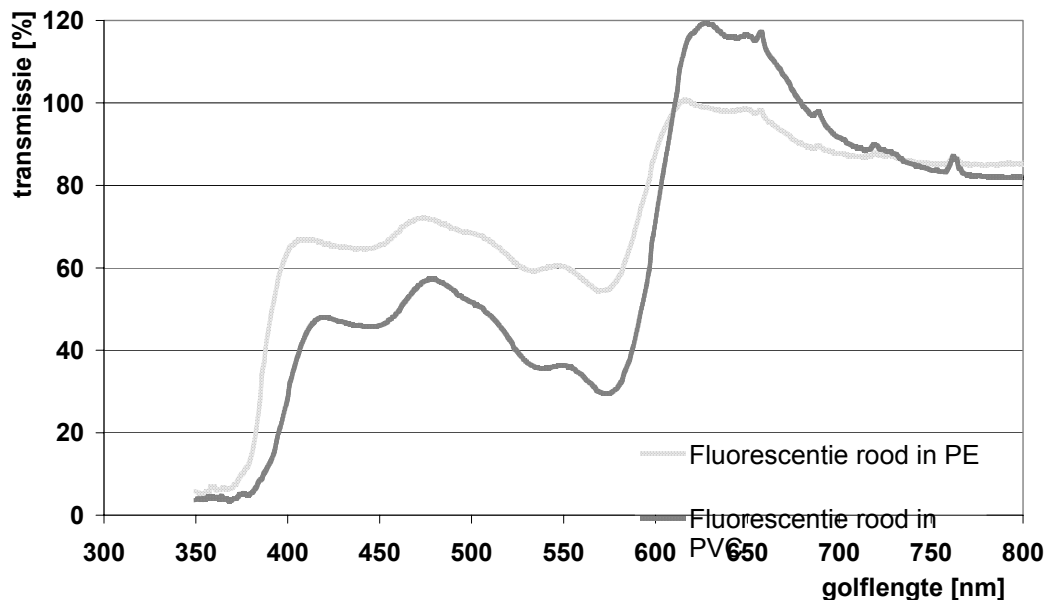
4.3.2.3 Fluorescentie

Fluorescentie is het glanzen van vaste materialen, vloeistoffen en gassen na bestraling. De opvallende stralingsenergie brengt de elektronen van de moleculen in het polymeer op een hoger energieniveau, die daarna terugvallen naar het uitgangsniveau, terwijl de karakteristieke fluorescerende straling geëmitteerd wordt. De emissie vindt plaats bij langere golflengtes dan de absorptie volgens de wet van Stokes (Meyer, 1969).

In kasomhullingsmaterialen worden fluorescerende pigmenten gecombineerd met absorptie pigmenten. Er zijn tuinbouwfolies op de markt met absorptie in het groene gebied en emissie in het rode gebied. Deze folies zien er rood uit. Verder zijn er materialen die in het UV gebied werken en emitteren in het zichtbare gebied. Het fluorescerende effect is afhankelijk van de hoeveelheid pigmenten in het polymeer. De duurzaamheid van fluorescerende pigmenten hangt af van de gebruikte soort polymeer en de stralingsintensiteit, soms is dit slechts 6-12 maanden. Fluorescerende materialen verlagen de PAR transmissie als zij absorberen in het zichtbare gebied van het spectrum.

In het verleden werden andere strategieën ontwikkeld in Israël om de R:FR verhouding te wijzigen. Sommige fluorescerende pigmenten absorberen delen van de groene straling en stralen dit weer uit in de vorm van rode straling met een langere golflengte, dergelijke fluorescerende pigmenten zijn toegepast in PVC kunststoffolies (Zarka en Zarka, 1985). De Hebrew University van Jeruzalem testte het gebruik van PE kunststoffolie in samenwerking met Ginegar, de fluorescerende eigenschap verdween echter al na 6-8 maanden (Shoshany, 1991). Zowel Pearson et al. (1995) als Kittas en Baille (1998) stellen dat de transmissie van PAR gereduceerd wordt ten

opzichte van standaard PE folies (Figuur 40). Men moet zich daarom afvragen of dergelijke materialen van nut zijn in gebieden met lage lichtintensiteit.



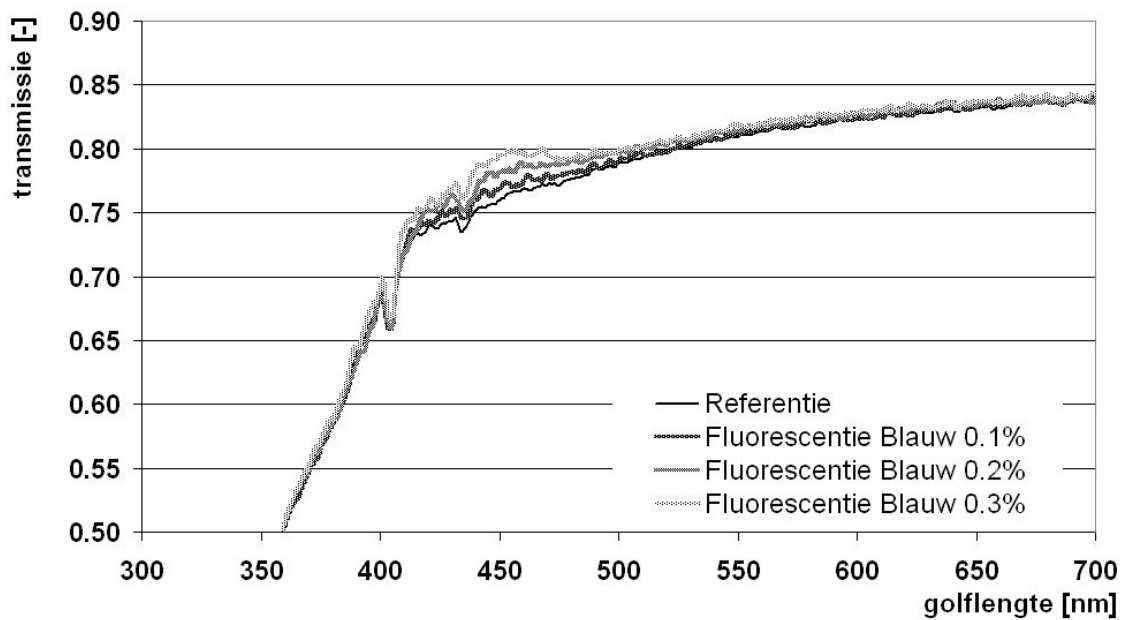
Figuur 40 Transmissie van fluorescerende materialen met absorptie in het zichtbare gebied, fluorescerende pigmenten in PE en PVC (Hoffmann, 1999c)

Sommige fluorescerende pigmenten absorberen ook ultraviolette straling en emitteren dit in de vorm van zichtbaar licht. Op deze wijze zal het aandeel PAR straling toenemen. Er zijn pigmenten, die UV straling absorberen en weer emitteren in het blauwe (Figuur 41) of rode gebied (Figuur 42). De toename van PAR straling is in hoge mate afhankelijk van de concentratie van het pigment in het polymeer (Figuur 41) en de hoeveelheid UV in de zonnestraling. De toename ligt in de orde van 1-2%. Sommige producten verhogen de R:FR verhouding maar verhogen niet de totale PAR transmissie (Figuur 42).

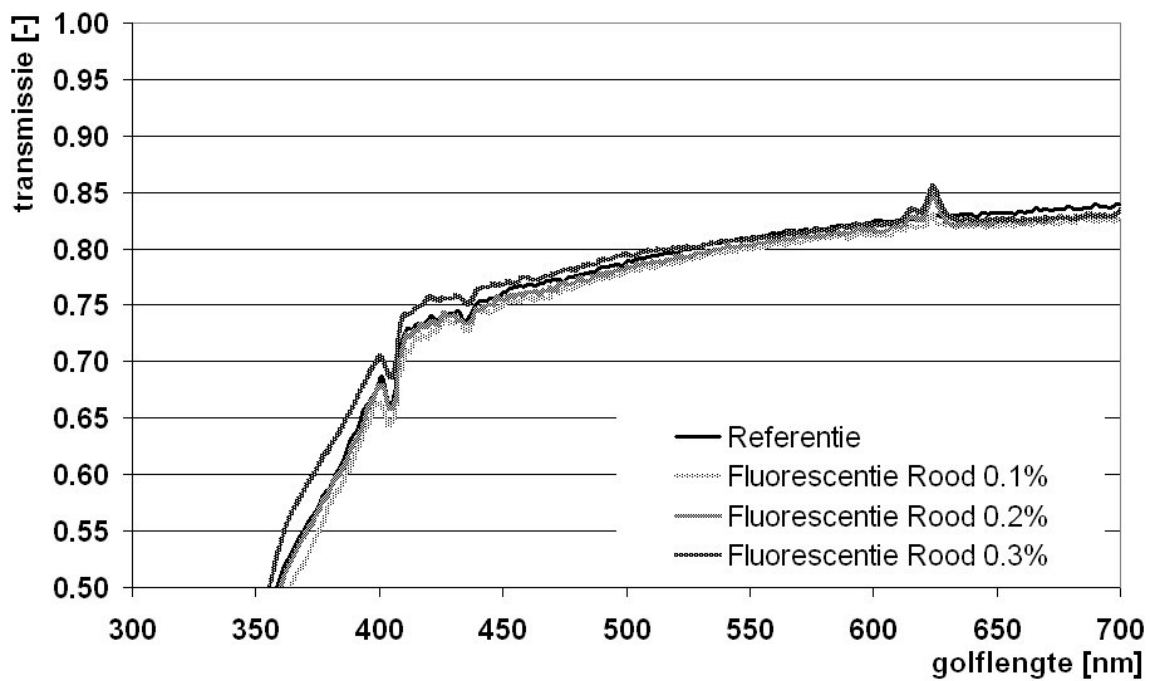
In het verleden zijn positieve effecten van folies met UV fluorescentie pigmenten op de opbrengst en biomassa productie van verschillende groenten vastgesteld. Hier is nader onderzoek nodig.

Er is ook een nieuw materiaal van CIBA, het fluorescerend Smartlight. In het project “Haalbaarheid fluorescerend energiescherm” is dit materiaal nader onderzocht (Hemming et al., 2004). Het materiaal zet een gedeelte van de ultraviolette en blauwe straling om naar rode straling. De doorlatendheid van blauwlicht is onder dit materiaal gereduceerd, het aandeel roodlicht is verhoogd (Figuur 43).

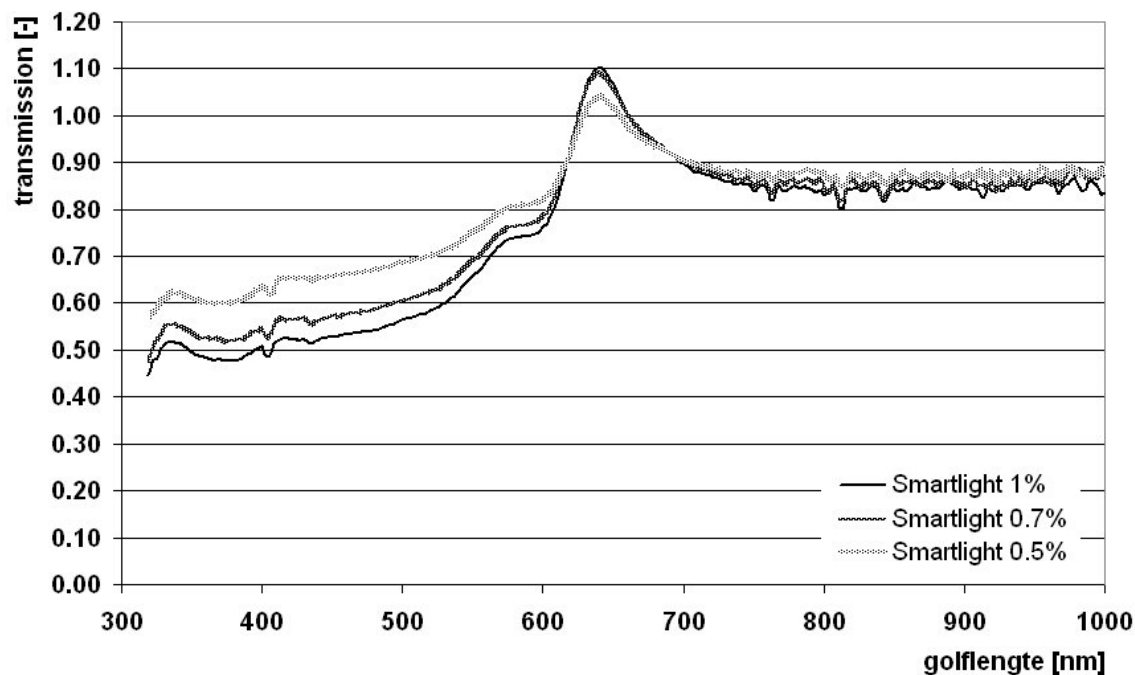
Verschillende producenten hebben al pigmenten op de markt, maar commerciële tuinbouwfolies ontbreken nog. De leeftijd van de folies is sterk afhankelijk van de stabiliteit van het pigment zelf en het polymeer.



Figuur 41 Transmissie van blauw fluorescerende materialen met absorptie in het ultraviolette gebied in verschillende concentraties



Figuur 42 Transmissie van rood fluorescerende materialen met absorptie in het ultraviolette gebied in verschillende concentraties



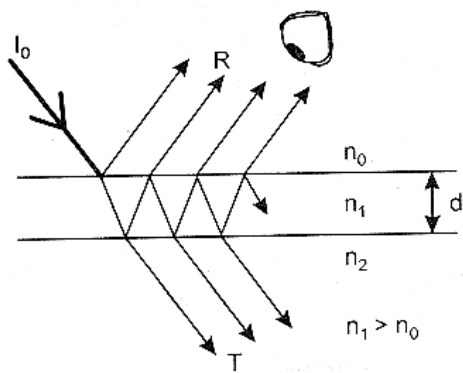
Figuur 43 Transmissie van een fluorescerend scherm (Smartlight) met absorptie in het ultraviolette en blauwe gebied in verschillende concentraties (Hemming et al., 2004).

4.3.2.4 Interferentie

Interferentie pigmenten bestaan uit verscheidene lagen dunne folies boven elkaar, die allemaal verschillende brekingsindices hebben. Door de verschillende brekingsindexen treedt er een zogenaamde interferentie van de gereflecteerde straling op. De opvallende lichtstraal wordt opgeschoven naar een langere golflengte. Als een lichtstraal een erg dunne laag materiaal treft met een dikte ongeveer gelijk aan de golflengte van het zichtbare licht, wordt de opvallende lichtstraal gesplitst in verschillende stralen door reflectie bij het bovenste en onderste grensvlak. Figuur 44 toont het interferentie principe. Het opnieuw samenvoegen van de individuele stralen vanaf iedere zijde van de folie leidt tot minimum en maximum intensiteiten voor bepaalde golflengtes. Het oog neemt deze intensiteitverschillen waar als kleuren (Daponte, 1997).

Interferentie pigmenten, die gebruikt worden voor tuinbouwtoepassingen bestaan uit dunne mica deeltjes, die gecoat zijn met een dun laagje TiO_2 . Zij reflecteren selectief delen van het opvallende licht en laten de rest door. De kleur van deze pigmenten wordt hoofdzakelijk bepaald door de dikte van de TiO_2 -coating. Verder wordt het interferentie-effect ook beïnvloed door de invalshoek van de straling. Normaal veroorzaakt het pigment de hoogste lichtdoorlatendheid als de straling loodrecht valt op het pigmentoppervlak, want dan treedt er geen reflectie op. Aannemende dat de absorptie van het pigment gelijk aan nul is, zal al het licht doorgelaten worden (Daponte, 1997). Daarom is de PAR doorlatendheid van deze materialen afhankelijk van de invalshoek van de globale straling. Aangezien deze hoek aan veranderingen onderhevig is, varieert de PAR transmissie. Interferentie pigmenten in het polymeer zijn stabiel. Ze worden

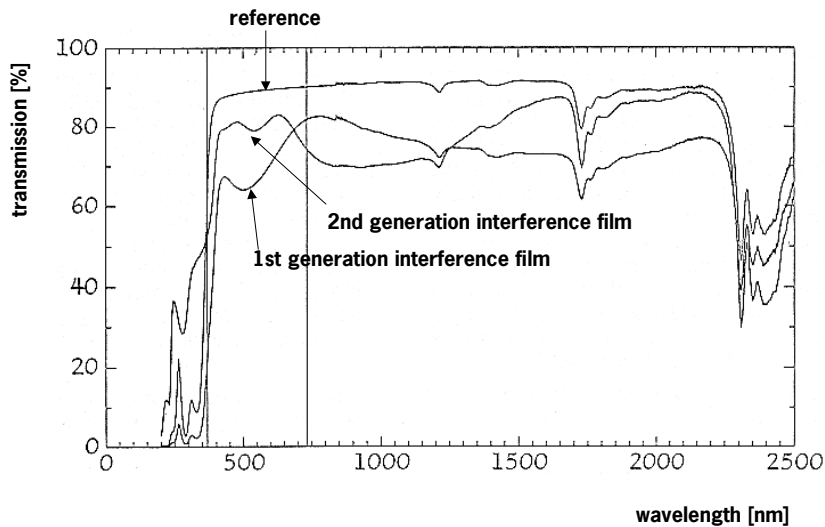
hoofdzakelijk gebruikt voor klimaatscontrole, doordat zij (delen van) de NIR straling (dus warmte) selectief reflecteren worden (Figuur 45 en Figuur 46). Interferentie filters zijn ontwikkeld en gepatenteerd door Merck, Darmstadt en Hyplast, België.



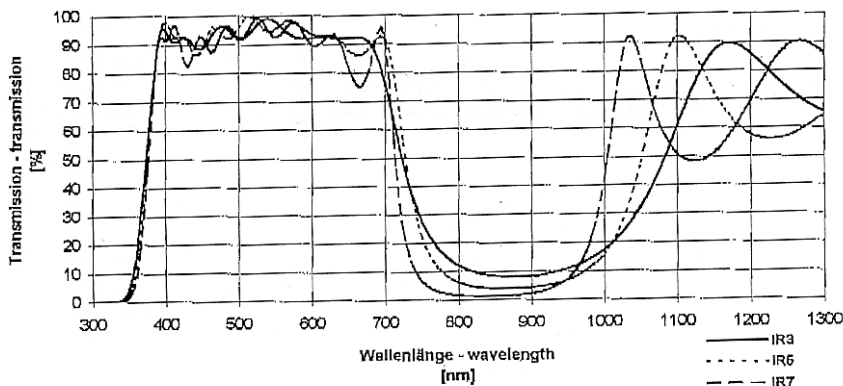
Figuur 44 Interferentie principe (Daponte, 1995)

Er zijn commerciële kunststoffolieproducten die groen-gele interferentie pigmenten bevatten, die delen van het zichtbare licht van het spectrum reflecteren en daardoor een schaduweffect geven, ze geven echter een diffuus karakter aan de folie (Verlodt et al., 1995). Nieuwe generaties van interferentie kunststoffolies werken meer in het NIR, hierbij is de reductie van het PAR veel minder (Figuur 45). Deze folies geven een significante reductie van de binnentemperatuur in de kas, in het bijzonder gedurende de warmste perioden van de dag (Verlodt en Verschaeren, 1997). In 1995 zijn ook prototypen met groen-gele, paarse en groene interferenties getest. Deze waren in staat om de planthoogte iets te reduceren (Daponte, 1995), maar hadden slechts een lage transmissie voor PAR.

Er is glas met een interferentie coating op de markt, dat de NIR straling reflecteert. Dit glas wordt gebruikt als warmteschild voor (kantoor)gebouwen. Interferentiepigmenten in folies zijn minder effectief (Figuur 45) dan dit glas. De totale lichtdoorlatendheid is ook gereduceerd, zodat toepassing slechts bij hoge lichtintensiteiten interessant is.



Figuur 45 Transmissie van verschillende kunststoffolies met interferentie (Verloldt en Verschaeren, 1997)



Figuur 46 Transmissie van glas met interferentie -coatings (Prinz Optics, 1999)

4.3.2.5 Emissie

Het warmteverlies van een kasbedekking is voornamelijk afhankelijk van twee materiaaleigenschappen. Ten eerste is dit de doorlatendheid van het materiaal voor warmtestraling en als tweede de emissiecoëfficiënt voor deze straling in het golflengtegebied van 3-100 μm . Een verlaging van de emissiecoëfficiënt is mogelijk door op het materiaal een coating aan te brengen met een lage emissiewaarde. Enige nu bekende materialen op dit gebied zijn tinoxide (Out en Breuer, 1995; Chopra et al., 1983 en Lampert, 1981) en verschillende metaallagen zoals goud en zilver (Chopra et al., 1983 en Lampert, 1981, 1983 en 1987). Een probleem bij de eerstgenoemde coating is dat de lichttransmissie voor loodrecht opvallend afneemt van 89% naar 84% (respectievelijk van 83% naar 74% voor diffuus licht) (Out en Breuer, 1995). Door het aanbrengen van een tweede antireflectie-coating kan voor het kortgolfige gebied dit nadelig effect ongedaan gemaakt worden (transmissie neemt toe tot 87%; voor diffuus opvallend licht is dit

81%)(Out en Breuer, 1995). Een merknaam voor dit glas met een emissie-coating van tinoxide is Hortiplus (hoofdstuk 4.1.1).

Het aanbrengen van coatings met een lage emissiecoëfficiënt op folies is technisch moeilijk.

4.3.2.6 Fotochromisme

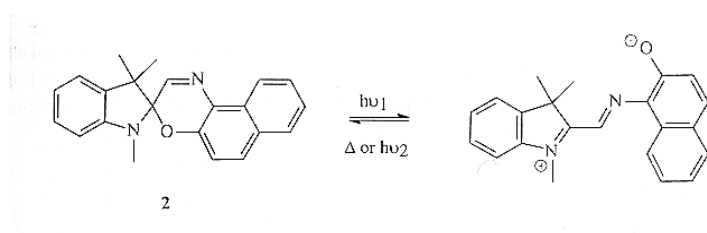
Speciale materialen bevatten fotochromatische pigmenten, die donkerder worden of van kleur veranderen onder invloed van straling in een specifieke golflengte. Als de straling wordt weggenomen komen ze terug in hun oorspronkelijke staat (Lozano-González et al., 1996).

Fotochromisme kan gedefinieerd worden als een omkeerbare verandering van de chemische status, veroorzaakt door elektromagnetische straling (in één of beide richtingen) tussen twee toestanden die een verschillende lichtabsorptie in verschillende golflengtegebieden hebben. De actieve straling is in het algemeen in het UV gebied (300-400 nm). De omgekeerde reactie kan gebeuren door een thermisch mechanisme in sommige systemen of de fotochemisch teweeggebrachte vormen zijn thermisch stabiel in andere. In zulke systemen is de omgekeerde reactie hoofdzakelijk fotochemisch.

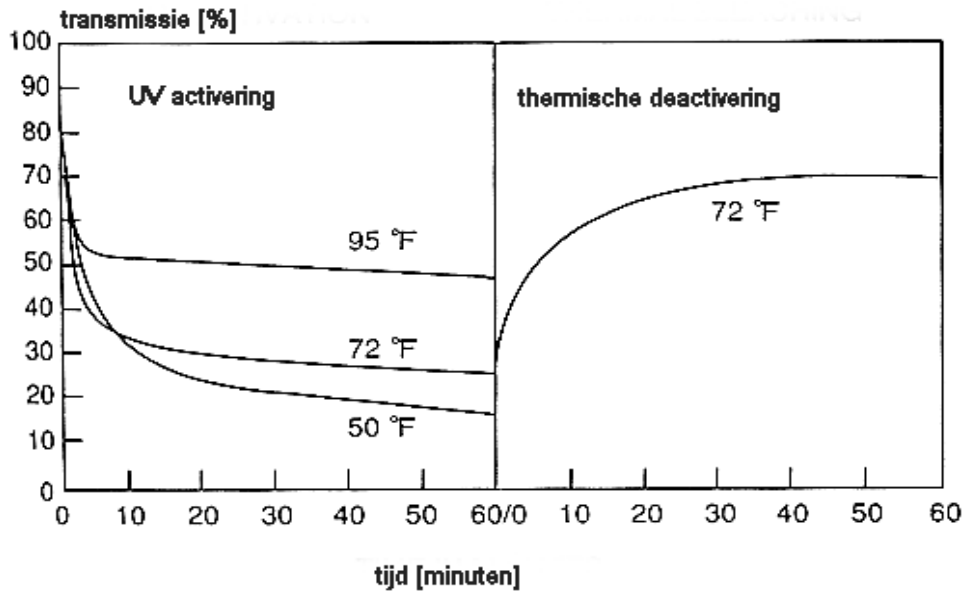
Spirooxazines hebben uitstekende fotochromische eigenschappen en worden daarom vaak gebruikt voor variabele transmissiematerialen zoals fotochromatische lenzen (Figuur 47). Ze zijn resistent voor UV veroudering ook onder constante bestraling (Crano en Guglielmetti, 1999).

Fotochromatische materialen worden bijvoorbeeld voor zonnebrillen gebruikt. De eerste fotochromatische lenzen hadden een lichttransmissie van 80% voor loodrecht opvallend licht (Figuur 48), welke gereduceerd werd tot 48% (35°C) of 14% (10°C) als ze geactiveerd werden (Figuur 49). Huidige fotochromatische pigmenten hebben een hogere lichttransmissie, een snellere reactie en zijn minder afhankelijk van de temperatuur (Crano en Guglielmetti, 1999).

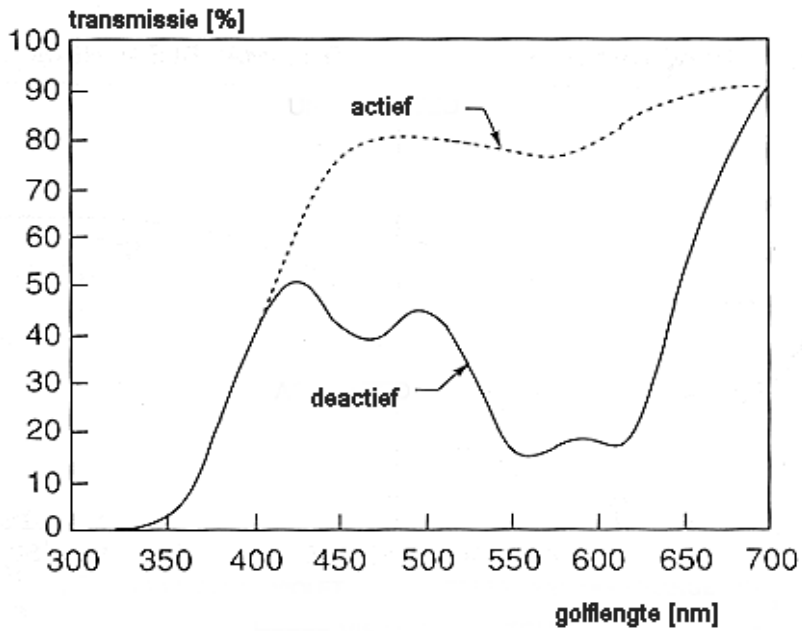
De eerste Japanse prototypen zijn beschikbaar voor kasomhullingsmaterialen (Lozano-González et al., 1996) met een positief effect op de plantengroei.



Figuur 47 Schema van een fotochromatisch pigment (Crano en Guglielmetti, 1999)



Figuur 48 Transmissie van Transitions® lenzen in geactiveerde en gedeactiveerde toestand (Crano en Guglielmetti, 1999)

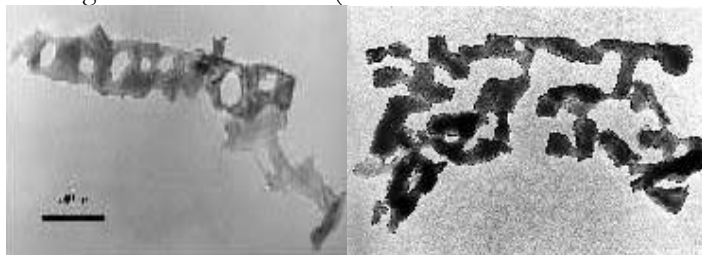


Figuur 49 Fotochromatische reactie van Transitions® lenzen (Crano en Guglielmetti, 1999)

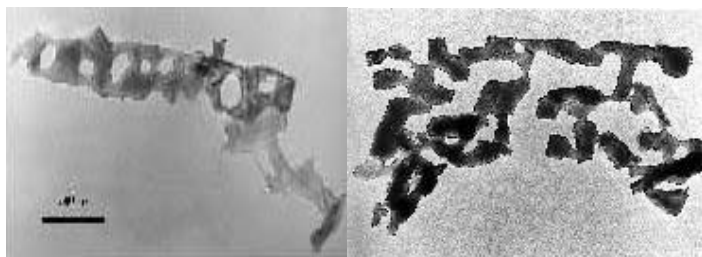
4.3.2.7 Thermochromisme

Als materialen van kleur veranderen over een gedefinieerd temperatuurbereik worden ze thermochromatisch genoemd. Thermochromatische materialen worden geproduceerd op basis van vloeibare kristal thermografie. De basis is een vloeibaar kristal in een thermodynamische fase tussen de pure vaste en de pure vloeibare fase. Dit bestaat in sommige organische samenstellingen onder bepaalde condities. Bij temperaturen onder de grenstemperatuur zal het thermochromatische vloeibare kristal in vaste vorm en transparant zijn. Als het op de grenstemperatuur zit en het wordt bestraald met wit licht (380-780 nm) dan zal dit resulteren in reflectie van een unieke golflengte van zichtbaar licht; het oog zal een speciale kleur herkennen. Als de temperatuur verder omhoog gaat door de materiaal-bandbreedte (temperatuur) heen zal de gereflecteerde kleur van het materiaal veranderen. Hierbij zal het materiaal uiteindelijk de pure vloeibare staat bereiken en zal dan terugkeren tot transparant. Dit fenomeen is reversibel. Er zijn pigmenten die in een breed temperatuurgebied actief zijn van 10°C tot 120°C en in bandbreedtes van 1°C tot 20°C (Farina, 1998; Parsley, 1991).

Er zijn thermochromatische ruiten commercieel verkrijgbaar welke uit een polymeer-water oplossing tussen twee dunne plasticfolies bestaat. Als de temperatuur afneemt, trekt zich het polymeer samen in deeltjes kleiner dan de golflengte van het licht, licht wordt doorgelaten, de lichttransmissie is ca. 90%. Als de temperatuur toeneemt tot 75°C strekt zich het polymeer weer in deeltjes groter dan de golflengte van het licht, licht wordt gereflecteerd, de lichttransmissie wordt gereduceerd tot 20% (



Figuur 50) (Suntek, 1998). Tot nu toe worden deze materialen alleen voor lichtkoepels gebruikt en zijn ze voor tuinbouwtoepassingen te duur.



Figuur 50 Werkingswijze van thermochromatische pigmenten, rechts: licht wordt gereflecteerd, links: licht wordt doorgelaten (MMI Laboratory, 2001)

4.3.2.8 Electrochromisme en gaschromisme

Electrochromische vensters bevatten evenals de gaschromische vensters een wolframoxidefolie die met elektrische pulsen actief geschakeld kan worden tussen een heldere en een ondoorzichtige toestand. Het venster bestaat verder uit een transparante tegen-elektrode en een vaste stof-elektrolyt (Granqvist et al., 1998). De transmissie van deze vensters is maximaal 80% over het lichtspectrum en de minimale transmissie is 10 - 20%. Omdat het systeem kan werken met elektrische pulsen is er voor het omschakelen tussen de verschillende toestanden weinig energie nodig. Momenteel worden elektrochrome systemen door Flaberg-Pilkington op de markt gebracht. De maximale lichttransmissie van deze systemen is echter nog laag (ca. 50% voor dubbelglassystemen) en de kosten zijn hoog (ca. Euro 500,- per m²).

Gaschromische vensters kunnen actief geschakeld worden tussen een helder en een gekleurde toestand door sterk verdund zuurstof of waterstofgas naar het oppervlak te leiden. Op het oppervlak zijn een wolframoxidefolie en een dunne katalysator coating aanwezig. Deze technologie is recent ontwikkeld door Georg et al. (1992) van het Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. De lichttransmissie van deze vensters vermindert bij verhoogde H₂-gas concentraties van maximaal 60% naar ca. 10%. Omdat er een ingewikkeld gastoe- en afvoersysteem nodig is en de maximale lichttransmissie (momenteel 60%) te laag is, zijn deze vensters naar verwachting niet binnen korte termijn toepasbaar in kassen.

Samenvatting hoofdstuk 4.3

- **Stralingsintensiteit en stralingsspectrum kunnen worden gevarieerd door de transmissie, absorptie of reflectie van materialen te veranderen.**
- **De totale lichttransmissie van kasomhullingsmaterialen kan worden verhoogd door speciale oppervlakte-coatings (interferentiecoatings of coatings met een lage brekingsindex). Deze techniek kan worden toegepast op glas en kunststofplaten. Een andere mogelijkheid is het veranderen van de oppervlaktestructuur (microstructuur of macrostructuur). De microstructuur van glas, platen en folies kan theoretisch worden veranderd. Een verandering van de macrostructuur lijkt momenteel alleen mogelijk bij platen (zig-zag).**
- **Het stralingsspectrum van glas kan worden gevarieerd door oppervlakte coatings. Deze techniek is echter beperkt en duur. Het spectrum van kunststofplaten kan worden gevarieerd door coatings en het toevoegen van additieven. De spectrale doorlatendheid van folies en schermmaterialen is goed varieerbaar door het toevoegen van additieven.**
- **Door fluorescentie kunnen bepaalde golflengtes worden verschoven naar andere golflengtes. Dit kan zelfs leiden tot een hogere PAR transmissie.**
- **Nieuwe technieken zoals fotochromisme, thermochromisme, electrochromisme en gaschromisme staan in de kinderschoenen en bieden misschien op lange termijn een optie.**

4.4 Wat is het effect op de energiehuishouding?

In de vorige paragrafen is een groot aantal methoden genoemd waarmee de optische eigenschappen van kasomhullingsmaterialen beïnvloed kunnen worden. Al deze eigenschappen beogen de lichttransmissie te verbeteren, of om juist stukken van het stralingsspectrum te blokkeren. In deze paragraaf wordt een kwantitatief overzicht gegeven van de effecten van deze wijzigingen op een drietal kengetallen van het kasklimaat, namelijk het productieniveau, de warmtebehoefte en de koelbehoefte. De koelbehoefte wordt alleen berekend voor situaties waarbij aan een gesloten kas is gerekend.

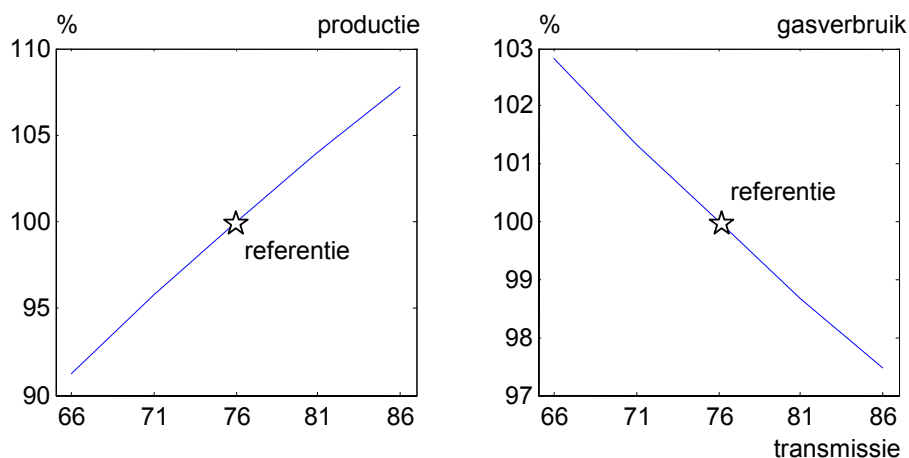
De effecten zijn berekend met behulp van een simulatiemodel. In alle berekeningen heeft het kasklimaat, zoals dat in een tomatenteelt wordt gehanteerd, als uitgangspunt gediend. Alle effecten zijn berekend voor een standaard en voor een gesloten kas, alhoewel deze laatste kas zeker niet als gemeengoed kan worden gesteld.

In de berekeningen voor de gesloten kas is uitgegaan van een koelinstallatie die in werking treedt zodra de temperatuur boven de 'ventilatielijn' uit komt. De ontvochtiging vindt evenwel in alle gevallen met buitenlucht plaats.

De berekeningen zijn uitgevoerd als varianten ten opzichte van een standaard, enkelglas kasdek. In deze referentiesituatie heeft de totale kas op gewasniveau een diffuse lichttransmissie van 76%. De absorptie van straling in het glas bedraagt 4%. De doorlatendheid is in de standaard situatie niet spectraal selectief, wat betekent dat het doorgelaten licht gemiddeld voor 50% uit PAR en voor 50% uit NIR bestaat. In de volgende grafieken is voor een betere leesbaarheid de y-as uitvergroot, daarom is de schaal van de y-as telkens verschillend.

4.4.1 Verandering lichttransmissie

In de eerste serie berekeningen is het effect van de overall transmissie berekend. Uitgaande van een standaard transmissie van 76% is een variatie aangebracht van -5, -10, 5 en 10%-punten. De resultaten voor een standaardkas worden getoond in Figuur 51 en die voor een gesloten kas in Figuur 52.



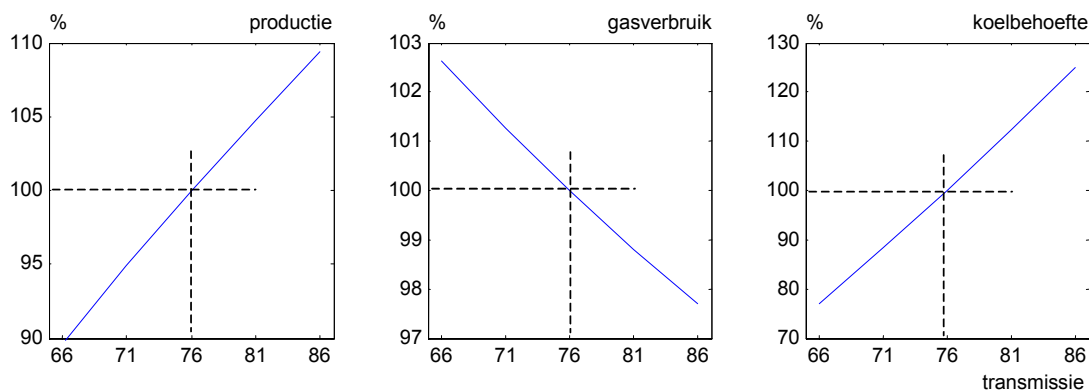
Figuur 51 Effect van lichttransmissie op productieniveau en gasverbruik bij een standaard tomatenkas.

Figuur 51 toont een sterk effect van de lichttransmissie op de productie en een kleiner effect op het gasverbruik. De verlaging van het gasverbruik bij een hogere lichttransmissie komt doordat er in geval er meer licht in de kas komt ook de toevoer van zonne-energie toeneemt. Het effect is echter zwak omdat een groot deel van het gasverbruik 's nachts plaatsvindt, en dus geen invloed ondervindt van een andere lichttransmissie.

In het effect van de toename van de productie met de toename van de lichttransmissie lijkt de 1% regel bewezen te worden. Het moet echter wel gezegd worden dat een toename van de lichttransmissie van 76% naar 86% tien procentpunten is, maar in lichtintensiteit een toename van 13% is. Deze figuur laat dus zowel bij een verhoging als bij een verlaging van de lichttransmissie een iets kleiner effect dan de veel gebruikte 1% regel zien. Bij verhoging geeft de grafiek aan dat 1% verhoging van de lighthoeveelheid leidt tot 0,6% productietoename. Het effect bij verlaging is iets sterker, namelijk 0,7% productieverlaging per procent verlaging van de hoeveelheid licht die de kas binnentreedt.

Het feit dat de relatie tussen lighthoeveelheid en productie in deze grafieken wat zwakker lijkt dan de 1%-regel komt onder andere door de invloed van de lichtdoorlatendheid van de kas op het CO₂-regime. Een verandering van de lichttransmissie heeft namelijk ook een effect op de warmtevraag (zie het gasverbruikseffect in Figuur 51) en het ventilatiedebiet (meer ventilatiebehoefte). Beide effecten leiden ertoe dat in een kas met een hoge lichtdoorlatendheid in de zomer een wat lagere CO₂-concentratie zal optreden. Een kas met een lagere lichtdoorlatendheid zal in de zomer een wat hogere CO₂-concentratie te zien geven. Hierdoor wordt de potentiële verandering van de productie bij een veranderde lighthoeveelheid in de kas enigszins gedempt.

In een gesloten kas is er (nagenoeg) geen effect van de lichttransmissie op de gemiddelde CO₂-concentratie. In Figuur 52 zien we dan ook een sterkere relatie tussen productie en lichttransmissie (bijna 0,8% per% verandering van de lighthoeveelheid). Uitgedrukt in procentpunten ten opzichte van de standaard toont zich hier zelfs een 1 op 1 verband.



Figuur 52 Effect van lichttransmissie op productieniveau, gasverbruik en koellast bij een gesloten kas.

Het effect van een andere lichtdoorlatendheid op het gasverbruik is voor een gesloten kas niet verschillend ten opzichte van dit effect bij een standaard kas.

Het effect op de benodigde koel-energie is groot. Dit komt doordat bij hoge lichtdoorlatendheid de koelinstallatie harder moet werken, maar ook meer uren maakt.

4.4.2 Verandering NIR transmissie

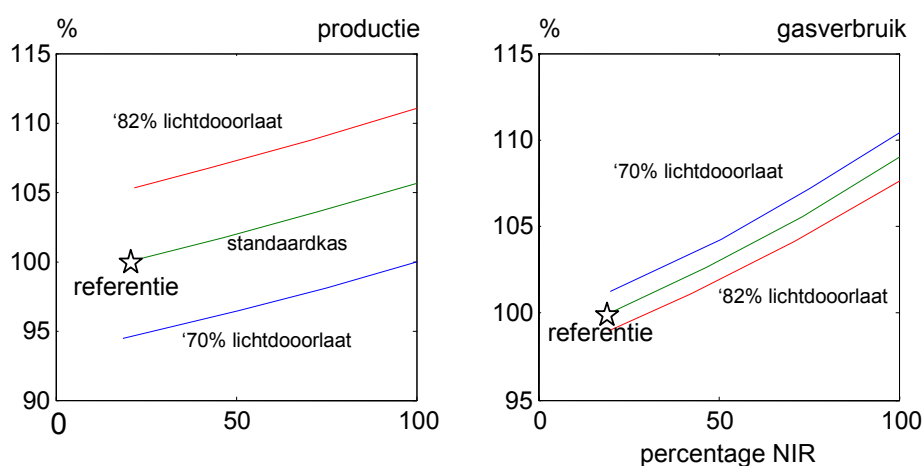
In de ontwikkeling van gesloten kassen is de grote koelbehoefte in de zomer een belangrijk probleem. De kas moet worden uitgerust met volumineuze luchtbehandelingssystemen en gebruikt veel elektriciteit voor de circulatie van grote luchthoeveelheden.

Voor gewone kassen leidt het grote warmteoverschot in de zomer tot grote CO₂ verliezen door de grote ventilatiebehoefte.

Gezien het feit dat de helft van het zonlicht uit nabij infrarode straling (NIR) bestaat, en het feit dat deze straling niet bijdraagt aan de productie, zou het interessant kunnen zijn het NIR in het kasdek te reflecteren door middel van een spectraal selectieve reflectie-coating.

In deze paragraaf is nagegaan in welke mate productie, gasverbruik en koelbehoefte veranderen, wanneer wordt verondersteld dat het kasdek het NIR in oplopende mate reflecteert (tot 100%).

De resultaten voor een standaardkas staan afgebeeld in Figuur 53 en de effecten voor een gesloten kas in Figuur 54.



Figuur 53 Effect van de mate van NIR-reflectie op productieniveau, energievraag en koellast bij een standaardkas. De berekeningen zijn gemaakt bij de standaard lichtdoorlatendheid (76%), een kas met een hoge lichtdoorlatendheid (82%) en een lage lichtdoorlatendheid (70%).

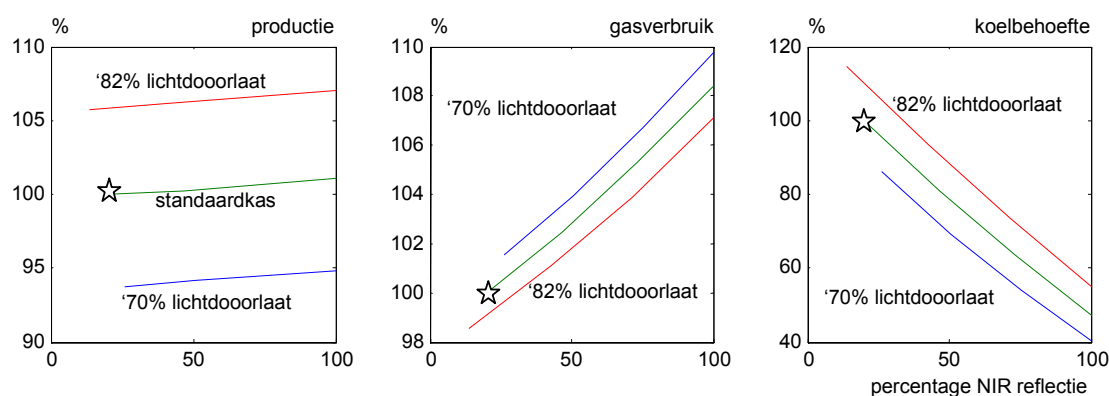
Figuur 53 laat zien dat bij standaardkassen de algemene teneur van het effect van toenemende reflectie van NIR is dat de productie oploopt (5% productieverhoging ten opzichte van standaard bij volledige reflectie van het NIR). Dit effect is onafhankelijk van het feit of de algemene lichttransmissie hoog of laag is. Het productieverhogende effect van de reflectie van NIR komt voor het grootste deel voort uit het verminderde CO₂-verlies. Een klein deel van de productietoename moet worden toegeschreven aan een wat lagere onderhoudsademhaling in een kas met een lagere warmtelast.

Een verhoogde reflectie van NIR leidt echter eveneens tot een toename van het gasverbruik (8% bij een volledige reflectie van NIR). Dit komt doordat in de koude periode van het jaar de toetreding van NIR een welkome bijdrage levert aan de warmte-input.

Een mogelijkheid om alleen het positieve effect van een NIR-reflecterende coating te benutten en het nadelige effect te elimineren is het gebruik van een NIR-reflecterende coating op een beweegbaar scherm. Dit kan dan worden gesloten als de kas gekoeld moet worden en in andere gevallen kan het open worden gehouden.

In Figuur 54 is het effect van een NIR-reflecterende coating op productie, gasverbruik en koelbehoefte in een gesloten kas weergegeven. In een gesloten kas is er geen relatie tussen koelbehoefte en CO₂-regime waardoor het productie effect van een verhoogde NIR-reflectie zeer klein is (1%). Het effect op het gasverbruik is vergelijkbaar met het effect van een verhoogde NIR-reflectie op het gasverbruik van een standaard kas.

Het effect van een verhoogde NIR-reflectie op de koelbehoefte is zeer groot. Volledige reflectie verlaagt de koellast met 50%, wat geheel overeenkomstig de verwachting is, aangezien in dat geval de stralingsbelasting van de kas halveert.

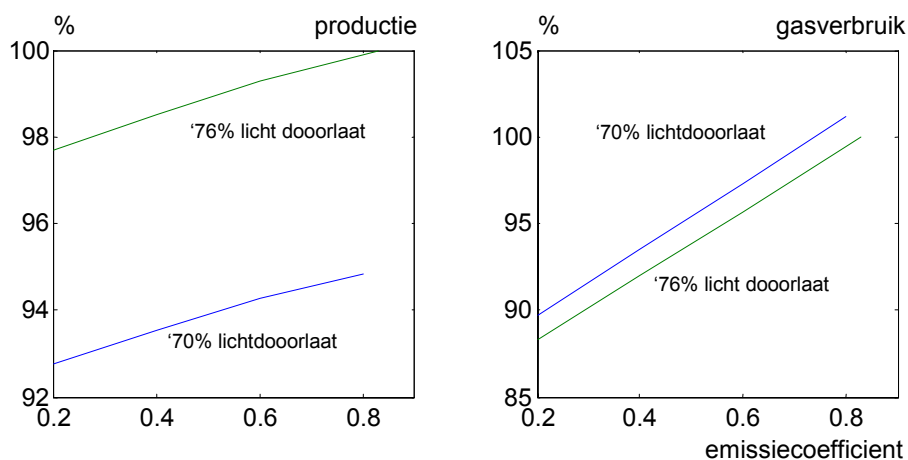


Figuur 54 Effect van de mate van NIR-reflectie op productieniveau, gasverbruik en koellast in een gesloten kas. De berekeningen zijn gemaakt bij de standaard lichtdoorlatendheid (76% diffuus), een kas met een hoge lichtdoorlatendheid (82% diffuus) en een lage lichtdoorlatendheid (70% diffuus)

4.4.3 Verlaging emissiecoëfficiënt

Bij gebruik van de gebruikelijke kasomhullingsmaterialen wordt het warmteverlies van het kasdek voor ongeveer de helft bepaald door stralingsverlies in het ver infrarode gebied (FIR). Dit stralingsverlies wordt de uitstraling naar de hemel genoemd (engels: sky). De materiaaleigenschap die verantwoordelijk is voor deze langgolvlige stralingsuitwisseling is de emissiecoëfficiënt van het dekmateriaal. Een gebruikelijk glazen dek heeft een emissiecoëfficiënt van 0,83. Verlaging van deze coëfficiënt vermindert de uitstraling en bespaart dus energie. In deze paragraaf wordt dit effect door middel van een aantal simulatieberekeningen gekwantificeerd. Daarbij wordt uitsluitend de emissiecoëfficiënt van de bovenzijde beïnvloed, omdat een verlaging van de emissiecoëfficiënt van de onderzijde vrijwel geen effect sorteert. Dit laatste komt doordat een vochtfilm op een oppervlak de emissiecoëfficiënt op 1 brengt. Condens, wat in het stookseizoen eigenlijk altijd aan de onderkant van het kasdek aanwezig is, doet het effect van een verlaagde

emissiecoëfficiënt dus teniet. Figuur 55 toont het effect van een verlaagde emissiecoëfficiënt in een standaard kas.

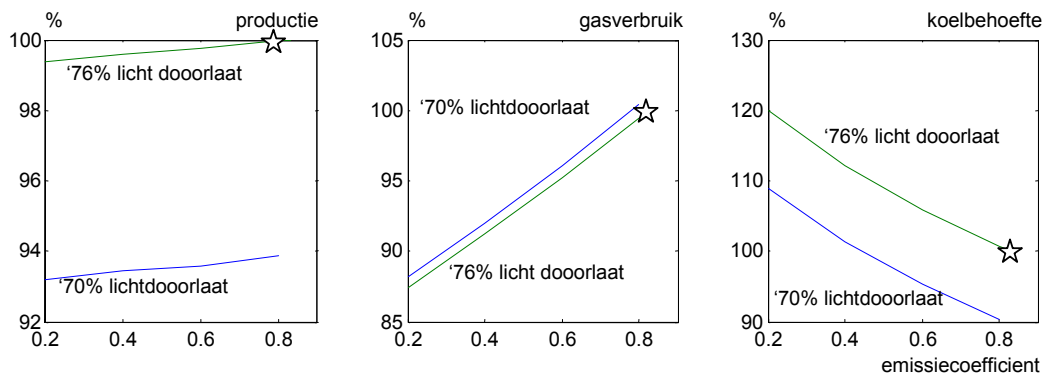


Figuur 55 Effect van de verkleining van de emissiecoëfficiënt voor warmtestraling op productie en gasverbruik voor een standaard kas. Er is een variant voor een kas met een gebruikelijke lichtdoorlatendheid (76%) en een kas met een lagere doorlatendheid (70%) doorgerekend. In alle berekeningen is alleen de emissiecoëfficiënt aan de bovenzijde aangepast.

Het effect van de emissiecoëfficiënt op de productie is weer een afgeleid effect. Het hoofdeffect van een lagere emissiecoëfficiënt is namelijk een kleiner warmteverlies. Dit komt sterk tot uitdrukking in de verlaging van het gasverbruik (ruim 10% verlaging bij een emissiecoëfficiënt naar 0,20), maar zal ook tot een groter ventilatiedebiet leiden. Beide gevolgen leiden tot een lagere CO₂-concentratie, en daarmee tot een lagere productie.

Vaak zal een verlaging van de emissiecoëfficiënt gepaard gaan met een verlaging van de totale lichtdoorlatendheid (zoals bij gecoat glas Hortiplus). De nadelige effecten van de coating op de productie werken dan dubbelop.

In Figuur 56 is het effect van een verlaagde emissiecoëfficiënt voor een gesloten kas getoond. Bij de gesloten kas is het effect van een lage emissiecoëfficiënt op de productie erg klein. Hier speelt namelijk alleen de toegenomen onderhoudsademhaling van het gemiddeld wat warmere gewas. Uiteraard is ook bij de gesloten kas het effect van de coating op het gasverbruik groot. Het afgenomen warmteverlies heeft echter ook hier weer als keerzijde dat de koelbehoefte van de gesloten kas oploopt met de verbeterde isolatiegraad.

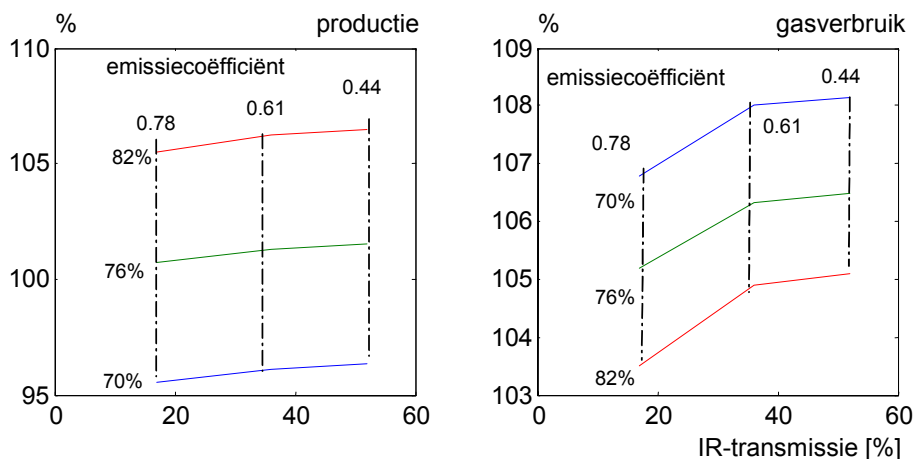


Figuur 56 Effect van de verkleining van de emissiecoëfficiënt voor warmtestraling op productie, gasverbruik en koellast voor een gesloten kas. Er is een variant voor een kas met een gebruikelijke lichtdoorlatendheid (76%) en een kas met een lagere doorlatendheid (70%) doorgerekend. De emissiecoëfficiënt verlagende behandeling is alleen aan de bovenzijde toegepast.

4.4.4 Verlaging van de FIR-transmissie van folies

Een groot verschil tussen de gangbare foliematerialen en glas is het feit dat folies, wanneer de binnenkant droog is, in meer of mindere mate transparant zijn voor FIR (ver infrarood). Dit betekent dat de langgolvlige stralingsuitwisseling van alles wat zich in de kas bevindt dan niet alleen met het kasdek plaatsvindt, maar ook met de veel koudere hemel.

Om deze transmissie van FIR te beperken kunnen additieven aan het foliemateriaal worden toegevoegd. Deze additieven beïnvloeden echter ook de emissiecoëfficiënt van de folie. Daarom is er bij berekeningen aan veranderde transmissie eigenschappen van een folie altijd ook sprake van een veranderde emissiecoëfficiënt.



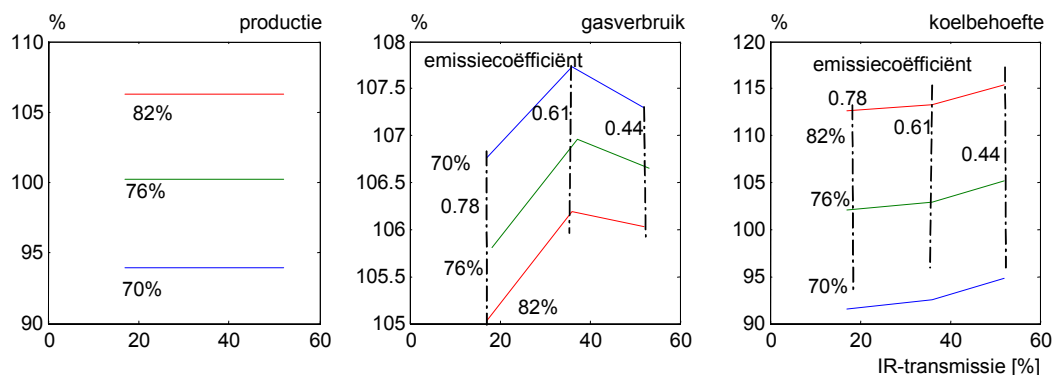
Figuur 57 Effect van de verkleining van de FIR transmissiecoëfficiënt op de productie en op het gasverbruik in een standaard kas. De emissiecoëfficiënt van de verschillende folies staat bovenin de grafiek aangegeven. Alle effecten zijn relatief ten opzichte van een standaard glazen kas (100%). Een glazen kas heeft een FIR-transmissie 0 en een emissiecoëfficiënt 0,83. De effecten zijn berekend bij een zichtbare lichttransmissie van 70%, 76% (standaard) en 82%.

In Figuur 57 wordt het effect van de FIR-transmissie bij een standaard kas getoond. De figuur laat zien dat de berekende effecten van een verandering van de FIR-transmissie gering zijn. De licht toenemende productie bij een verhoging van de FIR-transmissie heeft te maken met de toename van het gasverbruik (meer CO₂) en mogelijk een toename van de warmte-uitstraling (dus minder ventilatie).

Het gasverbruik van foliekassen ligt 5 tot 6% hoger dan bij een vergelijkbare glazen kas. Als de foliekas een hogere lichtdoorlatendheid heeft wordt een deel van het grotere warmteverlies gecompenseerd door een grotere warmtetoevoer uit zonnestraling. Is de doorlatendheid van de folie kleiner dan die van glas dan stapelen de negatieve effecten zich op.

Een geringe FIR-transmissie is bij folies belangrijker dan een lage emissiecoating. Het toch geringe effect van de FIR-doorlatendheid van de folies wordt veroorzaakt door het feit dat gedurende de nacht en op koude dagen de binnenkant van het kasdek vrijwel altijd nat zal zijn door condens. In die gevallen blokkeert de condenslaag de FIR-transmissie en zijn alle folies voor wat betreft de FIR-transmissie gelijk. Ook de emissiecoëfficiënt van de folies zal in dat geval richting 1 gaan lopen.

De verschillen tussen de folies komen dus alleen tot uitdrukking tijdens perioden dat het kasdek droog is. Dit betekent dat verschillen vooral overdag en tijdens minder koude dagen kunnen optreden, waardoor de energieverbruiksverschillen sterk gedempt zullen worden.



Figuur 58 Effect van de verkleining van de FIR transmissiecoëfficiënt op productie, gasverbruik en koelbehoefte in een gesloten kas. De emissiecoëfficiënt van de verschillende folies staat bovenin de grafiek aangegeven. Alle effecten zijn relatief ten opzichte van een standaard glazen kas (100%). Deze heeft een FIR-transmissie 0 een emissiecoëfficiënt 0,83 en een lichtdoorlatendheid van 76%. De effecten zijn berekend voor folies met een zichtbaar licht-transmissie van 70%, 76% (vergelijkbaar met glas) en 82%.

In Figuur 58 is het effect van de FIR-transmissie van folies op de drie kentallen van een gesloten kas weergegeven. Doordat er bij een gesloten kas nauwelijks een relatie bestaat tussen CO₂-regime en ventilatiebehoefte heeft de FIR-transmissie geen effect op de productie. Het gasverbruik-effect lijkt nogal af te wijken ten opzichte van dat bij een standaardkas, maar dit heeft vooral te maken met de schaalverdeling van de y-as. Bij de gesloten kas steeg het gasverbruik bij één toename van de FIR-doorlatendheid van 40 naar 60% met 0,2%-punten en bij de gesloten kas daalt het verbruik met 0,2%-punten.

In feite kan geconcludeerd worden dat pas bij een verlaging van de FIR-transmissie naar waarden onder de 20% enige energiebesparing gerealiseerd kan worden.

Het effect van de FIR-transmissie op de koelbehoefte is eveneens gering. De geringe stijging van de koelbehoefte bij een toename van de FIR-transmissie duidt er op dat het effect van de afnemende emissiecoëfficiënt op het warmte-overschot in de zomer groter is dan het effect van een toenemende FIR-transmissie.

Samenvatting hoofdstuk 4.4

- **Het verhogen van de PAR straling met 10% leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 8% en een reductie van het gasverbruik van ca. 2.5%. In een gesloten kas wordt de koellast met ca. 25% verhoogd.**
- **Het uitfilteren van alle NIR straling leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 5% en een verhoging van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk maar wordt de koelbehoefte met 50% gereduceerd.**
- **Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor warmtestraling (FIR). Bij dit soort kasdekmaterialen leidt de reductie van de emissiecoëfficiënt in een standaard tomatenkas tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 10%. In een gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk en wordt de koelbehoefte met ca. 20% verhoogd.**
- **Bij kunststoffolies worden additiven toegevoegd om de doorlatendheid voor warmtestraling (FIR) te reduceren. Hierdoor verandert ook de emissiecoëfficiënt. In totaal is het gasverbruik ook bij folies met een lage FIR-transmissie altijd licht hoger dan bij glas, PMMA of PC. In een standaard tomatenkas leidt een verlaging van de FIR-transmissie naar 20% tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie gelijk en veranderen gasverbruik en koelbehoefte nauwelijks.**
- **De overall-effecten van een aangepast kasdek materiaal (vernadering van meerdere materiaaleigenschappen) voor een bepaald gewas jaarrond moeten verder worden onderzocht.**

5 Synthese

In hoofdstuk 3 is de lichtbehoefte van gewassen tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal en tijdens de productiefase onderzocht. Per gewasgroep (vruchtgroenten, bladgroenten, snijbloemen, potplanten) is aangegeven welke lichtintensiteit en welk spectrum nodig is, om een optimale gewasproductie te realiseren. In hoofdstuk 4 werd geïnventariseerd, welke kasomhullings- en schermmaterialen er zijn, welke optische eigenschappen relevant zijn om natuurlijk licht in de kas door te laten dringen en indien gewenst gericht te veranderen. Tevens is een overzicht gegeven van de technische mogelijkheden die er zijn om materiaaleigenschappen aan te passen. In dit hoofdstuk wordt nu gekeken hoe een bepaalde lichtbehoefte voor een gewasgroep gerealiseerd of geoptimaliseerd zou kunnen worden en wat daarvan de gevolgen voor het gewas en de energiehuishouding van de kas zullen zijn. Ook wordt aangegeven waarop verder onderzoek in dit veld gericht zou moeten worden.

5.1 Algemene trends

5.1.1 Lichtintensiteit.

Behoeft vanuit de plant

Zonlicht is een van de belangrijkste factoren met betrekking tot de groei en ontwikkeling van planten. Door het proces van fotosynthese maakt de plant bouwstoffen voor de groei vanuit licht, water en CO₂. In het algemeen geldt dat meer licht leidt tot een betere groei, een hogere productie en een betere kwaliteit. Dit omdat water en CO₂ voor tuinbouwgewassen onder glas minder beperkend zijn dan licht. In Nederland is in de zomerperiode licht niet de belangrijkste beperkende factor, maar in de winterperiode wel omdat de hoeveelheid natuurlijk licht in kas veel lager is. Met de natuurlijke lichtcondities in Nederland kunnen maar enkele soorten worden geteeld zonder bijbelichting. Al neemt de efficiëntie van de lichtbenutting van het gewas toe bij een lagere lichtintensiteit, de verschillen in lichtefficiëntie tussen gewassen zijn beperkt in de winter.

Voor alle planten is een lichtintensiteit aan te geven die minimaal nodig is voor vegetatieve groei. Daarnaast is er vaak een hogere intensiteit nodig om niet alleen te groeien, maar ook nog bloemen en vruchten te produceren. De lichtbehoefte is niet voor alle planten gelijk: er zijn lichtminnende planten en schaduwplanten. Voor verschillende gewassen is bekend bij welke minimale lichtintensiteit ze nog geteeld kunnen worden: van 8 tot 10 mol m⁻² d⁻¹ voor tomaat, de groei en productie neemt daarboven toe tot ca 30 mol m⁻² dag⁻¹, tot 2 mol m⁻² d⁻¹ voor Saintpaulia, met een toename tot 4 tot 8 mol m⁻² dag⁻¹. Voor enkele lichtminnende gewassen, vooral vruchtgroenten en enkele bloeiende potplanten, is er in de winter, vooral bij bewolkt weer, te weinig natuurlijk licht om goed te produceren. Voor alle gewassen geldt: hoe meer licht in de winter de kas binnenkomt, hoe beter de groei en productie is.

Voor schaduwplanten is de hoeveelheid natuurlijk licht in de zomer ruim voldoende. Soms moet er zelfs geschermd worden om de intensiteit van straling te beperken. Bij Saintpaulia en Dracaena wordt boven 250 respectievelijk 400 μmol m⁻² s⁻¹ (in de kas) geschermd in om bladschade te voorkomen. Bij diffuus kasdek kan waarschijnlijk bij hogere lichtintensiteiten worden geschermd.

Natuurlijke lichtintensiteit

Natuurlijke straling buiten de kas (gemiddelde stralingsom, waarvan gemiddeld 76% in de kas komt)

Donkerste maanden (6-11 t/m 6-2):	2.8 mol m ⁻² d ⁻¹
Lichtste maanden (6-5 t/m 6-8):	20.7 mol m ⁻² d ⁻¹

Lichtbehoefte gewassen

Vruchtgroenten (tomaat): 8-10 mol m⁻² d⁻¹ (minimum), 50 mol m⁻² d⁻¹ (lichtverzadiging)

Snijbloemen (roos): 3.8 mol m⁻² d⁻¹ (minimum), >30 mol m⁻² d⁻¹ (optimaal)

Potplanten (Saintpaulia): 2-8 mol m⁻² d⁻¹ (minimum), 200 μmol m⁻² s⁻¹ (drempelwaarde waarboven wordt geschermd)

→ Lichtbehoefte van de meeste gewassen in winter is hoger dan gemiddelde natuurlijke stralingsom

→ Lichtbehoefte bij sommige schaduwplanten in de zomer meestal lager dan natuurlijke straling

→ **Verbetering: Lichtintensiteit in kas in winter zo hoog mogelijk, lichtreductie zo nodig in de zomer**

In het algemeen kan gesteld worden dat meer licht in de kas een positief effect heeft op de groei en productie en een reductie in het gasverbruik als gevolg heeft. Echter, een verhoging van de productie gaat niet altijd gepaard met een betere kwaliteit. Voor alle gewasgroepen wordt de productie verhoogd door meer licht in de kas. Voordelen worden vooral gerealiseerd in de (winter)maanden met het minste licht. Voor chrysant wordt de kwaliteit sterk verbeterd, maar voor de vruchtgroenten wordt de kwaliteit niet, of zelfs negatief beïnvloed. Dit omdat de sterke schommelingen in het kasklimaat de kans op condens en schimmelziekten vergroot.

Effect hogere lichtintensiteit op productie, kwaliteit en gasverbruik

De gevolgen van meer licht in de kas op enkele gewasgroepen zijn gegeven in kwalitatieve zin en gelden op jaarbasis. (+) betekent een toename, (-) betekent minder kwaliteit/gasverbruik, en (?) betekent onbekend.*

	Productie	Kwaliteit	Gasverbruik
Vruchtgroenten (tomaat, komkommer)	+	-	-
Bladgroenten (sla)	+	?	-
Snijbloemen éénmalig oogstbaar (chrysant)	+	++	-
Snijbloemen meermalig oogstbaar (roos)	+	+	-
Potplanten (ficus, spathiphyllum)	+	+	-

* Gebaseerd op Dueck et al. (2004)

In de praktijk gaat men ervan uit dat ochtendzon belangrijker is dan avondzon. De achterliggende gedachte daarbij is dat de licht benuttingsefficiëntie 's ochtends groter zou zijn dan 's middags. Het is evenwel nog steeds niet helemaal duidelijk of dit vooral moet worden toegeschreven aan interne, plantfysiologische factoren, of dat externe factoren (lage luchtvochtigheid, hoge temperatuur, CO₂-beperkingen) de geringere fotosynthese efficiëntie bepalen.

De plantengroei is echter niet alleen afhankelijk van de fotosynthese, en dus de lichtintensiteit: de temperatuur speelt ook een grote rol. In het kader van deze verkenning is vooral de licht/temperatuur verhouding van belang. In Nederlandse kassen is deze verhouding vaak (te) laag. Minder stoken in de winter is echter soms niet wenselijk omdat bij lagere temperaturen fysiologische processen geremd worden wat de groei vertraagt, wat vooral goed waarneembaar is bij een aantal (subtropische) gewassen. Slechts enkele gewassen kunnen dus met de natuurlijke lichtniveaus in de kas in de winter worden geteeld, tenzij de hoeveelheid PAR licht kan worden verhoogd. In de zomer stijgt de temperatuur in de kas waardoor het gewas meer moet verdampen om de plant te koelen. Wanneer de opnamecapaciteit van water tekort schiet leidt dit tot het sluiten van de huidmondjes en reductie van de fotosynthese. Zelfs bij optimale CO₂- en vochtvoorziening kan de optimumtemperatuur voor de fotosynthese lager zijn dan de zomertemperaturen in de kas. Deze optimumtemperatuur is gewasspecifiek. Om warmte en vocht af te voeren wordt er gelucht, waardoor verhoging van het CO₂-gehalte in de kas nauwelijks meer mogelijk is. Ook dit leidt tot reductie van de fotosynthese. Als de overtollige warmte op een andere manier buiten de kas gehouden kan worden of afgevoerd kan worden zal dit de fotosynthese positief beïnvloeden. Het uitfilteren van NIR-straling zou het tijdstip kunnen uitstellen waarop gelucht moet worden waardoor de CO₂ beter benut kan worden.

Verbeterde lichtcondities in de kas

In winter lichtintensiteit in de kas te laag ten opzichte van temperatuur

→ *Licht-Temperatuur verhouding te laag*

→ *Reductie temperatuur niet altijd wenselijk, fysiologische processen geremd*

→ **Verbetering: Lichtintensiteit in kas in winter zo hoog mogelijk of als mogelijk de temperatuur omlaag**

In zomer temperatuur in de kas te hoog

→ *Licht-Temperatuur verhouding te laag*

→ *Verdamping plant stijgt, aanvoer water beperkt, huidmondjes sluiten, CO₂ opname en fotosynthese beperkt*

→ **Verbetering: Temperatuur in kas in zomer aanpassen aan lichtniveau**

Perspectieven voor verbetering Licht - Temperatuur verhouding door aanpassing kas

Als gekeken wordt naar de lichtbehoefte van een plant of gewas en naar het efficiënt gebruik maken van de beschikbare hoeveelheid licht, moet onderscheid worden gemaakt tussen perioden met (te) veel licht en perioden met (te) weinig licht. Algemeen kan gesteld worden dat zowel meer licht (lichtsom PAR) in de winter als minder warmte in de zomer (minder NIR) voor alle gewasgroepen positief zou werken.

In perioden met weinig licht zoals in de winter is de lage hoeveelheid natuurlijk licht beperkend voor de fotosynthese, plantontwikkeling, opbrengst en kwaliteit (4.2.1). Een hogere lichttransmissie van een kas kan tot 5-10% meer licht in de kas leiden. Huidige kasdekmaterialen hebben een lichttransmissie van gemiddeld 90%, deze zou met nieuwe materialen verhoogd kunnen worden tot 95%. De totale lichttransmissie van een kas inclusief de constructiedelen is op gewasniveau gemiddeld 76%. Door verbeteringen aan de kas zelf zou additioneel rond 5% meer lichtwinst geboekt kunnen worden, zodat in totaal de lichttransmissie van een kas met 5-10% wordt verhoogd. Een 5% hogere lichttransmissie leidt tot een 4-5% hogere productie bij tomaat. Bijkomend voordeel is een ca. 1,5% lager gasverbruik in een standaard tomatenkas (4.4.1). Er ontstaat echter voor sommige gewassen een hoger lichtoverschot in de zomer. In een gesloten kas neemt de koelbehoefte in zomer met ca. 10% toe. Afhankelijk van de lichtbehoeftes van het gewas kan het lichtoverschot in de zomer op vrij eenvoudige wijze worden weggeschermd (4.1.4.2).

Om meer natuurlijk licht in de winter te realiseren kan gedacht worden aan het gebruik van wit glas (4.1.1) met een ca. 1-2% hogere lichtdoorlatendheid dan blank glas. Dit glas laat echter ook een gedeelte van de UV-B straling door wat niet voor alle gewassen voordelig is. Door het verminderen van de reflectie op het kasdek dringt meer natuurlijk licht door in de kas. Dit kan via kasomhullingsmaterialen (bijvoorbeeld glas) met reflectieverminderende oppervlaktecoatings (4.3.1.1), met een veranderde micro-oppervlaktestructuur of met een zigzag structuur van het dekmateriaal (4.3.1.2). Er wordt verwacht dat antireflectie-coatings op middellange termijn ingang in de tuinbouw zullen vinden. Materialen met een veranderde oppervlaktestructuur zijn recent ontwikkeld en zullen binnenkort bij tuinder worden toegepast. Een andere optie is het toepassen van “nieuwe” materialen zoals ETFE-membraan (4.1.3) met een hoge lichtdoorlatendheid en goede mechanische eigenschappen. Hier worden de hogere investeringskosten gerechtvaardigd door de naar verwachting hogere opbrengsten. Bovendien kan de lichttransmissie verhoogd worden door het toepassen van fluorescentie coatings op glas of additieven in folie (4.3.2.3). Het omzetten van UV straling in PAR straling (blauw of rood) biedt mogelijkheden. Echter geven de huidige fluorescerende pigmenten hooguit 1-3% meer PAR.

Op langere termijn moet vooral aandacht worden gegeven aan nieuw te ontwikkelen materialen, zoals nanoschuim, welke gelijktijdig een hogere lichttransmissie en een hoge isolatiewaarde realiseren (4.1.6).

Additioneel leiden aanpassingen aan de kasconstructie zelf en de vaste installaties tot een hogere lichttransmissie van de kas.

Gevolgen verbeterde lichtcondities in de kas

*Maatregel: Verhoging PAR-transmissie kas (met 5%)**

Traditionele kas:

Gevolgen energieverbruik: -1.5% gasverbruik jaarrond (enkel kasdek)
tot -20% gasverbruik (geïsoleerd kasdek)

Gevolgen gewasproductie: +4-5% productie jaarrond

Gesloten kas:

Gevolgen energieverbruik: -1.5% gasverbruik jaarrond (enkel kasdek),
tot -30% (geïsoleerd kasdek),
+10% koelbehoefte in de zomer

Gevolgen gewasproductie: +5% productie jaarrond

* Berekningen uitgevoerd voor het voorbeeldgewas tomaat met KASPRO (gasverbruik) en INTKAM (productie)

Om minder warmte de kas binnen te krijgen en gelijktijdig veel licht, zijn kasomhullingsmaterialen wenselijk die alleen PAR straling doorlaten, maar de NIR straling er specifiek uithalen (4.2.3). Dit kan door absorptie (4.3.2.1), reflectie (4.3.2.2) of interferentie (4.3.2.4) in het NIR gebied. Op dit moment zijn dergelijke materialen evenwel nog niet beschikbaar. NIR-reflecterende pigmenten werken effectiever dan NIR-absorberende pigmenten, omdat in het laatste geval de absorptie leidt tot een opwarming van het materiaal, waardoor de kas meer opgewarmd wordt dan wanneer de NIR straling gereflecteerd wordt.

Een interferentie-coating op glas haalt het merendeel van de NIR straling eruit. Glas met een NIR-interferentie-coating bestaat al voor andere toepassingen, maar is nog niet getest in de tuinbouwpraktijk. Voor kunststoffen zijn zowel NIR-reflecterende als ook NIR-absorberende pigmenten beschikbaar. Huidige pigmenten kunnen gedeeltes van de NIR straling uitfilteren, vaak is dit verbonden met een reductie van de PAR straling.

Ook thermochromatische materialen (4.3.2.7) zullen op langere termijn een oplossing kunnen bieden als het werkingsmechanisme op de tuinbouwomstandigheden wordt afgestemd.

Een laatste mogelijkheid is weelicht het gebruik van een dakbevoeiingssysteem met NIR absorberende additieven in de versproiede vloeistof. Dit biedt tevens de mogelijkheid om de geabsorbeerde warmte af te voeren en op te slaan om in tijden met een warmtetekort weer te gebruiken.

Kasomhullingsmaterialen welke NIR filteren doen dit jaarrond en dus niet alleen in de zomer maar ook in de winter. In de zomer is dit een gewenst effect, maar in de winter wil men juist warmte binnenhalen om het gasverbruik zo laag mogelijk te houden. Het volledige uitfilteren van NIR jaarrond verlaagt de behoefte aan koeling in een gesloten kas in de zomer met 50%.

Gelijktijdig gaat de warmtevraag in de winter echter met 8% omhoog. In een standaard tomatenkas wordt in dit geval de productie door de verlaagde warmtebelasting in de zomer met 5% verhoogd. In een gesloten kas heeft de vermindering van de NIR-doorlaat nauwelijks effect op de productie.

Het toepassen van een NIR-reflecterend scherm of NIR-absorberende dakbevoeiingssystemen biedt de voordelen in de zomer zonder de nadelen in de winter. Het is echter niet bekend in welke mate temperatuur en productie worden beïnvloed. Het zou moeten worden onderzocht

wat de beste methode is voor het uitfilteren van NIR. Zowel permanente als ook tijdelijke maatregelen moeten worden onderzocht. Ook toepassingen voor delen van de kas zijn voorstelbaar. Effecten op het kasklimaat, energieverbruik en gewasproductie zijn belangrijk.

Gevolgen verlaagde warmtebelasting in de kas

Maatregel: Reductie NIR-straling in kas (met 100%)^{}*

Traditionele kas:

Gevolgen energieverbruik: +8% gasverbruik jaarrond

Gevolgen gewasproductie: +5% productie jaarrond

Gesloten kas:

Gevolgen energieverbruik: +8% gasverbruik jaarrond, -50% koelbehoefte in de zomer

Gevolgen gewasproductie: +1% productie jaarrond

^{*} Berekeningen uitgevoerd voor het voorbeeldgewas tomaat met KASPRO

Kennisleemtes (witte vlekken)

- (Licht)omstandigheden op het opkweekbedrijf moeten beter aansluiten op de omstandigheden op het productiebedrijf om (groeitijd) verlies te voorkomen. Mogelijk zou de teeltduur hierdoor met 1-2 weken verkort worden.
- De kosteffectiviteit van meer licht voor planten tijdens transport en opslaan (omstandigheden met laag lichtniveau) is onvoldoende bekend.
- In theorie, gegeven optimale condities, is fotosynthese afhankelijk van het licht. Vooral midden op de dag blijkt deze afhankelijkheid echter vaak niet eenduidig. Redenen daarvoor, en de achtergrond van de waargenomen verschillen tussen gewassen zijn in onvoldoende bekend.
- Het blijkt dat lichtefficiëntie van de plant lager is in de fase van knopgroei. Hoe groot is de invloed ervan op de generatieve productie en is het mogelijk de lichtefficiëntie te verhogen?
- Wordt de netto gewasfotosynthese beïnvloed door de daglengte, voor planten die van oorsprong uit tropische regionen komen en dus niet aangepast kunnen zijn aan de lange zomerse dagen in Nederland.
- Is er een lichtniveau aan te geven voor minder lichtminnende gewassen waarop gewasschade ontstaat, zodat geschermd kan worden om schade te voorkomen? Er zijn aanwijzingen dat dit afhankelijk is van plantensoort en van de LAI?

Toekomstbeeld

- Een schakelbare, intelligente kasomhulling, welke het lichtniveau (automatisch) aanpast aan de gewasbehoefte: maximale lichtdoorlatendheid in stralingsarme perioden (ochtend, avond, winter), minder lichtdoorlatendheid in stralingsrijke perioden (middag, zomer).
- Het is wenselijk dat deze geavanceerde kasomhulling in stralingsarme perioden (winter) het PAR-licht in de kas zelfs op een hoger niveau brengt dan de natuurlijke straling buiten om de

gewasproductie te maximeren en gelijktijdig een zeer hoge isolatiewaarde heeft om het gasverbruik te reduceren.

- Het is verder wenselijk dat deze geavanceerde kasomhulling in perioden met voldoende licht, maar met teveel warmte in de kas, NIR wegfiltert, het licht diffuus maakt en eventueel bepaalde delen van het spectrum wegschermt.

5.1.2 Lichtverdeling.

Behoefte vanuit de plant

Voor een jong gewas is er in het algemeen vaak te weinig bladoppervlakte om al het licht te onderscheppen. Het deel van het licht dat niet door blad wordt geabsorbeerd, wordt grotendeels omgezet in warmte en gaat voor de groei verloren. Maatregelen die ervoor zorgen dat meer licht terug in het gewas reflecteert bieden hier een verbetering.

Voor vruchtgroenten als tomaat en paprika met een hoog opgaande gewasstructuur wordt het meeste licht door de bovenste bladeren van het gewas opgevangen en bij hoge lichtintensiteiten niet volledig benut voor de fotosynthese. Dieper in het gewas neemt de hoeveelheid licht snel af waardoor de fotosynthesecapaciteit in de onderliggende bladeren niet volledig wordt gebruikt. Wanneer de hoge absorptie in bovenste bladlagen verschoven kan worden naar de onderste bladlagen wordt de efficiëntie van de fotosynthese van de totale plant verhoogd. Een kwantitatieve onderbouwing van deze hypothese ontbreekt nog. Onbekend is of het ook leidt tot netto productietoename: het in stand houden van fotosynthetisch actief blad onderin het gewas is niet 'gratis' voor de plant. Maatregelen die zorgen voor meer licht onderin het gewas kunnen worden gezocht in het teeltsysteem (met name plantverband), in het kasdek (meer diffuus licht) of in assimilatiebelichting (reflectoren, LEDs).

Een verdere behoefte vanuit de teelt is een gelijkmatige horizontale verdeling van het licht over het gewas zodat het gewas uniform groeit.

Verbeterde lichtverdeling in de kas

Planten met lage LAI (jonge planten):

→ *te weinig bladoppervlakte om al het licht te onderscheppen, lichtbenutting niet optimaal*

→ *Lichtreflectie richting het gewas zo hoog mogelijk*

Planten met hoge LAI:

→ *licht door de bovenste bladeren onderschept, onderste bladeren fotosynthese laag*

→ *Lichtverdeling in gewas van boven naar beneden brengen*

→ ***Verbetering: Lichtintensiteit (onder) in het gewas zo hoog mogelijk***

Perspectieven voor verbetering van de lichtverdeling (onder) in het gewas

In een jong gewas met een lage LAI is de bladoppervlakte en de lichtonderschepping laag. Invallend licht wordt maar gedeeltelijk door de bladeren geabsorbeerd, de rest komt op de bodemafdekfolie terecht. Als de bodemafdekfolie (4.1.5) het binnenvallende licht zoveel mogelijk reflecteert, komt het licht terug in het gewas en zal de lichtonderschepping door de bladeren verhoogd worden. De lichtreflectie van bodemfolies is sterk verschillend. Witte bodemfolies reflecteren ca. 65% van het PAR-licht terug in het gewas. Gekleurde folies zullen altijd minder PAR-licht reflecteren. Hierover zijn maar weinig gegevens beschikbaar. Gealuminiseerde folies zullen theoretisch meer PAR-licht moeten reflecteren. Door een bodemfolie te gebruiken met een PAR-reflectie van 100% zal de productie van tomaat met 4.5% op jaarbasis toenemen, het gasverbruik is nagenoeg constant (+0.4%). Voor veel andere (hoogopgaande) gewassen zal ook gelden dat de productie hierdoor toeneemt. Onbekend is echter met welk percentage. De absorptie of reflectie van NIR-straling van de bodemafdekfolie is bepalend voor de temperatuur in de kas. Bij een jong gewas is tijdens de zomer het gebruik van een bodemfolie dat de NIR-straling sterk reflecteert positief om de opwarming van de kas te reduceren. Gangbare witte bodemafdekfolies reflecteren ca. 55% van de NIR-straling. Tijdens de winter zorgt het gebruik van een bodemfolie dat de NIR-straling sterk absorbeert (minder reflecteert) voor een grotere opwarming van de bodem, en daarmee een een reductie van het gasverbruik. Als de NIR-absorptie van een bodemafdekfolie tot 100% verhoogd wordt (de NIR-reflectie dus tot 0% gereduceerd wordt), vermindert het gasverbruik met ca. 1.8%, de gewasproductie blijft nagenoeg gelijk (+0.5%). In de praktijk zal dus het gebruik van verschillende folies in de winter en de zomersituatie een oplossing kunnen bieden.

Gevolgen verbeterde lichtverdeling voor de plant

Maatregel: Verhoging PAR-reflectie bodemfolie (tot 100%)^{}*

Gevolgen energieverbruik: +0.4% gasverbruik jaarrond

Gevolgen gewasproductie: +4.5% productie jaarrond

Maatregel: Verhoging NIR-absorptie bodemfolie (tot 100%)^{}*

Gevolgen energieverbruik: -1.5% gasverbruik jaarrond

Gevolgen gewasproductie: +0.5% productie jaarrond

^{*} Berekeningen uitgevoerd voor het voorbeeldgewas tomaat met KASPRO, zie Mohammadkhani en Sonneveld (2003)

Vrijwel alle gewassen met een hoge LAI (>3) raken in de zomer nooit met licht verzadigd. Maatregelen die ervoor zorgen meer licht onderin het gewas te krijgen bieden dus zicht op een verbetering van de lichtbenutting. Kasomhullingsmaterialen met diffuse eigenschappen hebben voordelen ten opzichte van materialen, welke het invallende licht niet diffuus verspreiden (4.2.1.2), zodat de binnenkomende straling dieper in het gewas kan komen en slagschaduw vermeden wordt.

Traditioneel tuinbouwglas werd vroeger in een gestructureerde uitvoering toegepast (het zogenaamde ‘gehamerde glas’). Dit is echter niet meer het geval, omdat dit glas andere nadelen

met zich mee bracht, zoals een slechtere bestendigheid tegen hagel. Tegenwoordig zijn nieuwe methodes beschikbaar om glas meer diffuse eigenschappen te geven. Het al omschreven glas met antireflectie-coating is beschikbaar in een heldere en diffuse uitvoering met een goede lichtdoorlatendheid. Verder zijn er folies (4.1.3) met sterk diffuse eigenschappen op de markt met een gelijktijdig goede lichtdoorlatendheid. Ook kunststofplaten (4.1.2) zijn vaak in een diffuse uitvoering verkrijgbaar, echter is bij deze platen de totale lichtdoorlatendheid aanzienlijk lager dan bij heldere platen. Dit is afhankelijk van het lichtverspreidende pigment dat toegevoegd wordt in de platen. 10% meer diffuus licht in PC kan tot een lichtverlies van ca. 2% leiden. Echte melkkleurige platen met een hoge lichtverspreiding hebben een 30% geringere lichtdoorlatendheid.

Het is niet bekend hoeveel van het diffuus binnenvallende licht dieper in het gewas kan dringen. Ook is niet bekend wat de effecten van meer licht dieper in het gewas zijn op de totale opbrengst van het gewas. Een kwantitatieve onderbouwing ontbreekt. Onderzoek naar diffuse kasdekmaterialen moet hierop antwoord geven.

Een andere methode om meer licht in het gewas te brengen is het gebruik van kunstlicht eventueel samen met speciale reflectoren die licht gericht in het gewas leiden.

Gevolgen verbeterde lichtverdeling voor de plant

Maatregel: Verhoging diffuse straling in kas (met 100%)

Gevolgen energieverbruik: ~0% gasverbruik als andere materiaaleigenschappen gelijk

Gevolgen gewasproductie: ?% verhoging productie

Kennisleemtes (witte vlekken)

- Onderin het gewas kost het onderhoud energie, mogelijk meer energie dan de bladeren in de onderste lagen zelf produceren. Het is niet bekend hoe rendabel het zou zijn om licht onderin het gewas te brengen: Hoeveel licht is nodig om in het onderhoud te voorzien, en hoeveel is nodig om het te overtreffen waardoor er netto winst (assimilaten) geproduceerd en benut kunnen worden voor groei en productie? Welke kosten in aanpassingen zijn ervoor nodig?
- Wat is het effect van de lichtsom (daglengte en intensiteit) op het evenwicht tussen generatieve en vegetatieve groei? Hoe is het te sturen t.b.v. generatieve groei (vruchten)?
- De rol van licht bij het mechanisme achter de massale (vluchtgewijze) zetting en vruchtuigroei bij paprika onder bepaalde weersomstandigheden is nog onbekend.
- Hoe groot is het effect van een diepere lichtdoordringing in het gewas op de productiviteit (balans vegetatieve/generatieve groei)? Is diffuus licht effectiever hiervoor dan gericht zonlicht? Hoe groot is het invloed van de oriëntatie van de kas, en van de rijen in de kas t.o.v. de zon (lichtdoordringing tot diep in het gewas) op de ontwikkeling en productie, vooral van vruchtgroenten en snijbloemen?
- Is het mogelijk om zwaardere stelen bij snijbloemen te bereiken door het gewas alleen te belichten in de LD-periode (fase afhankelijk belichten)?

Toekomstbeeld

- Een kas met een uniforme horizontale en optimale verticale lichtverdeling. Het in de kas binnenkomende PAR-licht wordt diffuus verspreidt en middels reflectievlakken op de bodem (bodemfolie), tussen het gewas (reflectoren), aan de binnenkant van de kasomhulling en kasconstructie naar het gewas gebracht waar het nodig is.
- Hierbij is ook de denken aan de kasomhulling als eenzijdig doorlatende spiegel, die van de buitenkant alle gewenste straling naar binnen doorlaat en aan de binnenkant door een alle gewenste straling terug reflecteert in het gewas.
- Bovendien zou licht dat ‘elders geoogst’ is door middel van fibers e.d. in de juiste intensiteit en de juiste golflengtes naar het gewas gebracht kunnen worden waar het op dat moment het hardste nodig is.

5.1.3 Lichtkleur

Behoeft vanuit de plant

Planten gebruiken licht niet alleen om te groeien, maar halen ook informatie uit licht b.v. over de tijd van het jaar, de tijd van de dag, de standplaats en de omringende vegetatie. Deze informatie wordt gebruikt om sneller te gaan groeien (strekken) of juist compacter te groeien, het tijdstip van bloei te bepalen, of de plantvorm aan te passen aan het licht (grote, dunne of kleine dikke bladeren)

Natuurlijk licht heeft een tamelijk constante spectrale verdeling waaraan planten zich evolutionair hebben aangepast. Alleen wanneer de zon laag aan de horizon staat, wordt de verhouding rood/verrood licht lager. Ook onderin een gewas neemt de verhouding rood/verrood licht af. Dit kan de vorm van sommige gewassen beïnvloeden. De meest optimale kwantumefficiëntie ligt voor sommige soorten in het rode of in het blauwe deel van het spectrum. Dit is afhankelijk van de lichtintensiteit en lichtkwaliteit, omdat het blad zich aanpast aan het aangeboden licht tijdens de ontwikkeling van het blad. De fotosynthese efficiëntie tijdens de eerste dagen van de productiefase is dan ook afhankelijk van de lichtomstandigheden tijdens de opkweek. Na deze dagen heeft het gewas zich aangepast aan de dan heersende lichtomstandigheden.

Door de lichtkleur wordt niet alleen de fotosynthese beïnvloed maar vooral de fotomorfogese. Wanneer er in verhouding weinig rood licht is ten opzichte van verrood licht, gaan planten strekken en vormen grotere dunnere bladeren. Als het aandeel verrode straling wordt gereduceerd groeien planten juist compacter, ze strekken minder, vertakken meer en vormen kleinere dikkere bladeren. Als verrood licht ontbreekt, komen sommige planten niet tot bloei. Dit lijkt vooral het geval bij schaduwplanten, zoals Saintpaulia, welke aan in de natuurlijke omgeving zijn aangepast aan lage lichtintensiteiten met veel verrood licht.

Ook de hoeveelheid blauw licht heeft effect op de vorm van de plant. Bij te weinig blauw strekken planten, en krijgen ze grotere, dunnere bladeren. Veel plantensoorten hebben een minimale hoeveelheid blauwlicht nodig voor een normale plantontwikkeling. Deze behoefte

verschilt per soort en varieert van 5-30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor sla en pepers tot 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor sojaboon. In Nederland zit er van nature voldoende blauw in het natuurlijke licht voor planten (ook in de kas), maar door de hoeveelheid blauwlicht te beïnvloeden kan de plantvorm gestuurd worden. Gedeeltelijke omvorming van blauw naar rood licht zou gunstig kunnen zijn voor de fotosynthese efficiëntie, maar onvoldoende bekend is wat de morfogenetische effecten daarvan zijn. Als het aandeel blauwe straling wordt verhoogd leidt dit tot een grotere vertakking van de plant en kleinere dikkere bladeren. Dit is een gewenst effect voor veel potplanten, maar een ongewenst effect voor vruchtgroenten.

Bovendien is de synthese van kleurstoffen in de plant afhankelijk van het lichtspectrum. Dit werkt bij de diverse gewassen verschillend. Afhankelijk van de plantsoort wordt de synthese van anthocyanen door UV, blauw, rood of verrood gestimuleerd. Dit is belangrijk voor alle planten waar de kwaliteit mede door de bloemenkleur wordt beïnvloed. Vooral lichtminnende planten, zoals chrysant of perkplanten, welke in hun natuurlijke omgeving zijn aangepast aan hoge lichtintensiteiten vormen door lage lichtintensiteiten of weinig UV straling fletse bloemkleuren. Hier ontbreekt echter veel duidelijke informatie per plantsoort. Ook zijn er grote verschillen tussen cultivars.

Aanpassingen in de spectrale verdeling van natuurlijk licht ten behoeve van sturing van de fotomorfogenese van tuinbouwgewassen wordt nagenoeg niet toegepast. In de huidige praktijk wordt meestal kunstlicht gebruikt om fotomorfogenetische veranderingen in gewassen te realiseren. Het selectief wegschermen van rood licht, waardoor de rood/verrood verhouding afneemt, kan mogelijk worden toegepast om de vorming van zijscheuten en pluizen te verminderen. Dit effect kan mogelijk ook worden bereikt door het verlengen van de dag met verrood stuurlicht, bijvoorbeeld door een korte belichting met verrood aan einde van de natuurlijke dag of belichtingsperiode. Het verhogen van blauwlicht kan worden toegepast om de vorming van zijscheuten te stimuleren. De rol van UV straling is onvoldoende bekend en zou per gewas nader moeten worden onderzocht. Op grond van de nu voorliggende studie lijken er zeker perspectieven te zijn voor sturing van de fotomorfogenese door middel van aanpassingen van de natuurlijke lichtkleur. Algemeen geldende regels zijn echter niet te geven vanwege het feit dat verschillende gewassen en cultivars specifieke reacties vertonen op verschillende spectrale verdelingen. In de regel zijn vaak slechts lage lichtintensiteiten of kleine verschuivingen in lichtkleur nodig om fotomorfogenetische processen in gang te zetten. Een kwantitatieve onderbouwing ontbreekt echter. Bij het beïnvloeden van de lichtkwaliteit moet rekening gehouden worden met negatieve effecten op productie door vermindering van de totale lichthoeveelheid. De relatie van lichtkwaliteit en lichtkwantiteit is onvoldoende bekend.

Verandering van de lichtkleur in de kas

- *Meer Blauw*: plant korter, meer vertakking, kleinere en dikkere bladeren
Minder Blauw: plant langer, grotere maar dunnere bladeren
- *Meer Verrood*: plant langer, meer strekking, grotere dunnere bladeren
Minder Verrood: plant korter, meer vertakking, kleinere en dikkere bladeren, bloeien vertraagd
- *Meer UV-B*: fotosynthese gereduceerd, plant korter, meer vertakking, kleinere en dikkere bladeren, anthocyaansynthese verhoogd
- Meer rood is niet hetzelfde als minder verrood. De verhouding rood:verrood is vooral van belang en effecten zijn soortspecifiek

Perspectieven voor aanpassingen lichtkleur door kasomhulling en schermen

Tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal of in een jong gewas moeten de planten in korte tijd grote bladmassa ontwikkelen. Dit kan worden bereikt door weinig blauw licht (voor een groter blad) t.o.v. dat in natuurlijk licht. Tijdens de opkweek van het plantenuitgangsmateriaal is het verder wenselijk dat de stengelstrekking zo klein mogelijk is. Dit kan worden bereikt door licht met relatief weinig verrood (voor een geringe strekking). Bij de productie van sommige potplanten is een grote vertakking en geringe stengelstrekking gewenst. Dit kan worden bereikt door het aandeel blauwe en rode straling te verhogen en het aandeel verrode straling te verminderen. Bij bloeiende planten moet er dan wél rekening worden gehouden met een eventuele vertraagde bloei.

Een verrood absorberende folie, zoals beschreven onder 4.3.2.1 (fig. 36, fig. 37 en fig.38) filtert tot 70% van het verrood en afhankelijk van de concentratie pigment in de folie tot 20% van het blauw licht eruit. Echter wordt gelijktijdig het aandeel totaal PAR gereduceerd zonder dat het effect ervan op de productie en bedrijfseconomie bekend is. Deze folies worden in Engeland in glazen kassen als scherm gebruikt. De folies worden gebruikt voor het telen van sierplanten om versterkte stengelstrekking te voorkomen. Vooral *Eustoma* en *Chrysanthemum* reageren met een 30% reductie van de stengelstrekking. Afhankelijk van het gewas wat eronder geteeld wordt, moet met een vertraging van de bloei worden gerekend. Vooral *Petunia* reageert met een sterke bloeivertraging tot 18 dagen. Vertraging van de bloei is echter geen probleem voor het kweken van uitgangsmateriaal. Kleurspecifieke absorptie of reflectie leidt niet alleen tot verschuivingen maar ook tot vermindering van de totale lichtinput. Een vermindering van de totale lichtinput resulteert in de winter mogelijk in verminderde productie. Het is niet bekend of het voordeel van spectrale verschuiving opweegt tegen het nadeel van minder licht. Dit moet ook gezien worden in het licht van seizoensverschillen.

Andere materialen zoals de fluorescerende schermfolie beschreven onder 4.3.2.3 (fig. 43) zet een gedeelte van de blauwe straling om naar rood licht. Dit materiaal reduceert het aandeel blauwe straling met 24% en verhoogt het aandeel rode straling met ca. 7,5% ten opzichte van blank glas. De totale PAR-transmissie is afhankelijk van de pigmentconcentratie ca. 8.5% verlaagd ten opzichte van blank glas. Het is niet bekend of het voordeel van spectrale verschuiving opweegt tegen het nadeel van minder licht. Dit moet blijken uit experimenten op (semi-)praktijkschaal.

Materialen die het spectrum veranderen kunnen op verschillende manieren worden ingezet, als kasdek materiaal of als (beweegbaar) scherm materiaal. Een scherm materiaal wordt in de nacht als energiescherm gebruikt en ook overdag dicht getrokken als energiebesparing en / of een wijziging van de lichtkleur gewenst is. Hierdoor wordt in feite een dubbel kasdek gecreëerd, waardoor het gasverbruik afhankelijk van de schermstrategie wordt verlaagd. Hier moet echter rekening worden gehouden met extra lichtverlies door de tweede laag als het scherm ook overdag dicht is. Bij planten die tijdelijk behoefte hebben aan lichtreductie kan het scherm materiaal in de zomer als zonwering worden toegepast.

Gevolgen verbeterde lichtkleur voor de plant

Maatregel: Verandering lichtkleur in kas

- Gevolgen energieverbruik: ~0% gasverbruik bij toepassing als kasdek materiaal
-15% gasverbruik bij toepassing als scherm die ook overdag zo veel mogelijk wordt gesloten ten opzichte van een kas met een energiescherm die alleen in de nacht wordt gesloten
- Gevolgen gewasproductie: ?% verhoging productie
?% verhoging op de productiewaarde

Kennisleemtes (witte vlekken)

- Wat is het totale effect van een veranderde lichtkleur en gelijktijdig minder licht per gewas? Wegen de voordelen van een veranderde lichtkleur op tegen het nadeel van minder licht?
- Het lijkt mogelijk de taklengte van snijbloemen zoals gerbera te bevorderen door nabelichten met verrood licht in de zomer. In hoeverre kan de taklengte gestimuleerd worden, en hoeveel (minimaal) verrood licht is daarbij nodig? Kan de taklengte ook gestimuleerd worden door wegschermen van blauw licht?
- Bij welke gewassen kan de kritische daglengte worden beïnvloed door de lichtkleur, of door de lichtkleur EOD, teneinde de bloei te beïnvloeden?
- Bij Gerbera zou de hoeveelheid geoogst product per mol licht verbeteren door aanpassing van de vegetatief/generatief biomassa verdeling. Kennis over de beïnvloeding hiervan via lichtkleur, daglengte en/of lichtsom ontbreekt.

Toekomstbeeld

- Een beweegbaar scherm of schakelbaar kasdek waarmee de lichtkleur in de kas veranderd wordt naar behoefte voor de morfologie van de plant in een bepaald ontwikkelingsstadium, maar tevens aangepast aan de PAR-behoefte van de plant.

5.2 Gewasgroepen

5.2.1 Uitgangsmateriaal

Het doel tijdens het opkweken van het uitgangsmateriaal is om in korte tijd korte, vitale planten te produceren. Tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal moeten de plantjes in korte tijd grote bladmassa ontwikkelen en moet gelijktijdig de stengelstrekking zo klein mogelijk zijn. Dit kan worden bereikt door veel licht met relatief weinig verrood (voor een geringe strekking) en blauw licht (voor een groter blad) t.o.v. dat in natuurlijk licht. Een snelle toename in bladoppervlak (betere lichtonderschepping) door hoge temperatuur en RV, is direct na het planten belangrijker dan een hoog lichtniveau. De lichtbehoefte tijdens het kweken van uitgangsmateriaal kan als volgt worden samengevat:

- *veel PAR licht*
- *weinig verrood en weinig blauw*

5.2.2 Vruchtgroenten

Vruchtgroenten raken in Nederland ook in de zomer nooit met licht verzadigd. Meer licht, ook onderin het gewas, zal de fotosynthese verhogen. Meer verrood licht aan het einde van de dag remt de zijscheut ontwikkeling. Dit kan worden bereikt door belichting met verrood licht. Dit kan niet met natuurlijk licht worden bereikt, omdat de intensiteit van de natuurlijke straling aan het eind van de dag te laag is. Effecten van belichting worden hier niet verder omschreven. Vruchtgroenten hebben de volgende lichtbehoeftes;

- *veel PAR licht*
- *diepe lichtdoordringing in het gewas*
- *vermindering NIR-straling in de zomer*
- *meer verrood aan het eind van de dag*

5.2.3 Bladgroenten

Bij bladgroenten is een hoge luchtvochtigheid in de eerste helft van de teelt een belangrijkere invloedsfactor dan een hoge lichtsom voor een snelle groei. In de tweede helft van de teelt is een hoge lichtsom belangrijk voor een snelle groei en een hoge opbrengst. Het uitfilteren van UV-B straling is voordelig voor de meeste bladgroenten. Zonder UV worden namelijk grotere bladeren gevormd. Voor sommige gewassen (zoals 'Lollo Rosso') is UV-B straling echter noodzakelijk, omdat zonder UV-B niet de typische gewassenmerken (rode kleur) kunnen worden gevormd. UV-A straling mag door het kasdek niet worden geabsorbeerd omdat deze mogelijk een positief effect heeft op de gezondheid van de mens. Bladgroenten hebben dus de volgende lichtbehoeftes:

- *veel PAR licht vooral tijdens de laatste productiefase*
- *weinig verrood en weinig blauw*
- *geen UV-B nodig (uitgezonderd roodkleurende cultivars), wel UV-A nodig*

Om de optimale combinatie te realiseren kan er aan gedacht worden om het gewas in de eerste periode onder een dubbel kasomhullingsmateriaal, zoals kunststofplaten (4.1.2) of dubbele kunststoffolies (4.1.3), te laten groeien en het gewas in de tweede periode naar een ander kascompartiment met een enkellaags kasomhullingsmateriaal te verplaatsen. Een vereiste is dan een mobiele teelt. Dit is extra belangrijk voor gewassen met een geringe energiebehoefte zoals bladgroenten. Het lage totaal verbruik, dat ook nog eens in een beperkte periode optreedt, zijn de gaskosten namelijk relatief hoog.

Een andere mogelijkheid is het overdag sluiten van een transparant scherm in de eerste periode van de productie, zoals reeds toegepast bij paprika en tomaat.

Voor welke gewassen UV-B of UV-A wel of niet voordelig is weinig bekend. Sommige kunststoffolies (4.1.3) en PC platen (4.1.2) laten in het geheel geen UV door en kunnen zo een optie zijn. Tuinbouwglas laat alleen maar UV-A straling door. Andere materialen zoals PMMA platen (4.1.2) en ETFE folie (4.1.3) laten alle UV-B straling door. De UV-doorlatendheid van folies kan gericht aangepast worden door het toevoegen van UV-absorberende pigmenten.

5.2.4 Éénmalig oogstbare snijbloemen

Éénmalig oogstbare snijbloemen, zoals chrysanthen, stellen geen bijzondere eisen aan het licht. Vooral tijdens de winterperiode is veel PAR licht en eventueel diffuus licht belangrijk voor bepaalde soorten voor de juiste kleur van de bloemen. Bij gebrek aan licht gaat de kleurintensiteit achteruit en dit gaat ten koste van de bloemkwaliteit en worden minder knoppen aangelegd. Kasomhullingsmaterialen met een hoge lichtdoorlatendheid zijn dus belangrijk. Een uniforme lichtverdeling over het gewas is een voorwaarde om een heel vak ineens te kunnen oogsten (4.2.1.3). Ook een goede lichtdoordringing in het gewas is belangrijk om een lage rood/verrood verhouding te voorkomen. Kasdekmaterialen welke het licht diffuus maken bieden hier mogelijk een uitkomst. Éénmalig oogstbare snijbloemen hebben dus de volgende lichtbehoefte:

- *veel PAR licht vooral tijdens de winter*
- *eventueel diffuus licht*

5.2.5 Meermalig oogstbare snijbloemen

Meermalig oogstbare snijbloemen, zoals roos en gerbera, hebben een hoge lichtbehoefte. Er zijn indicaties dat deze lichtbehoefte bij roos faseafhankelijk is. Of echter een variatie in de lichtintensiteit tijdens verschillende productiefases leidt tot een hogere opbrengst is niet verder bekend. Verder zijn er indicaties dat korte-dag condities bij de facultatieve korte-dag-plant Gerbera leidt tot meer bloemen met een lager takgewicht. Echter is niet bekend wat de optimale verhouding tussen lichtintensiteit (lichtsom per dag), lichtkleur en daglengte is.

Kasomhullingsmaterialen zoals glas, PC platen en de meeste PE en EVA folies laten geen UV-B straling door. Donkerrode rozen kunnen dus niet onder PMMA, ETFE of witglas worden geteeld omdat deze materialen juist wel UV-B straling doorlaten en dit kan tot schade aan de bloemen leiden. De volgende lichtbehoefes zijn vast te stellen:

- *veel PAR licht in de winter*
- *minder NIR-straling in de zomer*
- *geen UV-B straling voor donkerrode rozen, wel UV-A straling voor betere kleuring*

5.2.6 Potplanten

De groep potplanten is een zeer diverse groep. Er zijn potplanten oorspronkelijk afkomstig uit de ondergroei van bossen en dus aangepast aan lage lichtintensiteiten en er zijn potplanten die oorspronkelijk onder hoge lichtintensiteiten groeiden. Benutbare lichtintensiteiten zijn dus erg verschillend. Schaduwplanten raken eerder lichtverzadigd dan lichtminnende planten. Boven een bepaalde lichtintensiteit zal moeten worden geschermd. Voor alle potplanten is in de winter de lage lichtintensiteit vaak de beperkende groeifactor. Daarom wordt in deze perioden afhankelijk van het gewas wel kunstmatig belicht.

Er kan verder onderscheid worden gemaakt naar bloeiende en niet-bloeiende potplanten en naar dagneutrale, korte-dag en lange-dag planten.

Bij potplanten wordt de eindgrootte van de planten via de gekozen potmaat en de aangehouden plantafstanden geregeld. Bij bloeiende potplanten is de plantgrootte en het plantgewicht wel belangrijk, maar vormt de vorm en bloeirijkdom het belangrijkste kwaliteitscriterium. Deze worden bepaald door het aantal bloeiende scheuten en het aantal bloemen per scheut. Bij groene en bonte potplanten zijn naast de plantgrootte en het plantgewicht vooral de vorm en gevuldheid als ook de bladstand en de bladkleur belangrijk. Deze worden sterk bepaald door de plantafstand tijdens de teelt en de lichtinval tussen de planten.

Potplanten worden soms met chemische remmiddelen compact gehouden. Korte compacte planten kunnen ook worden geteeld door aan het einde van de dag met rood licht te belichten. Lage intensiteiten zijn daarbij voldoende. Omdat het daarbij gaat om kunstlicht, worden deze effecten hier niet verder omschreven. Er zijn ook andere alternatieven om stengelstrekking te remmen zoals negatieve DIF (hogere nacht- dan dagtemperatuur) en kouval.

Lichte kassen zijn voor een hoge lichtdoorlatendheid in de winter belangrijk. Het is noodzakelijk om lichtafhankelijk te schermden. Dit is bij gewassen met een hoge lichtbehoefte pas bij hogere lichtintensiteiten nodig vergeleken met gewassen met een lagere lichtbehoefte. Diffuus licht zorgt voor een betere tolerantie van het gewas voor hogere lichtintensiteiten bij een betere

fotosynthese efficiëntie. Het licht dringt dieper in het gewas door en zorgt zo voor een betere vertakking bij hoogopgaande potplanten.

Reflectie van de ondergrond is vooral bij hoge gewassen met een grote lichtbehoefte, zoals Ficus voordelig. Bij andere gewassen is dit nadelig omdat dit een ongewenste reactie van bladgrootte ontwikkeling en bladstand kan veroorzaken.

In het algemeen is een compacte potplant wenselijk. Dit kan worden bereikt door het uitfilteren van verrood of het belichten met rood aan het einde van de dag. Bij bloeiende potplanten kan door het uitfilteren van verrood echter een bloeivertraging optreden.

- veel PAR licht in de winter
- lichtafhankelijk schermen naar plantbehoefte
- diffuus licht
- Uitefilteren van verrood (uitgezonderd bij bloeiende potplanten)

Samenvatting gewenste veranderingen qua lichtintensiteit, lichtverdeling en lichtkleur

De gewenste verandering qua lichtintensiteit, lichtverdeling en lichtkleur voor verschillende gewasgroepen zijn gegeven in kwalitatieve zin. (↑) betekent meer dan van nature aanwezig (↓) betekent minder dan van nature aanwezig, (o) betekend ongeveer gelijk aan van nature aanwezige straling, (-) betekent niet wenselijk.

	PAR winter	PAR zomer	UV-B	UV-A	Blaauw	Rood	Verrood	NIR zomer	diffuus licht
Uitgangsmateriaal (jonge planten)	↑	o			↓	↑	↓	↓	↑
Vruchtgroenten (tomaat)	↑	↑		↓	↓	↑	↑ EOD	↓	↑
Bladgroenten (groene cultivars sla)	↑	↑		↑	↓	↑ EOD	↓	↓	↑
Bladgroenten (rode cultivars sla)	↑	↑	↑	↑	↓	↑ EOD	↓	↓	↑
Snijbloemen éénmalig oogstbaar (chrysant)	↑	o						↓	↑
Snijbloemen meermalig oogstbaar (roos)	↑	o	-	↑				↓	↑
Potplanten schaduwplant (groen: Hedera, Varen) (bloe: Phalaenopsis, Saintpaulia)	o	↓	-					↓	↑
Potplanten lichtminnend (groen: Ficus, Palm)	↑	↓			↑		↓	↓	↑
(bloe: Chrysant, Kalanchoë)	↑	↓		↑	↑			↓	↑

6 Samenvatting

Wat is licht?

- Globale straling bestaat uit een direct en diffuus stralingsaandeel.
- De globale straling verandert qua intensiteit en spectrum door een aantal parameters, de zonnestand, de geografische breedte, het seizoen, het tijdstip van de dag en de mate van bewolking.
- De stralingsintensiteit van de globale straling varieert in Nederland van gemiddeld 70 W m^{-2} ($320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de winter tot 270 W m^{-2} ($1250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de zomer; de lichtsom is gemiddeld 4500 Wh/m^2 ($20730 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de zomer en 600 Wh/m^2 ($2770 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de winter.
- Het stralingsspectrum van de globale straling bestaat uit UV-B (300-315 nm), UV-A (315-400 nm), PAR (400-700 nm), NIR (700-3000 nm); straling boven de 3000 nm is warmtestraling (FIR).
- De daglengte varieert in Nederland van rond 8 uur in de winter tot 16.5 uur in de zomer; binnen de tuinbouwgebieden in Nederland zijn nauwelijks verschillen in daglengte

Licht in relatie tot fotosynthese

- Er zijn verschillen in lichtefficiëntie tussen gewassen maar deze zijn beperkt, zeker wanneer alleen gekeken wordt naar de lichtefficiëntie in de winter.
- Bij een lagere lichtintensiteit neemt de efficiëntie van de lichtbenutting van het gewas toe.
- Algemeen geldt dat een hoge lichtdoorlatendheid van de kas de gewasontwikkeling en -productie bevordert. In de zomer kan het selectief wegvangen van lichtpieken nuttig zijn voor sommige gewassen.
- De meest optimale kwantumefficiëntie ligt voor sommige soorten in het rode of in het blauwe deel van het spectrum. Dit is afhankelijk van de lichtintensiteit en lichtkwaliteit, omdat het blad zich aanpast aan het aangeboden licht tijdens de ontwikkeling van het blad. De fotosynthese efficiëntie tijdens de eerste dagen van de productiefase is dan ook afhankelijk van de lichtomstandigheden tijdens de opkweek, waarna het gewas zich heeft aangepast aan de dan heersende lichtomstandigheden.
- Gedeeltelijke omvorming van blauw naar rood licht zou gunstig kunnen zijn voor de fotosynthese efficiëntie, maar onvoldoende bekend is wat de morfogenetische effecten daarvan zijn.
- In de praktijk gaat men ervan uit dat ochtendzon belangrijker is dan avondzon. De achterliggende gedachte daarbij is dat de licht benuttingsefficiëntie 's ochtends groter zou zijn dan 's middags. Een mogelijkheid zou ook kunnen zijn dat niet de lichtbehoefte van de plant verandert in het verloop van de dag, maar de invloed van externe factoren op de fotosynthese capaciteit, vooral 's middags. De literatuur geeft hierover geen uitsluitel, het verloop van de fotosynthese gedurende de dag is niet eenduidig beschreven. Dit zou een onderwerp voor nadere studie kunnen zijn.
- In de praktijk wordt de daglengte bij een aantal daglengtegevoelige gewassen volledig gestuurd via (daglengte)belichting en verduistering.

Licht in relatie tot fotomorfogenese

- Veel plantensoorten hebben een minimale hoeveelheid blauwlicht nodig voor een normale plantontwikkeling. Deze behoefte verschilt per soort en varieert van 5-30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In Nederland wordt aan deze behoefte voldaan door natuurlijk licht, ook in de winter periode. Het selectief verminderen van een overmaat aan blauwlicht kan de bladontwikkeling van jonge planten positief beïnvloeden.
- De gewasstructuur (te beïnvloeden door plantafstand en teeltsysteem) is van belang i.v.m. de spectrale verschuivingen die optreden in een gewas. Onderin een gewas kan voor actieve groeipunten een tekort aan blauwlicht ontstaan.
- Het selectief wegschermen van rood licht, waardoor de rood/verrood verhouding afneemt, kan mogelijk worden toegepast om de vorming van zijscheuten en pluizen te verminderen. Dit effect kan mogelijk ook worden bereikt door het verlengen van de dag met verrood stuurlicht, bijvoorbeeld door een korte belichting met verrood aan einde van de natuurlijke dag of belichtingsperiode. Het verhogen van blauwlicht kan worden toegepast om de vorming van zijscheuten te stimuleren. De rol van UV straling zou per gewas nader moeten worden onderzocht.
- Bij het beïnvloeden van de lichtkwaliteit moet rekening gehouden worden met negatieve effecten op productie door vermindering van de totale lichthoeveelheid. De relatie van lichtkwaliteit en lichtkwantiteit is onvoldoende bekend.

Optimalisatie uitgangsmateriaal

- Bij lage LAI (jong gewas) de ondergrond afdekken met materiaal dat zoveel mogelijk licht reflecteert zodat het gewas meer licht vangt.
- Bij lage LAI (jong gewas) tijdens de zomer een bodemfolie gebruiken dat de NIR-straling sterk reflecteert zodat de kas minder warm wordt. Tijdens de winter een bodemfolie gebruiken dat de NIR-straling sterk absorbeert, zodat de kas opwarmt en het gasverbruik gereduceerd wordt.
- Als in de zomer zonwering wordt toegepast, dan materialen gebruiken die relatief veel blauw wegfilteren (rode doeken), dit stimuleert de bladgrootte.
- De rood/verrood verhouding verhogen om lengtegroei te remmen. Denk hierbij aan een kasdekmaterialen/schermdoeken die verrood licht uitfilteren of aan rood nabelichten aan het einde van de lichtperiode. Diffuus licht zorgt voor een betere lichtverdeling in het gewas en kan daardoor de rood/verrood verhouding in het gewas verhogen. Er zijn ook alternatieven om stengelstrekking te remmen zoals DIF, kouval en chemische middelen.

Optimalisatie vruchtgroenten

- Versnelde opbouw van een hoog LAI direct na het planten door gebruik van schermfolie dat met name blauwlicht wegfiltert (lagere verhouding blauw/rood licht)
- Verbeteren van de CO₂ voorziening in de zomerdag, o.a. door nog verdergaande temperatuurintegratie, dakkoeling en gesloten kas
- Terugdringen van de hoeveelheid drogestof die wordt vastgelegd in blad en stengel. Werken dus aan: a. een vroege en goede zetting en aan een zo hoog mogelijk vruchtgewicht o.a. via plantdichtheid en teelttemperatuur
- Remming van de zijscheut ontwikkeling (dieven) door EOD verroodlicht

<p>Optimalisatie bladgroenten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Het bladoppervlak (kropgrootte/biomasse) kan worden vergroot door wegfilteren van blauwen en verrode straling of direct vanaf planten einde-van-de-dag roodlicht nabelichten. - Bij zonwering een scherm toepassen dat selectief blauw absorbeert om het bladoppervlak (kropgrootte/biomassa) te vergroten (verlaging van de blauw/rood verhouding) - In de laatste weken van de teelt geen blauwlicht meer wegschermen om vastere kroppen te krijgen - Kiezen voor lichtst mogelijke kassen, dit geeft in de winterperiode lagere nitraatniveaus - UV-A niet wegschermen, het geeft mogelijk positief effect op voedingswaarde van het product voor de consument
<p>Optimalisatie éénmalig oogstbare snijbloemen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zorg met name in de LD-fase, voor voldoende licht voor een goede stengelkwaliteit - Zorg voor een goede lichtdoordringing in het gewas om een lage rood:verrood verhouding te voorkomen (zijscheuten met te veel blad)
<p>Optimalisatie meermalig oogstbare snijbloemen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Streef naar de optimale verhouding lichtintensiteit/temperatuur - Streef naar een betere CO₂-voorziening door de het ventileren te verminderen, denk aan dakkoeling, gesloten kas, wegschermen van NIR-straling - Vermijden UV-B in verband met donkerverkleuring van rode rozen
<p>Optimalisatie potplanten</p> <ul style="list-style-type: none"> - lichte kassen en lichtafhankelijk schermen geeft bij schaduwplanten de mogelijkheid om in donkere uren meer licht bij de planten te krijgen dan bij vaste zonwering, zoals een krijtdek - fase-afhankelijk (LAI-afhankelijk) aanpassen van gewenst lichtniveau d.m.v. schermstrategie, een volgroeid gewas (LAI 2-4) kan een hogere lichtintensiteit benutten dan een jong gewas met een LAI<1. - tijdens het schermen alleen de zonbeschenen kant van de kap schermen, zodat alleen het directe zonlicht wordt weggeschermd, maar niet het diffuse licht - meer diffuus maken van het licht op gewasniveau biedt de mogelijkheid om pas bij een hoger lichtniveau te schermen - meer diffuus maken van het licht geeft een lagere rood/verrood verhouding onderin het gewas en daardoor een betere vertakking bij hoog opgaande potplanten - kwantiteit/kwaliteit verhouding verbeteren door licht-temperatuur verhouding in de gaten te houden bij tropische gewassen, grenzen zoeken - planten compacter houden door bij niet-bloeiende potplanten verrood licht weg te schermen en/of EOD roodlicht bij te belichten, hierbij opletten op bloeivertraging - planten compacter houden door meer blauwlicht, dit zorgt voor een betere vertakking van planten - bij sommige potplanten betere bloemenkleur door UV in de kas, rol van UV zou per gewas nader moeten worden onderzocht

Welke kasdekmaterialen zijn er?

- Glas is het meest gebruikte kasomhullingsmateriaal in Nederland (95-98% van de 10.500 ha kassen). Blank glas is het meest gebruikelijk, speciale soorten zijn wit glas, Hortiplus en gehard glas. De lichtdoorlatendheid is 89-92% bij loodrecht lichtinval en 80-84% bij diffuus lichtinval. Blank glas laat straling vanaf 320 nm door, wit glas laat ook een gedeelte van de UV-B straling door.
- Kunststofplaten worden op ca. 10-12% van de nieuwbouwkassen (40- 45 ha per jaar) toegepast. PC kanaalplaten zijn het meest gebruikelijk naast PMMA kanaalplaten. De lichtdoorlatendheid van PC ligt rond de 80% voor direct stralingsinval (61% diffuus), de lichtdoorlatendheid van PMMA ligt rond de 89% direct (76% diffuus). PC laat geen straling beneden de 400 nm door, PMMA is transparant voor UV-B straling. De eigenschappen van kunststofmaterialen kunnen door allerlei technieken worden aangepast. Een nieuwe ontwikkeling is de zig-zag plaat.
- Kunststoffolies kunnen zeer verschillende eigenschappen hebben. Er bestaan goedkope traditionele folies van PE, EVA of PVC, maar ook duurzame materialen met een levensduur vergelijkbaar met die van glas zoals ETFE. De lichttransmissie is in het eerste geval vergelijkbaar met glas in het tweede ligt deze rond de 93-94% direct (88% diffuus). De spectrale doorlatendheid van folies kan door verschillende technieken veranderd worden.
- Schermmaterialen bestaan voor verschillende doelstellingen: energiebesparing, zonwering, verduistering, tegen lichtuitstoot of combinaties ervan. Materialen zijn bandjesschermen, transparante folieschermen of weefsels. De mate van energiebesparing is afhankelijk van het type materiaal, de transmissie voor warmtestraling van het materiaal, de emissiewaarde van het materiaal, de vochtdoorlatendheid van het materiaal, de afdichting van het scherm, de teelt en de setpoints voor de klimaatregeling. Materiaaleigenschappen kunnen evenwel als bij folies worden aangepast.
- Bodemafdekfolies hebben het doel om PAR en NIR zo veel mogelijk te reflecteren, dit heeft invloed op de gewasproductie en het energieverbruik. Bij een hogere PAR reflectie stijgt de gewasproductie (10% meer reflectie geeft 2% meer productie bij tomaat). Bij een geringere NIR reflectie (hogere absorptie) daalt het energieverbruik (10% minder reflectie betekent 2% minder energie).
- Ook volkomen nieuwe materialen zijn in ontwikkeling zoals nanoschuim en COC. Deze combineren een goede lichttransmissie met een hoge isolatiewaarde, maar zijn naar verwachting pas over lange termijn beschikbaar.

Welke materiaaleigenschappen zijn relevant en waarom?

- Globale straling bestaat uit een direct en een diffuus stralingsaandeel. Omdat gedurende de winter ca. 75% van de globale straling diffuus is door bewolking, is naast de PAR transmissie voor direct invallend licht tevens de PAR transmissie voor diffuus invallend licht van belang. Afhankelijk van de invalshoeken treden reflectieverliezen op. Ook de dakhelling van de kas en de oriëntatie van kas is hierbij van belang.
- De lichtverstrooiing of haze van de kasomhullingsmaterialen is een maat voor de helderheid van het materiaal. Meer diffuus licht in de kas bevordert de lichtbenutting in een hoog gewas. Over de lichtverstrooiing van kasdek- en schermmaterialen is echter nog weinig bekend.
- De UV transmissie is afhankelijk van het type materiaal. Blank glas laat geen UV-B straling door, alleen grote gedeelten van de UV-A straling vanaf 320 nm. De meeste folies zijn niet

doorlatend voor UV-B, ze laten maar een klein gedeelte van de UV-A straling boven de 360 nm door. Er bestaan ook folies en platen, die alle UV-B en UV-A straling (beneden de 400 nm) eruit filteren, zoals ETFE-folie en PMMA-platen. Anderen laten helemaal geen UV-B en UV-A straling door, zoals PC.

- De NIR straling is niet nodig voor de plantenfotosynthese maar draagt indirect bij aan de opwarming van de kas. Dit is een ongewenst effect in de zomer, maar zorgt in de winter voor een energiebesparend effect. Een variabel scherm met NIR reflectie kan hier mogelijk een oplossing bieden. De totale energieeffecten moeten nader worden onderzocht.
- De FIR transmissie (doorlatendheid voor langgolvlige warmtestraling) is afhankelijk van het type materiaal en de materiaaldikte. Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor FIR, ETFE in geringe mate en bij PE en EVA is dit afhankelijk van de samenstelling van de folies. Met toenemende FIR transmissie van het kasomhullings- of schermmateriaal stijgt het energieverbruik van de kas.
- De emissiecoëfficiënt van het materiaaloppervlak is ook belangrijk voor het energieverbruik van de kas. De emissiecoëfficiënt van glas, PMMA, PC is hoog. Door een lage emissiecoating kan deze verlaagd worden, het energieverbruik neemt dan af. De emissiecoëfficiënt van folie is lager en bij een droog materiaal dus gunstiger voor het energieverbruik.

Welke mogelijkheden zijn er om materiaaleigenschappen aan te passen?

- Stralingsintensiteit en stralingsspectrum kunnen worden gevarieerd door de transmissie, absorptie of reflectie van materialen te veranderen.
- De totale lichttransmissie van kasomhullingsmaterialen kan worden verhoogd door speciale oppervlakte-coatings (interferentiecoatings of coatings met een lage brekingsindex). Deze techniek kan worden toegepast op glas en kunststofplaten. Een andere mogelijkheid is het veranderen van de oppervlaktestructuur (microstructuur of macrostructuur). De microstructuur van glas, platen en folies kan theoretisch worden veranderd. Een verandering van de macrostructuur lijkt momenteel alleen mogelijk bij platen (zig-zag).
- Het stralingsspectrum van glas kan worden gevarieerd door oppervlakte coatings. Deze techniek is echter beperkt en duur. Het spectrum van kunststofplaten kan worden gevarieerd door coatings en het toevoegen van additieven. De spectrale doorlatendheid van folies en schermmaterialen is goed varieerbaar door het toevoegen van additieven.
- Door fluorescentie kunnen bepaalde golflengtes worden verschoven naar andere golflengtes. Dit kan zelfs leiden tot een hogere PAR transmissie.
- Nieuwe technieken zoals fotochromisme, thermochromisme, electrochromisme en gaschromisme staan in de kinderschoenen en bieden misschien op lange termijn een optie.

Wat is het effect op de energiehuishouding?

- Het verhogen van de PAR straling met 10% leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 8% en een reductie van het gasverbruik van ca. 2.5%. In een gesloten kas wordt de koellast met ca. 25% verhoogd.
- Het uitfilteren van alle NIR straling leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 5% en een verhoging van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk maar wordt de koelbehoefte met 50% gereduceerd.
- Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor warmtestraling (FIR). Bij dit soort kasdekmaterialen leidt de reductie van de emissiecoëfficiënt in een standaard tomatenkas tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 10%. In een

gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk en wordt de koelbehoefte met ca. 20% verhoogd.

- Bij kunststoffolies worden additiven toegevoegd om de doorlatendheid voor warmtestraling (FIR) te reduceren. Hierdoor verandert ook de emissiecoëfficiënt. In totaal is het gasverbruik ook bij folies met een lage FIR-transmissie altijd licht hoger dan bij glas, PMMA of PC. In een standaard tomatenkas leidt een verlaging van de FIR-transmissie naar 20% tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie gelijk en veranderen gasverbruik en koelbehoefte nauwelijks.
- De overall-effecten van een aangepast kasdek materiaal (vernadering van meerdere materiaaleigenschappen) voor een bepaald gewas jaarrond moeten verder worden onderzocht.

7 Conclusies en aanbevelingen

De doelstelling van dit project was de optimale benutting van het natuurlijke licht voor de gewasproductie. Hiervoor zijn het optimale lichtniveau, -verdeling en -spectrum voor fysiologische processen, gewasproductie en kwaliteit in kaart gebracht. Bovendien zijn de mogelijkheden bepaald om de optimale benutting van het natuurlijke licht door het gewas te bereiken door bestaande kasdek- of schermmaterialen te modificeren of nieuwe materialen te ontwikkelen.

Lichtintensiteit

Algemeen kan gesteld worden dat meer licht (lichtsom PAR) in de winter voor alle gewasgroepen positief zou werken.

Mogelijkheden om dit te verwezenlijken:

- *Ontwikkeling van kasdekmaterialen met een hogere lichttransmissie (maar let ook op de warmteisolatie)*

Voor sommige gewassen ontstaat er een licht- en warmteoverschot in de zomer.

Het voorkomen hiervan kan door:

- *Ontwikkelen van een (partielle/ beweegbare/ schakelbare) NIR-reflecterende kasombulling*
- *Kwantificeren van de overall-effecten van selectieve NIR filtering in een traditionele en in een gesloten kas bij verschillende gewassen*
- *Op lange termijn ontwikkeling intelligente, schakelbare kasombulling, welke het lichtniveau (automatisch) aanpast de gewasbehoefte: maximale doorlatendheid voor PAR-licht in stralingsarme perioden (ochtend, avond, winter), minder doorlatendheid voor PAR-licht en vooral minder NIR in stralingsrijke perioden (middag, zomer).*

Lichtverdeling

Vrijwel alle gewassen met een hoge LAI (>3) raken in de zomer nooit met licht verzadigd.

Een verbetering van de benutting van het licht kan derhalve plaatsvinden door:

- *Ontwikkeling diffuus kasdekmetaal met gelijke of hogere lichttransmissie*
- *Ontwikkelen alternatieve methodes om meer licht (onderin) gewas te brengen*

Dit vereist onderzoek naar:

- *De Kwantitatieve effecten van diffuus kasdek, reflectoren tussen en onder gewas en aan binnenkant kasdek*
- *Lichtdoordringing in gewas en gewasreactie*
- *Op lange termijn ontwikkeling van een kas met een uniforme horizontale en optimale verticale lichtverdeling. Het in de kas binnenkomende PAR-licht wordt diffuus verspreidt en middels reflectievlakken op de bodem (bodempolie), tussen het gewas (reflectoren), aan de binnenkant van de kasombulling en kasconstructie naar het gewas gebracht waar het nodig is. Bovendien zou licht dat 'elders geoogst' is door middel van fibers e.d. in de juiste intensiteit en de juiste golflengtes naar het gewas gebracht kunnen worden waar het op dat moment het hardste nodig is.*

Lichtkleur

Planten gebruiken licht niet alleen om te groeien, maar halen er ook informatie uit die de plantvorm beïnvloedt. Deze informatie ontleent de plant met name aan de spectrale samenstelling van het licht.

Hieruit volgt de aanbeveling dat het voor sommige gewassen belangrijk is te werken aan

- *De ontwikkeling van een scherm dat relatief minder blauwe en / of minder verrode straling doorlaat maar de totale PAR-doorlaat niet vermindert*
- *Fundamenteel onderzoek naar spectrale effecten op gewassen*

- *Op lange termijn ontwikkeling van een beweegbaar scherm of schakelbaar kasdek waarmee de lichtkleur in de kas veranderd wordt naar behoefte voor de morfologie van de plant in een bepaald ontwikkelingsstadium, maar tevens aangepast aan de PAR-behoefte van de plant.*

8 Literatuur

- Acock B., Charles-Edwards D.A., Fitter D.J., Hand D.W., Ludwig L.J., Wilson J.W., en Withers A.C. 1978. The contribution of leaves of different levels within a tomato crop canopy to photosynthesis: an experimental examination of two canopy models. *J. Exp. Bot.* **29**: 815-827.
- Ashudah Y. 1997. Improving the properties of polyethylene films for agricultural uses, *Plasticulture*, **115**:3.
- Autio J. 2000. Supplementary lighting regimes strongly affect the quantity of gerbera flower yield. *Acta Horticulturae* **515**: 91-98
- Bakker J.C., Duffhues W.F.S., Kool E., Zwart H.F. en van de Braak N.J. 1998. Kas van de Toekomst. Eindrapportage IMAG-DLO, PBG, TNO, ECOFYS, ECN, september 1998, 181 pp.
- Barro F., De La Haba P., Malsonado J.M. & Fontes A.G. 1989. Effect of light quality on growth, contents of carbohydrates, protein and pigments and nitrate reductase activity in soybean plants. *J. Plant Physiol.* **134**: 586-591.
- Benoit F. 1998. Neue Foliengeneration für den Gartenbau. *Monatsschrift* **3**: 242-243.
- Berg G.A. van den 2000. Belichting bij tomaten. *Groente en Fruit* **31**: 15
- Bodlaender K.B.A., Waart M. van de en Marinus J. 1985. Effects of drought on water use, photosynthesis and transpiration of potatoes. 2. Drought, photosynthesis and transpiration. *Proceedings international seminar Wageningen*.
- BPI Agri 2004: Productinformatie. BPI Agri, PO Box 343, Yarm Road, Stockton-on-Tees, Cleveland TS18 3GE, UK. <http://www.bpiagri.com>
- Bredmose N.B. 1997. Chronology of three physiological development phases of single-stemmed rose (*Rosa hybrida* L.) plants in response to increment in light quantum integral. *Sci. Hort.* **69**:107-115.
- Bredmose N.B. 1997. Year-round supplementary lighting at twelve photosynthetic photon flux densities for cut roses. *Acta Horticulturae* **418**: 59 – 64
- Briassoullis D., Waaijenberg D., Gratraud J. en Elsner B. von 1997, Mechanical properties of covering materials for greenhouses: Part 1: General Overview, *Journal of Agricultural Engineering Research* **67**: 81-96
- Brosche M. en Strid Å. 2003. Molecular events following perception of ultraviolet-B radiation by plants. *Physiol. Plant.* **117**:1-10.
- Bruggink G.T. 1987. Influence of light on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants in the greenhouse: calculation the effect of differences in light integral. *Scientia Horticulturae* **31**: 175-183
- Bukhov N.G., Drozdova I.S., Bondar V.V. en Mokronosov A.T. 1992. Blue, red and blue plus red light control chlorophyll content and CO₂ gas exchange in barley leaves: quantitative description of the effects of light quality and fluence rate. *Physiol. Plant.* **85**: 632-638.

- Büttner D., Caps R., Heineman U., Hümmer E., Kadur A. en Fricke J. 1988. Thermal loss coefficients of low-density silica aërogels tiles, *Solar Energie*, **40**: 13.
- Buwalda F. 1994. Teelt van jaarrondchrysanthe op een recirculerend eb-/vloedsysteem, productiecijfers 1990-1993. PBG Rapport **176**.
- Canham A. E. 1962. Shading glasshouses with liquid films. British Electrical and Allied Industries Research Association Report **W/T40**.
- Cathey H.M. en Campbell L.E. 1979. Relative efficiency of high- and low-pressure sodium and incandescent filament lamps used to supplement natural winter light in greenhouses. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **104**: 812-825.
- Chaumont M., Morot-Gaudry J.F. en Foyer C.H. 1994. Seasonal and diurnal changes in photosynthesis and carbon partitioning in *Vitis vinifera* leaves in vines with and without fruit. *Journal of Experimental Botany* **45**: 1235-1243.
- Chopra K.L., Major S. en Pandya D.K. 1983. Transparent conductors-A status review, *Thin Solid Films*, **102**:1.
- Christie J.M. en Briggs W.R. 2001. Blue light sensing in higher plants. *J. Biol. Chem.* **276**:11457-11460.
- CIE 106/5 1993. Collection in Photobiology and Photochemistry, Commission Internationale de l'éclairage (CIE), ISBN 3900734461, pp. 29.
- CIE 106/8 1993. Terminology for photosynthetically active radiation for plants, Commission Internationale de l'éclairage (CIE), 42-46.
- CIE 85 1989. Solar spectral irradiance, Commission Internationale de l'éclairage (CIE), ISBN 3900734224, pp. 48.
- Cockshull K. E., Graves C.J. en Cave R.J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.* **67**:11-24.
- Cockshull K.E. 1984. The photoperiodic induction of flowering in short-day plants. In: *Light and the Flowering Process*. (D. Vince-Prue, B. Thomas & K.E. Cockshull, eds.). Academic Press, London, 33-49.
- Correia M.J., Chaves M.M.C. en Pereira J.S. 1990. Afternoon depression in photosynthesis in grapevine leaves – evidence for a high light stress effect. *Journal of Experimental Botany* **41**: 417-426.
- Coulson K.L., 1975. Solar and terrestrial radiation, Ac. Press, N.Y., pp. 322.
- Crano J.C. en Guglielmetti R.J. 1999. Organic Photochromic and Thermochromic Compounds 1: Main Photochromic Families. Plenum Press, New York – London.
- Cranqvist C.G., Azens A., Hjelm A., Kullman L., Niklasson G.A., Ronnow D., Stromme Mattsson M., Veszelei M. en Vaivars G. 1998. Recent advances in electrochromics for smart windows applications, *Solar Energie*, **63**: 199.

- Daponte T. 1995. Neue Gewächshausfolien - nicht nur zur Klimakontrolle. KTBL-Arbeitspapier 220: Kunststoffe und nachwachsende Rohstoffe II. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 67-87.
- Daponte T. 1997. Recent advances in photoselective films with interference effects. In: Plant Production in Closed Ecosystems: 123-138 (Editors: Goto, E., Kurata, K., Hayashi, M. and Sase, S.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – Boston – London.
- Decoteau D.R., Hatt H.A., Kelly J.W., McMahon M.J., Rajapakse N., Young R.E. en Pollock R.K. 1993. Applications of photomorphogenesis research to horticultural systems. Hort Sci. **28**: 974-1063.
- Deitzer G.T. 1984. Photoperiodic induction in long-day plants. – In: Light and the flowering process. D. Vince-Prue, B. Thomas and K.e. Cockshull (eds), **51** – 63 Academic press, London. ISBN 0-12-721960-9.
- Demers D.A., Dorais M., Wien C.H., Gosselin A.. 1998. Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato plants and fruit yields. Sci. Hort. **74**: 295 – 306.
- Dougher T.A.O. en Bugbee B. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Photochemistry and Photobiology **73**: 199-207.
- Dueck T., Elings A., Kempkes F., Knies P., Van de Braak N., Garcia N., Heij G., Janse J., Kaarsemaker R., Korsten P., Maaswinkel R., Ruijs M. 2004. De Energiebalans in Kengetallen (concepteindrapport).
- Duer K. en Svendsen S. 1998. Monolithic silica aerogel in superinsulating glazings, Solar Energie, **63**: 259.
- Elsner B. von, Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., von Zabeltitz Chr., Gratraud J., Russo G. en Suay-Cortes R.. 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries: Part 1, Design requirements, Journal of Agricultural Engineering Research **75**: 1-16.
- Fan-YanPing, Yu-Rangcai en Guo-ZhiHua 1998. Effects of shading on the growth and photosynthetic characteristics in *Spathiphyllum* palls. Acta Hort. Sinica **25**: 270-273.
- Farina D.J. 1998. Building a low-cost thermal imaging system. Sensors Magazine **15** (7): 12-16.
- Faust J.E. en Heins R.D. 1994. Modelling inflorescence development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). J. Amer. Soc. Hort. Sci. **119**:727-734.
- Gbiorczyk. K., Sonneveld P.J., Bot G.P.A. en von Elsner B. 2002. The effect of roof inclination on the condensation behaviour of plastic films used as greenhouse covering materials, Paper no. S16-O-28, XXVIth International Horticultural Congress and Exhibition (ISHS), Toronto, Canada, 11-17 Augustus, 2002, will be published in Acta Horticulturae.
- Georg G., Graf W., Scheiger D., Wittver W., Nitz P. and Wilson H.R., Solar Energie, **49** (1992) 387
- Gijzen H. 1995. In: Greenhouse Climate Control. p.29. Wageningen.
- Gosse G. 1986. Production de matière sèche et rayonnement solaire intercepté pas une couvert végétal. Agronomie **6**:47-56.

- Haeringen C. J. van, West J. S., Davis F. J., Gilbert A., Hadley P., Pearson S., Wheldon A. E. en Henbest R.G.C. 1998. The Development of Solid Spectral Filters for the Regulation of Plant Growth. *Photochemistry and Photobiology* **67** (4):407-413.
- Hand D.W., Clark G., Hannah M.A., Thornley J.H.M. en Warren Wilson J. 1992. Measuring the canopy net photosynthesis of glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany* **43**: 375-381.
- Hand D.W., Warren Wilson J. en Acock B. 1993. Effects of light and CO₂ on net photosynthesis rates of stands of aubergine and *Amaranthus*. *Annals of Botany* **71**: 209-216.
- Hanyu H. en Shoji K. 2002. Acceleration of growth in spinach by short-term exposure to red and blue light at the beginning and at the end of the daily dark period. *Acta Hort. (ISHS)* **580**:145-150.
- Heath O.V.S. en Orchard B. 1957. Temperature effects on the minimum intercellular space carbon dioxide concentration. *Nature* **180**: 180-181.
- Heemers L. en Oyaert E. 2001. Lichtreductie tijdens zomerteelt *Spathiphyllum*. *Verbondsnieuws* **45**: 28-29.
- Heemers L., Oyaert E., Volckaert E. en Debergh P.C. 2000. Flower initiation of *Spathiphyllum* in relation to climatical circumstances in different seasons. Proc. 6th PhD Symposium 65: 129-133, Gent, Belgium.
- Heinrichs G. 1998. Gemeinsam stark mit dem 'Climax'- Gewächshaus, *Deutscher Gartenbau* (27), p. 24-26.
- Helsper J.P.F.G., de Vos R.C.H., Maas F.M., Jonker H.H., van den Broeck H.C., Jordi W., Pot C.S., Keizer L. C. P. en Schapendonk A.H.C.M.. 2003. Response of selected antioxidants and pigments in tissues of *Rosa hybrida* and *Fuchsia hybrida* to supplemental UV-A exposure. *Physiologia Plantarum* **117**: 171-178.
- Hemming S., Dieleman A., van Os E., Hemming J., Swinkels G.J., Breuer J. en Slangen J. 2003. Effect of fluorescent films on production and quality of strawberry fruits, *IMAG Nota* **V 2003-65**:33.
- Hemming S., Van de Braak N., Kempkes F., Marcelis L. en Elings A.. 2004. Haalbaarheidstudie Fluorescerend Energiescherm. Rapport **070**, Agrotechnologie & Food Innovations, Wageningen.
- Heuvelink E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Ph.D. Thesis, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Heuvelink E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Thesis LUW
- Hoenecke M.E., Bula R.J. en Tibbits T.W. 1992. Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *Hort. Sci.* **27**:427-430.
- Hoffmann S. 1999. The effect of UV-radiation on colours of leaves and flowers of ornamental plants. *Gartenbauwissenschaft* **64**: 88-93.

- Hoffmann S. en Waaijenberg D. 2001. Tropical and subtropical greenhouses: a challenge for new plastic films, Proceedings International Symposium on design and environmental control of tropical and subtropical greenhouses, Taichung, Taiwan, 15-18 april 2001, pp. 8.
- Hoffmann S. 1999a. The effect on Photosensitive Cladding Materials on the Growth of Ornamental Plants I. Review. *Gartenbauwissenschaft* **64** (3): 100-105.
- Hoffmann S. 1999b. Die Wirkung von photosensitiven Bedachungsmaterialien auf das Wachstum von Zierpflanzen. II. Wirkung des UV-Bereichs auf das Streckungswachstum. *Gartenbauwissenschaft* **64** (4), 183-189.
- Hoffmann S. 1999c. Zur Wirkung von photosensitiven Bedachungsmaterialien auf Zierpflanzen. *Gartenbautechnische Informationen Heft* **46**, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft ITG.
- Holmes en Smith 1977. The function of phytochrome in the natural environment – I. Characterisation of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism, *Photochemistry and Plantbiology* **25**, 533-538.
- Holmes M.G. en Schafer E. 1981. Action spectra for changes in the "high irradiance reaction" in hypocotyls of *Sinapis alba* L. *Planta* **153**:267-272.
- Horn W. 1996: *Zierpflanzenbau (cultivation of ornamental plants)*, Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin-Wien, pp. 662.
- Hughes J.E., Morgan D.C., Lambton P.A., Black C.R. en Smith H., 1984. Photoperiodic time signals during twilight. *Plant Cell Env.* **7**: 269-277.
- Inada K. 1977. Effects of leaf colour and the light quality applied to leaf-developing period on the photosynthetic response spectra in crop plants. *Japan. Jour. Crop Sci.* **46**: 37-44.
- Ito T. 1971. Photosynthetic activity of vegetable plants and its horticultural significance. II. The time course of photosynthesis in tomato plants as influenced by some external and internal factors, especially by water and starch contents in the leaf. *Journal of the Japanese society for horticultural science* **40**: 41-47.
- Jiao J., Tsujita M.J. en Grodzinski B. 1991. Influence of temperature on net CO₂ exchange in roses. *Can. J. Plant Sci.* **71**:235-243.
- Jiao J., Tsujita M.J., Grodzinski B., 1991. Influence of radiation and CO₂ enrichment on whole plant net CO₂ exchange in roses. *Can.J.Plant Sci.* **71**: 245-252.
- Kadman-Zahavi A. en Ephrat E. 1973. Effect of red and far-red illuminations at the end of short days and interactions with night-break illuminations of *Chrysanthemum morifolium* plants. *Plant Cell Physio.* **14**: 409-411.
- Kadman-Zahavi A., Alvarez-Vega E. en Ephrat E. 1976. Development of plants in filtered sunlight. II. Effects of spectral composition, light intensity, daylength and red and far-red irradiations of long- and short-day grasses. *Israel Journal of Botany* **25**, 11-23.
- Khattak A. M. en Pearson S. 1997. The effects of light quality and temperature on the growth and development of chrysanthemums cvs. 'Bright Golden Anne' and 'Snowdon'. *Acta Horticulturae* **435**, 113-121.

- Kitano M. en Eguchi H.. 1993. Dynamic analysis of water relations and leaf growth in cucumber plants under midday water deficit. *Biotronics* **22**: 73-85.
- Kittas, C. en Baille A. 1998: Determination of the Spectral Properties of Several Greenhouse Cover Materials and Evaluation of Specific Parameters Related to Plant Response. *Journal of Agricultural Engineering Research* **71**, 193-202.
- Kool M.T.N. en Koning J.C.M. 1996. Analysis of rose crop production. *Acta Horticulturae* **424** 79-86.
- Kursawe M. en Hofmann T.A. 2000. High transmission coating on glass for solar applications, *Proceedings 3rd Int. Conference on Coatings on Glass (3rd ICCG)*, Oct. 29 - Nov. 2, 2000, p. 681.
- Lampert C.M. 1987. Advanced optical materials for energy efficiency and solar conversion, *Solar & Wind Technology*, **4**:347.
- Lampert C.M. 1981. Heat mirror coatings for energy conserving windows, *Solar Energy Materials*, **6**:1.
- Lampert C.M. 1983. Solar optical materials for innovative window design, *Int. J. of Energy Research*, **7**:359.
- Landbouwschap 1984. Kwaliteit van kassen, verslag van een onderzoek naar de kwaliteit en de toepassingsmogelijkheden van kasomhullingsmaterialen, Landbouwschap, Den Haag, pp.32.
- Lee J.H. 2002. Effects of planting date and plant density on cro growth of cut chrysanthemum. *J. of Horticultural Science and Biotechnology* **77**:238-247.
- Lelli N. en Gugumus F. 1996. New developments in agrofilms stabilisation, *Plasticulture*, **111** (3):3-16.
- Lichtenthaler H.K., Buschmann C. en Ramsdorf U. 1980. The importance of blue light for the development of sun-type chloroplasts. - In: *The blue light syndrome*. H. Senger (ed.). Springer Verlag, Berlin, 485-494.
- Lozano-González 1996: Growing lettuces in greenhouses clad with polychromatic films. *Plasticulture* **110** (2): 15-22.
- Maas F.M. en Bakx E.J. 1995. Effects of light on growth and flowering of *Rosa hybrida* 'Mercedes'. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **20**: 571-576.
- Maas F.M. en Van Hattum J. 1998. Thermomorphogenic and photomorphogenic control of stem elongation in *Fuchsia* is not mediated by changes in responsiveness to gibberellins. *J Plant Growth Regulation* **17**: 39-45.
- Marcelis L., Broekhuijsen G., Meinen E., Nijs L. en Raaphorst M. 2004. Lichtregel in de Tuinbouw. 1% licht = 1% productie? Nota PRI, Wageningen, in press.
- McCree K.J. 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* **9**: 191-216.

- McMahon M.J. en Kelly J.W. 1990. Influence of spectral filters on height, leaf chlorophyll, and flowering of Rosa X hybrida 'Meirutral'. J. Environ. Hort. **8**:209-211.
- McMahon M.J., Kelly J.W., Decoteau D.R., Young R.E. en Pollock R.K. 1991. Growth of Dedranthema x grandiflorum (Ramat.) Kitamura under various spectral filters. J. Amer. Soc. Hort. Sci. **116**: 950-954.
- Menard C. en Danserau B. 1995. Differential responses of rose cultivars to light source and nitrogen fertilization. Scientia Horticulturae **64**: 117-132.
- Meyer 1969: Meyers Lexikon der Technik und der exakten Naturwissenschaften.
Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich
- MMI Laboratories 2001, <http://www.univ-tln.fr/Recherche/unites/l2mi/fred/vo2.htm>
- Mohammadkhani V., Sonneveld P.J. 2003. Haalbaarheidsstudie energiebesparend bodemafdekfolie. A&F-rapport 2003-**. In druk.
- Morris L.G., Trickett E.S., Vanstone F.H. en Wells D.A.. 1958. The limitation of maximum temperature in a greenhouse by use of a water film on the roof. Journal of Agricultural Engineering Research **3**, 121-130.
- Mortensen L.M. en Strømme E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. Scientia Horticulturae **33**, 27-36.
- Mortensen L.M. en Moe R. 1992. Effects of selective screening of the daylight spectrum, and of twilight on plant growth in greenhouses. Acta Horticulturae **305**, 103-115.
- Mortensen L.M., Strømme E., Sebesta Z. and Wenner D. 1987. Growth chambers with control of light quality. Norwegian Journal of Agricultural Science **1**, 1-5.
- Mortensen L.M. en Strømme E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops Sci. Hort. **33**: 27-36.
- Murakami K., Cui H., Kiyota M., Aiga I. and Yamane T. 1997. Control of plant growth by covering materials for greenhouses which alter the spectral distribution of transmitted light. Acta Horticulturae **435**, 123-139.
- Nederhof E.M. 1986. Licht in de kas ook in de zomer belangrijk. In: *Licht in de kas*. E.M. Nederhof (ed.) Informatiereeks no. **90**, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk. Pp. 41-43.
- Nederhoff E.M. 1994. Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Ph.D. Thesis, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Nederhoff E.M. en Vegter J.G. 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. Ann. Bot. **73**: 353-361.
- Nordgaard A. en Beckman W.A.. 1992. Modeling of flat-plate collectors based on monolithic silica aerogel, Solar Energie, **49**:387.

- Os P. van, De Koster R. en Van der Wurff A.A.M. 1989. Betere produktieverbetering Berbera door assimilatiebelichting. Vakblad voor de Bloemisterij **40**:26-29.
- Out P.G. en Breuer J.J.G. 1995. Effect van gecoat glas op de lichttransmissie en het energieverbruik van tuinbouwkassen, Rapport **95-1**, maart 95, IMAG-DLO Wageningen.
- Out P.G. 1993. Betere isolatie en toch veel licht, Groenten en Fruit / Glasgroenten (**2**), p. 26-27
- Oyaert E., Debergh P.C. en Volckaert E. 1997. Growth inhibition of *Coleus* under coloured plastic films. Acta Horticulturae **435**, 141-147.
- Parsley M. 1991. Hallcrest Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology. Hallcrest Inc., Glenview, IL.
- PBG 2000. Schermen in de glastuinbouw, Energie- en teeltaspecten, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Aalsmeer-Naaldwijk, 2^e druk, pp. 128.
- Pearson S., Wheldon A.E. en Hadley P. 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials. Journal of Agricultural Engineering Research **62**, 61-70.
- Pekela R.W. 1995. New organic aerogels based upon a phenolic-furfural reaction, J. Non-Cryst. Solid **188** (1995), p. 34-40.
- Pettersen A.H. 1984. Veksthus med strålingsabsorberende overflate. Gartneryrket **74**, 349
- Pinheiro Henriques A.R., de Marcelis L.F.M. 2000. Regulation of growth at steady-state nitrogen in Lettuce: interactive effects of nitrogen and irradiance. Annals of Botany **86**(6) 1073-1080.
- Piringer A.A. en Cathey H.M. 1960. Effect of photoperiod, kind of supplemental light and temperature on the growth and flowering of petunia plants. Proc. Am. Soc. Hortic. Sci. **76**:649-660.
- Prinz Optics 1999. Productinformation "Heat Reflection Filters", Prinz Optics GmbH, 55442 Stromberg, Germany.
- Rajapakse N.C., Young R.E. en Oi R. 2000. Growth responses of chrysanthemum and bell pepper transplants to photoselective plastic films. Scientia Horticulturae **84**, 215-225.
- Rajapakse N.C., Pollock R.K., McMahon M.J., Kelly J.W. en Young R. E. 1992. Interpretation of light quality measurements and plant response in spectral filter research. HortScience , 1208-1211.
- Rajapakse N.C. en Kelly J.W. 1995. Spectral filters and growing season influence growth and carbohydrate status of chrysanthemum. J. Amer. Soc. Hort. **120**:78-83.
- Raviv M. en Reuveni R. 1998. Fungal photomorphogenesis: A basis for the control of foliar diseases using photoselective covering materials for greenhouses. HortScience **33**, 925-929.
- Raviv M., Schayer R. en Shor Y. 1988. Ultra-Violet radiation effect on blackening of rose petals. Applied Agricultural Research **3**, 302-304.
- Reuveni R., Raviv M., Bar R., Ben Efraim Y., Assenheim D. en Schnitzer M. 1994. Development of photoselective PE films for control of foliar pathogens in greenhouse-grown crops. Plasticulture **102**, 7-16.

- Rijssel E. en Ploeger C. van 1997. Economisch perspectief van assimilatiebelichting bij potplanten. PBG Rapport **42**.
- Rijssel E. van 1995. Optimaal belichten. PBG Rapport **8**.
- Ritter A., Wagner E. en Holmes M.G. 1981. Light quantity and quality interactions in the control of elongation growth in light-grown *Chenopodium rubrum* L. seedlings. *Planta* **153**: 556-560.
- Rozema J., van de Staaij J., Björn L.O. en Caldwell M. 1997. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. *Trends in Ecology and Evolution* **12**: 22-48.
- Salisbury F.B. en Ross C.W. 1992. *Plant Physiology*. Wadsworth Publ. Co. Belmont, Calif.
- Schuerger A.C., Brown C.S. en Stryjewski E.C. 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann. Bot.* **79**: 273-282.
- Shoshany H. 1991. Morphogenetische Signale durch Gewächshausfolien, die zu Ertragssteigerungen führen. KTBL-Arbeitspapier: Einsatz von Kunststoffen bei umweltschonenden Kulturverfahren
- Siedlecka M. en Romanowska E. 1993. Effect of abscisic acid and blue radiation on photosynthesis and growth of pea plants. *Photosynth.* **28**: 583-587.
- Singh D.P., Kumar A., Singh P. en Sharma H.C. 1993. Diurnal patterns of wheat canopy photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency at different phases of growth in the field. *Photosynthetica* **28**: 143-149.
- Smith H. 1982. Light quality, photoperception and plant strategy. *Ann. Rev. Plant Physiol.* **33**: 481-518.
- Sonneveld P.J. en Waaijenberg D., 2003. Nieuwe coating zorgt voor meer licht in de kas, Vakblad voor de Bloemisterij, no. **15**, p. 42-43.
- Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M. en Waaijenberg D. 2002. Greenhouse design for the future, which combines high insulation roof material with high light transmittance, Paper no. 02SE013, International Conference on Agricultural Engineering (AgEng), Boedapest, Hongarije, 30 juni - 4 juli 2002.
- Sonneveld P.J., Breuer J.J.G., Campen J.B., Swinkels G.L.A.M. en Waaijenberg D. 2001. Ontwikkeling van een hoog isolerend zigzag-vormig kasdek met een geoptimaliseerde lichttransmissie, IMAG Nota P 2001-88, pp 51.
- Spaargaren J.J. 2000. Belichting van tuinbouwgewassen. Hortilux-Schröder BV, Monster.
- Steinmetz K.A. en Potter J.D. 1996. Vegetables, fruit and cancer prevention: a review. *J. Am. Diet Assoc.* **96**: 1027-1039.
- Stoffers J.A. 1968. Licht en dakhelling van warenhuizen, Instituut voor Tuinbouwtechniek, Wageningen, Mededelingen van de Directie Tuinbouw **31**, 1 (jan), 17-21
- Suntek 1998. Productinformation "Thermochromic Window Film". Suntek Inc., 6817A Academy Parkway, Albuquerque, NM 87109.

- Taiz L. en Zeiger E. 1998a. Photosynthesis: physiological and ecological considerations. In: *Plant Physiology*, 2nd ed. L. Taiz & E. Zeiger (eds.). Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA, USA, 227-249.
- Taiz L. en Zeiger E. 1998b. The control of flowering. In: *Plant Physiology*, 2nd ed. L. Taiz & E. Zeiger (eds.). Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA, USA. Pp. 691-724.
- Tevini M. 1993. *UV-V Radiation and Ozone Depletion*. Lewis Publishers, Boca Raton, London.
- Thomas B. en Dickinson H.G. 1979. Evidence for two photoreceptors controlling growth in de-etiolated seedlings. *Planta* **146**: 545-550.
- Tikhomirov A.A., Zolotuklin I.G., Lisovskii G.M. en Sid'ko F.Y. 1987. Specificity of responses to the spectral composition of PAR in plants of different species under artificial illumination. *Fiz. Rast.* **34**: 774-785.
- Tucker D.J. 1975. Far-red light as a suppressor of side shoot in the tomato. *Plant Sci. Lett.* **5**: 127-130.
- Verlodt I., Daponte T. en Verschaeren P. 1995. Interferentie pigments for greenhouse films, *Plasticulture* **108**: 13.
- Verlodt I. en Waaijenberg D. 1999. Folie om de kas doet niet meer onder voor glas, *De Boomkwekerij* (**43**):13-15.
- Verlodt I. en Verschaeren P. 1997. New interference film for climate control. *Plasticulture* **115**: 27-35.
- Verlodt I., Daponte T. en Verschaeren P. 1995. Interference pigments for greenhouse films. *Plasticulture* **108**, 13-26.
- Vogt E. 1995. Kunststoffabrikanten ontdekken metallocenen, *Chemisch Weekblad*, **48**: 549.
- Waaijenberg D. en Sonneveld P.J. 2002. Greenhouse design for the future with a cladding material combining high insulation capacity with high light transmittance, paper no. S16-O-29, XXVIth International Horticultural Congress and Exhibition (ISHS), Toronto, Canada, 11 – 17 augustus 2002.
- Waltz F. en Horn W. 1997. The influence of light quality on gas exchange of *Dendranthema*. *Acta Horticulturae* **418**, 53-57.
- Warner R.M. en Erwin J.E. 2002. Estimation of total canopy photosynthetic capacity of roses grown under two canopy management systems. *Acta Hort. (ISHS)* **580**:89-93.
- Warrington I.J. en Mitchell K.J. 1976. The influence of blue- and red-biased light spectra on the growth and development of plants. *Agric. Meteorol.* **16**: 247-262.
- Weiss D. en Halevy A.H. 1991. The role of light reactions in the regulation of anthocyanin synthesis in *Petunia* corollas. *Phys. Plant.* **81**: 127-133.
- Wheeler R.M., Mackowiak C.L. en Sager J.C. 1991. Soybean stem growth under high-pressure sodium with supplemental blue lighting. *Agron.J.* **83**:903-906.
- Zabeltitz Chr. von 1986. *Gewächshäuser (greenhouses)*, Handbuch des Erwerbsgärtners, Eugen Ulmer GmbH, pp. 284.

- Zarka Y. en Zarka A. 1985. New PVC fluorescent film for cladding greenhouses - the results form three years' trials. *Plasticulture* **85** (1), 6-16
- Zieslin N. en Halevy A. H. 1969. Petal blackening in 'Baccara' roses. *Journal of American Society for Horticultural Science* **94**, 629
- Zuylen van 1995. Isoleren met gebakken lucht, *Chemisch Weekblad* **11** (1995), 500
- Zwart H.F. de 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. *IMAG-DLO rapport 96-05*, pp. 236.