



Luminescente Zonne Collectoren in de Glastuinbouw

Verkenning van de mogelijke inpassing van luminescente
Zonne collectoren in de Glastuinbouw

Bram van Breugel

Rapport GTB-1409



WAGENINGEN UR
For quality of life

Stichting
Programmafonds
Glastuinbouw



**LTO Glaskracht
Nederland**



Ministerie van Economische Zaken



Referaat

In een kas wordt tijdens de groei energie uit externe bronnen gebruikt terwijl er netto meer energie binnen komt vanuit de zon dan wat er wordt gebruikt voor bijvoorbeeld verwarming en plantengroei. Een aantrekkelijke optie zou zijn om Zonne energie die niet door de plant gebruikt kan worden om te zetten in elektriciteit zodat de kas meer in zijn eigen energie vraag kan voldoen. Omdat Luminescente Zonne Collectoren zeer selectief een deel van het Zonne spectrum kunnen opvangen en zich gemakkelijk in de constructie laten verwerken zou deze techniek ondanks de lage omzetting van Zonne energie naar elektriciteit misschien wel op een economische manier in kassen toegepast kunnen worden om elektriciteit op te wekken. Om dit te evalueren is er een bijeenkomst georganiseerd met onderzoekers op het gebied van Zonne energie en materialen en onderzoekers uit de tuinbouw om de potentie van deze techniek te evalueren.

Abstract

Modern greenhouses use energy from external sources during the growing season while at the same time receiving more energy from the sun than can be used for heating or plant growth. This occurs due to a timing mismatch between when additional energy is needed and when plenty of free energy is available from the sun. An attractive option would be to convert the parts of the solar spectrum that cannot be utilized for plant growth into electricity in order for greenhouses to become more self-sufficient in their energy use. Since luminescent solar concentrators are very selective in which part of the spectrum is converted into electricity and can very easily be integrated into constructions they could be an economically viable technology for generating solar energy within the greenhouses. In order to make a preliminary evaluation a workshop was organised bringing together researcher from the field of solar energy and materials and researcher from horticultural technology and plant physiology to discuss the possibilities.

Rapportgegevens

Rapport GTB-1409

Projectnummer: 3742218700

Disclaimer

© 2016 Wageningen UR Glastuinbouw (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk, T 0317 48 56 06, F 010 522 51 93, E glastuinbouw@wur.nl, www.wageningenUR.nl/glastuinbouw. Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen UR Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0)10 522 51 93

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Randvoorwaarden voor energie opwekken in de glastuinbouw	9
3	Luminescente Zonne Collectoren	11
3.1	Voordelen van LSCs	12
3.2	Verliezen in LSCs	12
3.2.1	Niet geabsorbeerd licht	12
3.2.2	Licht verlies via de ontsnappingskegel	12
3.2.3	Fluorescente quantum yield	13
3.2.4	Reabsorptie	13
3.2.5	Waveguide absorptie	13
3.2.6	Oppervlakte scattering	14
3.2.7	Efficiëntie van de fotonvoltaïsche cellen	14
3.2.8	Waveguide scattering	14
3.2.9	Reflectie	14
4	Verschillende manieren om met de verliezen in LSCs om te gaan	15
4.1	Efficiëntie verhogen	15
4.1.1	Dye alignment	15
4.1.2	Selectieve reflectoren	17
4.1.3	Thulium gedoteerde halogeniden	17
4.2	De lage efficiëntie afzetten tegen de voordelen	17
4.2.1	Stroom leverende Mondriaan	18
4.2.2	Stroom opwekkende geluidswal	18
4.3	LSC technologie op dit moment en inschatting van de potentie in de praktijk	19
5	Twee aantrekkelijke opties om LSCs in te passen in de glastuinbouw	21
5.1	UV straling benutten	21
5.1.1	Lumogen-F violet 570	21
5.1.2	Mangaan ²⁺ gedoteerde Zink/Cadmium/Zwavel quantum dots	22
5.1.3	diheptyl-bipyridyl-diol	22
5.1.4	Eu(TTA) ₃ (TPPO) ₂	23
5.2	Verwijderbare fluorescente coating actief in het PAR als stroom opwekkend alternatief voor krijgen	23
6	Roadmap naar implementatie	25
6.1	Reken modellen	25
6.2	Meet methodes	25
6.3	Constructie	26
6.4	Glas	26
6.5	Fotovoltaïsche cellen	27
6.6	Fluorescente kleurstoffen: levensduur, efficiëntie en spectrale response	27

7	Discussie en conclusie	29
	Literatuur	31

Samenvatting

In een kas komt meer energie binnen dan nuttig gebruikt kan worden. Het omzetten van de overtollige energie in elektriciteit zou de glastuinbouw sterk kunnen verduurzamen. Hier zijn uiteraard al pogingen voor ondernomen, maar deze bleken of economisch niet haalbaar of staan de normale werking van de kas ernstig in de weg. Via Luminescente Zonne Collectoren (LSC) zou dit echter anders uit kunnen pakken en het is daarom de moeite waard om deze technologie te evalueren. Om hiermee van start te gaan is er een bijeenkomst gehouden op 8 april 2016 met de voornaamste onderzoekers in Nederland die dit onderwerp onderzoeken samen met onderzoekers en vertegenwoordigers uit de glastuinbouw.

Tijdens de bijeenkomst is duidelijk gemaakt dat er aan de ene kant nog geen hoge efficiëntie verwacht mag worden van LSCs maar dat door de lage materiaalkosten en te verwachten gemakkelijke verwerking in de kas LSCs alsnog rendabel uit kunnen pakken wanneer deze worden toegepast.

Uit de discussie kwam voort dat het omzetten van UV straling in licht binnen de fotosynthese actieve regio van het gewas een goede optie zou zijn om elektriciteit mee op te wekken maar dat het waarschijnlijk een grotere meerwaarde oplevert wanneer dit omgezette licht niet wordt omgezet in elektriciteit maar direct naar het gewas wordt geleid en zo de groei bevordert.

Een andere veelbelovende optie die voort kwam uit de discussie is het klassieke krijten te vervangen in kassen waarin schaduwgewassen worden verbouwd. Door een tijdelijke fluorescente coating aan te brengen in de zomer kan via het LSC mechanisme energie worden opgewekt en gaat er tegelijkertijd geen licht verloren in de wintermaanden.

Een technisch aspect over LSCs dat aan bod kwam tijdens de discussie waarmee rekening mee gehouden moet worden is dat de efficiëntie en stabiliteit van fluorescente kleurstoffen geen inherente chemische eigenschappen zijn maar dat deze samenhangen met de manier waarop de kleurstoffen zijn verwerkt. Als een fluorescent materiaal niet stabiel blijkt te zijn is het dus onredelijk om op basis daarvan de kleurstof af te schrijven, er kan dan alleen worden geconcludeerd dat de kleurstof in combinatie met hoe deze is verwerkt niet volstaat.

1 Inleiding

Dit rapport vormt een samenvatting van de diverse presentaties die de revue zijn gepasseerd tijdens de bijeenkomst van 8 april 2016. Gedurende dit rapport zal dan ook herhaaldelijk materiaal uit deze presentaties worden gebruikt waarbij alleen wordt gerefereerd naar de naam van de spreker met de toevoeging april 2016.

Sprekers tijdens de bijeenkomst:

Cecilia Stanghellini



Senior researcher at Wageningen UR Greenhouse Horticulture. She has been working for some 30 years on management and resource use of greenhouses in wet and dry climates. Major topics are: greenhouse climate simulation and management; crop yield and resource use efficiency; economy and environmental impact of greenhouse crops. She is fluent in five languages and has been invited as lecturer in five continents.

Anja Dieleman



Senior researcher plant physiology at Wageningen UR Wageningen UR Greenhouse Horticulture. Her research interests are the effects of greenhouse climate and cropping systems on crop growth and development, including underlying processes like photosynthesis and transpiration. She works on plant monitoring systems, energy conservation and the design of new (LED based) greenhouse production systems.

Michael Debije



Assistant Professor in the Functional Organic Materials and Devices (SFD) group at the Eindhoven University of Technology, where he is responsible for the Energy cluster within SFD. He has been working on luminescent solar concentrators for over a decade and has published numerous papers on the subject in peer reviewed journals.

Lenneke Slooff



Senior researcher at Energy Centre of the Netherlands. She has been working on polymer solar cell, the optimisation of luminescent solar concentrators and the stability of fluorescent dye in relation to plastic in which it was dissolved. She also contributed to projects like the solar noise barrier and publishes regularly on her work in peer reviewed journals.

Panos Moraitis



PhD student in the group of Wilfried van Sark at the Copernicus Institute of Sustainable Development at Utrecht University. This group researches next generation photovoltaic devices incorporating nanocrystals, e.g., luminescent solar concentrators, as well as photovoltaic performance, smart grid development, life cycle analysis, socioeconomics, and policy development.

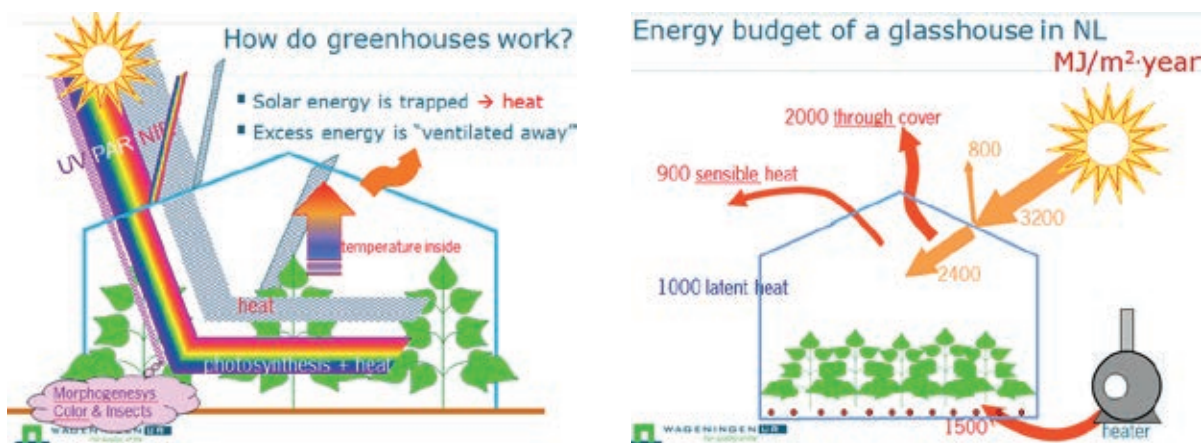
Evert Merkkx



PhD student in the group of Erik van der Kolk, they focus on optical and luminescent processes in inorganic materials. Current projects within this group are funded by FOM, ADEM and STW and are about sustainable energy applications of (luminescent) materials like "*solar spectral conversion materials*" for PV applications, "*luminescent solar concentrator (LSC) materials*" and "*switchable materials*".

2 Randvoorwaarden voor energie opwekken in de glastuinbouw

In een kas staat de productie van het gewas voorop. Voor optimale gewas productie is het belangrijk alle groeifactoren (bijv. water, licht, temperatuur, CO₂) onder controle te houden omdat iedere groeifactor een bottleneck in het groeiproces kan vormen zodra deze niet onder controle is. De voornaamste functie van een kas is dan ook het onder controle brengen van de diverse groeifactoren.



Stanghellini april 2016

Figuur 1 Het klimaat controleren is een van de voornaamste functies van een kas, voor een optimaal klimaat wordt er in Nederland veel warmte toegevoegd in de koude periodes maar wordt er nog meer warmte weer weg geventileerd in warme periodes. Door het gebruik van enkelen schermen en mechanische ontvochtiging zoals bij 'het nieuwe telen' gebruikelijk is valt deze warmte balans positiever uit.

In Nederlandse kassen geldt over het algemeen dat de hoeveelheid licht beschikbaar voor fotosynthese (PAR licht) een natuurlijke bottleneck vormt voor veel gewassen. Hierbij geldt als vuistregel dat 1% extra PAR licht 1% extra productie oplevert.

Voor sommige gewassen zoals de meeste potplanten is tijdens de zomermaanden echter te veel natuurlijk zonlicht beschikbaar waarvan dus een percentage gebruikt zou kunnen worden zolang deze licht filtering maar weer ongedaan kan worden gemaakt voor de wintermaanden. Op dit moment is het nog steeds gebruikelijk voor deze gewassen om tijdens de zomer maanden het kasdek te krijten om plantschade veroorzaakt door lokale hogen licht intensiteiten te voorkomen.

Areaal glazen kassen in Nederland	~ 9.000 Hectare	Zonne straling beschikbaar voor elektriciteit productie
Vruchtgroente gewas	~4750 ha	UV (en IR tijdens zomermaanden)
Snijbloemen	~1880 ha	UV (en IR tijdens zomermaanden)
Pot planten	~1300 ha	UV (en IR en PAR tijdens zomermaanden)

Dieleman april 2016

De infrarode en ultra violette straling van de zon kunnen planten niet omzetten in biomassa en zou in veel gevallen (bijna het gehele areaal) wel benut kunnen worden voor andere doeleinden, uiteraard mag dit de temperatuur (een zeer invloedrijke groeifactor) regeling in de kas niet in de weg staan. Uit de discussie tijdens de bijeenkomst werd de verwachting uitgesproken dat - voor het areaal met gewassen waarbij de beschikbare lichtsom de bottleneck vormt - het omzetten van UV straling naar PAR licht waarschijnlijk tot meer waarde generatie zou leiden dan wanneer dit omgezet zou worden naar elektriciteit.

Ook moet bij het weg filteren van specifieke kleuren rekening gehouden worden met de sturende werking van licht op de plant. Het onderzoek naar de interacties tussen licht en de morfologie van diverse gewassen is nog in volle gang en de (on)wenselijkheid van de waargenomen effecten is niet altijd eenduidig.

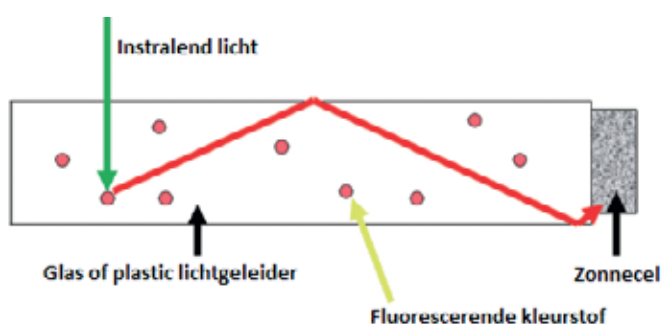
Licht kleur	Waargenomen effecten
Blauw (400 tot 500 nm)	• Compactere planten • Kleinere dikkere bladeren • Hoger chlorofylgehalte • Meer opening van de huidmondjes
Groen (500 tot 600 nm) (effecten lijken op die van ver rood licht)	• Hogere reflectie en transmissie door bladeren • Meer stengelstrekking • Opener gewas structuur
Rood (600 tot 700 nm)	• Meest efficiënte kleur voor fotosynthese • Stimuleert vertakking • Verhoogt plantweerbaarheid
Ver rood (700 tot 800 nm) (effecten gevolg van verlaagde Rood/VerRood verhouding)	• "shade avoiding syndrom" • Verlenging van de plant Strecking van de stengel en bladstelen • Remt de vertakking • Groter en dunner blad • Kan bloei vervroegen • Stimuleert de wortelvorming

Dieleman april 2016

Verder moet bij het aanpassen van de UV straling rekening gehouden worden met mogelijke effecten op bestuivende insecten en de kleur van de vruchten.

3 Luminescente Zonne Collectoren

Duurzame energie opwekken in een kas zonder dat dit de normale operatie beïnvloedt staat al heel lang op het verlanglijstje van de industrie, onderzoekers en beleidsvoerders. Pogingen in het verleden - zoals de kasconcepten ELKAS 1 & 2 en de DagLichtKas waarbij respectievelijk nabij infrarood licht en direct zonlicht werden benut om energie op te wekken - bleken niet haalbaar omdat deze te complex of uiteindelijk te kostbaar waren om door de markt op te nemen. De DagLichtKas is echter wel commercieel in gebruik genomen waarin alleen de warmte opvang en terug levering is toegepast en niet het opwekken van elektriciteit. Via LSCs zouden de kosten en baten van het opwekken van elektriciteit in een kas echter helemaal anders uit kunnen pakken. Een LSC werkt namelijk ongeacht de oriëntatie en kan zelfs als enige techniek effectief diffuus licht concentreren. LSCs kunnen zodoende mogelijk in de toekomst als kasdek worden ingebouwd.



Debij april 2016

Figuur 2 Schematische weergaven van de werking van een luminescente Zonne collector.

Een LSC is in feite niets anders dan een fluorescerende kleurstof in een plaat glas of plastic. Door de hogere brekingsindex van deze plaat wordt 75%, van het door de kleurstof opnieuw uitgezonden licht, intern gereflecteerd, de glasplaat fungeert dan als waveguide en geleid het door de fluorescente kleurstof uitgezonden licht naar de randen waardoor deze oplichten en het ingevangen licht daar via pv-cellen omgezet kan worden in elektriciteit. Doordat de hoeveelheid licht die wordt ingevangen alleen van de brekingsindex afhankelijk is zal de dikte van de waveguide maar weinig invloed hebben.

Fluorescente kleurstoffen zijn er over de hele range van het Zonne spectrum en kunnen dus ook zo gekozen worden dat deze in het UV of infra rood licht onderscheppen en het fotosynthese actieve licht doorlaten. Vanwege de grote diversiteit aan fluorescente kleurstoffen kan er in de toekomst wellicht een LSC worden gemaakt die zich laat inbouwen in de glastuinbouw zonder de teelt eronder te beïnvloeden.

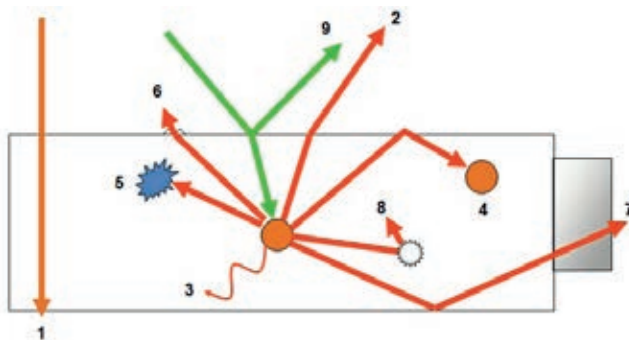
3.1 Voordelen van LSCs

LSCs hebben een aantal belangrijke voordelen die sterk door zullen werken bij het opschalen en implementeren van deze technologie.

1. LSCs vangen zowel direct als diffuus licht op en kunnen dit concentreren aan de randen van de waveguide, er zijn dus geen solar tracking of andersoortige bewegende onderdelen voor nodig. Hierdoor kunnen LSCs op dezelfde manier als normaal glas worden ingezet.
2. Doordat het ingevangen licht van het hele oppervlak van de glasplaat bij draagt aan de verlichting van de randen hebben de pv cellen weinig last van schaduwvorming.
3. Het deel van het zonlicht dat wordt ingevangen is spectraal zeer selectief. Het is dus mogelijk om bijvoorbeeld alleen de UV straling in te vangen en het PAR licht ongemoeid te laten
4. Er worden alleen maar goedkope materialen gebruikt. De meest kostbare delen zijn het glas zelf en de pv cellen aan de randen en vermoedelijk de arbeid die komt kijken bij het monteren van deze pv cellen.
5. De fluorescente kleurstoffen kunnen waarschijnlijk worden verwerkt in afwasbare coatings zodat de LSC in de lente geactiveerd en in de herfst verwijderd kan worden zodat tijdens de wintermaanden al het natuurlijke zonlicht beschikbaar is voor de planten.
 - a. Voor snel schakelend activeren en deactiveren van een LSC zijn technieken uit de LCD industrie beschikbaar maar aangezien daarbij twee glaslagen met transparante elektrische geleiders nodig zijn zal dit moeilijk te combineren zijn met een hoge PAR transmissie en economische haalbaarheid.

3.2 Verliezen in LSCs

Ondanks alle hierboven genoemde voordelen wordt de implementatie belemmerd door het voornaamste nadeel: een lage efficiëntie (in de orde grootte van enkele procenten). In de Figuur hieronder staan de verschillende verlies mechanismes geïllustreerd en daaronder toegelicht.



Debij april 2016

Figuur 3 Schematische illustratie van de diverse verliesmechanismen in luminescente Zonne collectoren. De genummerde illustraties worden in de onderstaande paragrafen toegelicht.

3.2.1 Niet geabsorbeerd licht

Het voornaamste verlies in een LSC komt voort uit een lage absorptie. Om een hoge efficiëntie te halen zou een zo breed mogelijk spectrum opgevangen moeten worden. Dit verlies is voor de tuinbouw juist een voordeel aangezien er zo juist genoeg licht over kan blijven voor de planten groei.

3.2.2 Licht verlies via de ontsnappingskegel

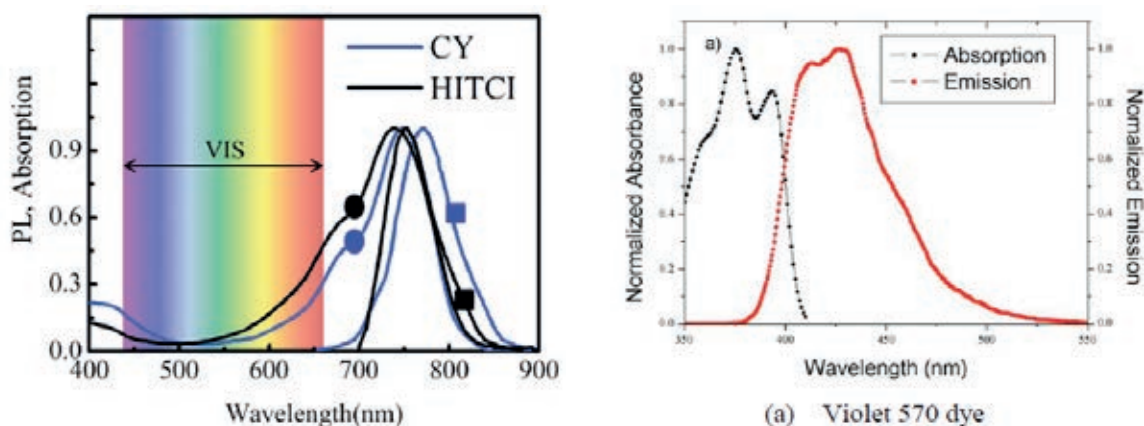
Licht dat onder een hoek kleiner dan $\sim 45^\circ$ met de loodrechte richting op het glas wordt uitgezonden zal niet volledig intern worden gereflecteerd maar ontsnappen uit de waveguide als een direct gevolg van de wet van Snellius. Als er voor een LSC gekozen zou worden waarbij de UV straling wordt omgezet in PAR licht kan dit verlies van de LSC bijdragen aan de hoeveelheid PAR licht in de kas.

3.2.3 Fluorescente quantum yield

De quantum yield is een maat voor de efficiëntie van een fluorescerende kleurstof. Bij een efficiëntie van 100% worden alle geabsorbeerde fotonen opnieuw uitgezonden op een langere golflengte, er zijn fluorescente kleurstoffen met een quantum yield van tegen de honderd procent. Deze quantum yield is niet een inherente eigenschap, de coating waarin de kleurstof is opgelost kan hier invloed op hebben door emissie loze relaxatie wegen te introduceren of te onderdrukken (Lakowicz, 2006). Op de zelfde manier is de stabiliteit en dus levensduur niet een inherente eigenschap, deze kan beïnvloed worden door bijvoorbeeld niet gereageerde polymeren of initiators in de coating maar ook door de porositeit van de coating voor zuurstof.

3.2.4 Reabsorptie

Reabsorptie is een verlies dat zeer belangrijk wordt naarmate de afmetingen van LSCs toenemen. Door overlap in de emissie en absorptie spectra kan ingevangen licht opnieuw worden geabsorbeerd door de fluorescente kleurstof waardoor de overige verliesmechanismes worden herhaald. Omdat het uitgezonden licht een grote afstand door de LSC moet afleggen wordt de waarschijnlijkheid van reabsorptie zeer groot. In het voorbeeld in de Figuur hieronder rechts zal het licht dat wordt uitgezonden op 410 nm grotendeels worden beïnvloed door reabsorptie in een LSC van 2120 x 1670 x 4 mm wat voor de tuinbouw een gangbare maat is. Ondanks dat op deze golflengte de absorptie relatief laag is wordt deze over lange afstanden extreem hoog, zo min mogelijk overlap tussen de absorptie en emissie van fluorescente kleurstoffen is dan ook essentieel.



Figuur 4 Absorptie en emissie spectrum van twee type kleurstoffen. Links: twee Cyanide afgeleiden kleurstoffen (Yimu Zhao, 2014) actief in het nabij infra rood, Rechts: Lumogen Violet 570 (Hind A. Ahmed, 2013). De emissie van kleurstof HITCI overlapt volledig met zijn absorptiepiek, ook bij kleurstof CY zal reabsorptie de werking van de LSC te niet doen, bij Lumogen Violet 570 zal reabsorptie nog steeds een probleem zijn maar niet over zijn volledige werkgebied.

3.2.5 Waveguide absorptie

Waveguide absorptie is de absorptie van het basismateriaal waarvan een LSC wordt gemaakt, bij normale transmissie door een glasplaat is de absorptie beperkt omdat de afgelegde weg door het glas gelijk staat aan de dikte van de glasplaat voor loodrechte transmissie en voor licht inval onder een hoek beperkt blijft tot dezelfde orde grootte. Zodra een glasplaat gebruikt wordt als een waveguide wordt de afgelegde weg een paar meter in de plaats van een paar mm, hierdoor wordt zelfs de geringste absorptie significant. Twee varianten helder low iron glas die qua loodrechte transmissie maar 0.2% uit elkaar liggen (en hemisferisch 0.4%) resulteren in een absoluut prestatie verschil van 10% wanneer deze glastypes als waveguide worden gebruikt met de afmetingen 212 bij 167 cm.

3.2.6 Oppervlakte scattering

Een van de huidige trends in de glastuinbouw is het gebruik van kasdekken die direct zonlicht omzetten in diffuus zonlicht. De reden hiervoor is dat het natuurlijke zonlicht op deze manier verder in het gewas doordringt en het gewas op deze manier efficiënter met het natuurlijke zonlicht om gaat wat leidt tot hogere productie.

Het omzetten van direct licht in diffuus licht wordt momenteel vaak gerealiseerd door een licht verstrooiend oppervlak op het glas aan te brengen. Door dit verstrooiende effect zou ook direct al het - via fluorescentie ingevangen - licht ontsnappen uit het glas en zo de werking van de LSC volledig te niet doen. Gelukkig zijn er ook andere opties voor het diffuus maken van direct zonlicht, in bijvoorbeeld de glas-folie kas kan er simpelweg een diffuus folie met een helder glas worden gecombineerd, een andere optie is het gebruik van een diffuus energie scherm en er zijn ideeën voor verticale lamellen waarmee een extreme lichtspreiding kan worden gerealiseerd zonder dat er lichtverlies optreedt.

3.2.7 Efficiëntie van de fotonvoltaïsche cellen

Buiten de luminescente Zonne collector hebben ook de fotonvoltaïsche cellen aan de randen een bepaalde efficiëntie. Een pv cel met een omzetting efficiëntie van 20% van het normale Zonne spectrum zal echter niet leiden tot 80% verlies voor het door de LSC uit gekoppeld vermogen. De efficiëntie van pv cellen onder het normale Zonne spectrum zijn gebonden aan fysische limieten, uitgebreid beschreven door Shockley en Queisser in de jaren 60. De voornaamste limitering komt voort uit het feit dat de pv-cel 1 golflengte zeer goed omzet (voor Si pv-cellen is dat ~ 1100 nm), fotonen met een lagere energie (golflengte langer dan 1100 nm voor Si) worden niet geabsorbeerd en dragen niet bij aan de elektriciteit opwekking, fotonen met een hogere energie (golflengte korter dan 1100 nm voor Si) dragen per foton evenveel bij aan de elektriciteit opwekking als fotonen met exact de juiste energie waarbij de resterende energie verloren gaat als warmte. Doordat aan de randen van een LSC niet het normale Zonne spectrum wordt uit gekoppeld maar een vrij nauwe spectrale band zal dit verlies beperkt blijven, zeker wanneer de golflengte van het uit gekoppelde licht wordt gecombineerd met een goed bijpassende soort pv-cel.

3.2.8 Waveguide scattering

Waveguide scattering is verstrooiing die plaats vindt in de bulk van de waveguide. Voor de tuinbouw in Nederland is het voorkeurs materiaal voor kasdekken glas, aangezien glas zich in de glasfase bevindt en dus op microschaal geen domeingrenzen heeft zal deze verstrooiing alleen bij fouten in het glas optreden en waarschijnlijk verwaarloosbaar zijn.

De toegepaste coating waarin zich de fluorescente kleurstoffen bevinden mag ook geen additionele verstrooiing opleveren.

3.2.9 Reflectie

Uiteraard vormt licht dat wordt gereflecteerd ook voor LSCs een verlies aangezien dit niet geabsorbeerd kan worden. Totale interne reflectie waaraan een LSC zijn werking te danken heeft wordt niet verhinderd door een anti reflectieve coating waardoor deze technieken gewoon te combineren zijn.

4 Verschillende manieren om met de verliezen in LSCs om te gaan

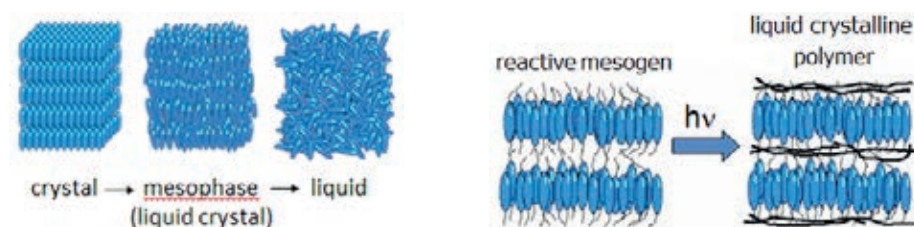
De verliesmechanismes beschreven in het vorige hoofdstuk zorgt ervoor dat we LSCs nog niet in de praktijk tegen komen, een normale Zonne cel is immers efficiënter. Echter, een dubbele of driedubbele junctie Zonne cel is nog veel efficiënter dan de standaard silicium zonnecellen die bij veel mensen op de daken liggen, hiervan zijn de kosten alleen zo hoog dat het bijna nooit rendabel is om deze te gebruiken. De implementatie in de praktijk blijft altijd een afweging tussen de kosten en de opbrengsten, de efficiëntie speelt uiteraard hierin mee maar is nooit de enige doorslag gevende factor.

Zo zien we in het onderzoek naar LSCs dat onderzoek zich enerzijds richt op het verhogen van de efficiëntie van LSCs en andere onderzoeken zich richten op toepassingen van LSCs waar de voordelen opwegen tegen de nadelen. Dit kwam ook terug in de workshop van 6 april, hieronder volgt een overzicht hiervan.

4.1 Efficiëntie verhogen

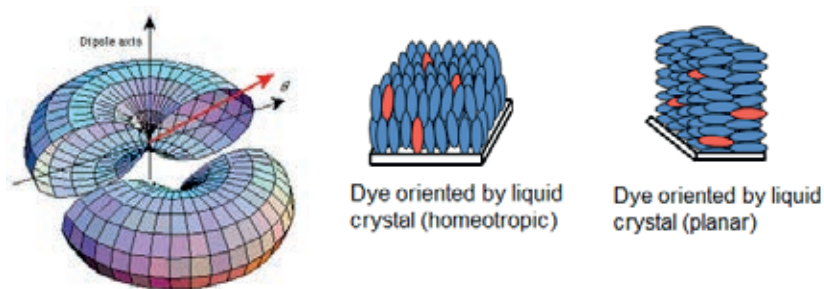
4.1.1 Dye alignment

Een van de onderzoekrichtingen om de efficiëntie te verbeteren maakt gebruik van het feit dat veel fluorescente organische kleurstoffen een voorkeurs richting vertonen in het absorberen en uitzenden van fotonen ten opzichte van de eigen oriëntatie (dichroïsme). Via het gebruik van vloeibare kristallen kan de oriëntatie van de fluorescente kleurstoffen worden gecontroleerd doordat deze zich inschikt en de oriëntatie van het vloeibaar kristal overneemt. Op deze manier kan de fluorescerende kleurstof bijvoorbeeld parallel aan of haaks op de waveguide worden georiënteerd.



Debijs april 2016

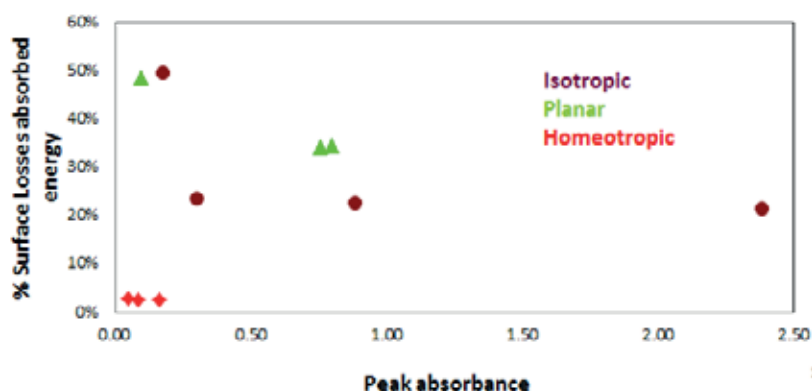
Figuur 5 Illustratie van vloeibaar kristal, in de mesofase kunnen deze stoffen wel stromen zoals vloeistoffen maar vertonen zij toch optische anisotropie, een eigenschap waarvoor een bepaalde mate van orde nodig is. Als in een specifieke fase een polymerisatie reactie wordt geïnitieerd blijft het materiaal hierna in deze fase gevangen.



Debijs april 2016

Figuur 6 Links drie dimensionale kans distributie van een fluorescente kleurstof welke dichroïsme vertoont, de kans op absorptie en emissie is minimaal als een foton parallel aan de langwerpige as van de kleurstof binnenkomt en maximaal als deze haaks binnenkomt. Rechts: dichroïsche kleurstoffen kunnen door middel van een vloeibaar kristallijne omgeving parallel of haaks op de waveguide worden uitgelijnd.

Uit experimenten is gebleken dat op deze manier de oppervlakte verliezen inderdaad zeer ver zijn terug te dringen maar dat daarmee ook de absorptie van de LSC sterk af neemt waardoor er op deze manier geen dramatisch verschil in efficiëntie is gerealiseerd. Wel komt dit de schaalbaarheid ten goede wanneer de quantum yield van de kleurstof goed genoeg is aangezien de, zichzelf via reabsorptie herhalende verliezen via de ontsnapingskegel, beperkt blijven.



Debijs april 2016

Figuur 7 De oppervlakte verliezen uitgezet tegen de optische absorptie voor diverse LSCs waarbij de gebruikte fluorescente kleurstoffen op drie manieren zijn georiënteerd, willekeurig, parallel aan de waveguide en haaks op de waveguide. Voor de haaks op de waveguide georiënteerde kleurstoffen zijn de oppervlakte verliezen bijna verdwenen maar wordt ook de excitatie sterk beperkt. Een homeotrope alignment laat zich dus goed combineren met een hoge transmissie, berekeningen laten zien dat voor een hoge efficiëntie een alignment ideaal zou zijn die in de plaats van homeotroop een lichte tilt heeft ten opzichte van loodrecht, dit is echter nog niet gerealiseerd in de praktijk.

Verder is duidelijk geworden uit dit onderzoek dat dichroïsme van fluorescente kleurstoffen ook van invloed is wanneer deze niet via vloeibaar kristal zijn georiënteerd omdat de initiële absorptie vooral via kleurstof moleculen zal plaats vinden die ongeveer parallel aan de waveguide georiënteerd zijn en reabsorptie in de waveguide relatief vaker zal plaats vinden via kleurstof moleculen die loodrecht op de waveguide zijn georiënteerd. Hierdoor vertonen de parallel georiënteerde en isotrope LSCs bij lage concentraties (en dus weinig kans op reabsorptie) relatief grote oppervlakte verliezen en dalen deze sterker met de concentratie voor isotrope LSCs omdat daar loodrecht georiënteerde kleurstoffen betrokken zijn bij de reabsorptie events.

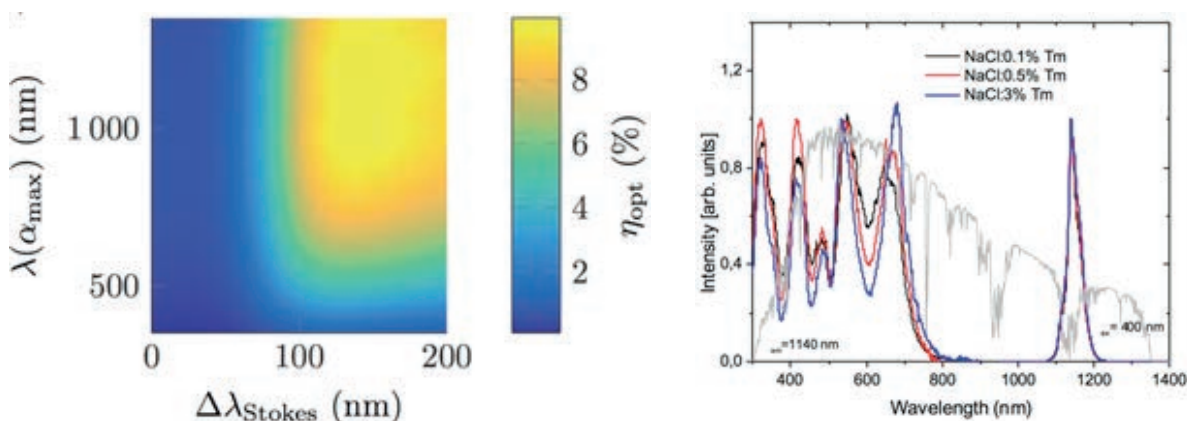
4.1.2 Selectieve reflectoren

Een methode om de efficiëntie van LSCs te verbeteren is door gebruik te maken van golflengte selectieve reflectoren, hoe deze worden gerealiseerd maakt daarbij niet veel uit, in het onderzoek van Debije worden hiervoor echter gepolymeriseerde chirale vloeibare kristallen gebruikt. Hiermee kunnen de oppervlakte verliezen worden terug gedrongen door de reflector zo te kiezen dat deze in het golflengte gebied van de emissie reflecteert. In het onderzoek van Debije werden deze reflectoren gerealiseerd via gepolymeriseerde chirale vloeibare kristallen (in dit geval zitten de fluorescente kleurstoffen dus niet in deze vloeibaar kristallen laag maar isotroop georiënteerd in een laag eronder).

4.1.3 Thulium gedoteerde halogeniden

In de plaats van de omgeving van de kleurstoffen aan te passen zodat de emissie gestuurd kan worden is een andere optie het aanpassen van de kleurstoffen zelf. De initiële oppervlakte verliezen zijn met 25% van het via fluorescentie uitgezonden licht vrij groot, echter als deze verliezen niet herhaald worden via reabsorptie kan toch een efficiënte LSC worden gerealiseerd. Merckx heeft via simulaties laten zien dat voor LSCs met een bruikbare afmeting de uiteindelijke efficiëntie vooral wordt bepaald door:

- De overlap van de absorptie met het Zonne spectrum omdat dit de hoeveelheid beschikbare energie bepaald.
- De Stokes shift omdat deze de hoeveelheid reabsorptie events bepaald.



Merkx April 2016

Figuur 8 Links de invloed van twee eigenschappen van fluorescente kleurstoffen die dominant zijn in het tot stand komen van de overall efficiëntie van een LSC van 1 bij 1 meter. Rechts het excitatie en emissie spectrum van aan de TUDelft ontwikkelde fluorescente kleurstoffen bestaande uit Thulium gedoteerde halogeniden (met op de achtergrond het AM1.5 Zonne spectrum).

Met deze eisen aan de fluorescente kleurstoffen als uitgangspunt is er aan de TUDelft een fluorescente coating ontwikkeld die deze eisen kan verenigen. Tevens is deze coating op glas aan te brengen via magnetron co-sputteren, een techniek verwant aan de processen waarmee in de glasindustrie lage emissiviteit en sommige antireflectie coatings worden aangebracht.

4.2 De lage efficiëntie afzetten tegen de voordelen

Buiten het onderzoek dat zich erop richt de fundamentele eigenschappen zo aan te passen dat er hogere efficiënties behaald kunnen worden zijn er ook projecten gaande binnen het toegepaste onderzoek waar de uitgangsgedachte is dat de lage efficiëntie niet in de weg hoeft te staan om deze techniek toe te passen, er is tenslotte ook niemand die triple junctie zonnecellen met een efficiëntie van 40+ procent op zijn dak legt, financieel zou dat namelijk een extreem slechte investering zijn.

LSCs zijn visueel aantrekkelijkere bouwdelen dan standaard Zonne panelen en de materialen die worden gebruikt om een LSC te maken zijn zo goedkoop dat deze maar weinig invloed hebben op de totale begroting van een bouwwerk. Tijdens de bijeenkomst van 8 april zijn de volgende projecten aan bod gekomen waarbij dit de insteek is.

4.2.1 Stroom leverende Mondriaan

Omdat LSCs veelal zeer selectief zijn in welk deel van het zonnenspectrum wordt omgezet zijn ze vaak ook fel gekleurd en gedeeltelijk transparant. Daarom lenen LSCs zich ook voor toepassingen waarbij het opwekken van elektriciteit via LSC tevens een esthetische toevoeging is in de plaats van afbreuk doet aan gebouwde objecten. Om aan te tonen dat het opwekken van Zonne energie er ook mooi uit kan zien is er aan de Universiteit van Utrecht een stroom leverende Mondriaan gemaakt.



Moraitis april 2016

Figuur 9 Links een foto van het originele werk van Mondriaan, rechts de stroom leverende Mondriaan gemaakt van LSCs.

4.2.2 Stroom opwekkende geluidswal

Een geluidswal is vanuit het oogpunt van de zonnecel niet de ideale locatie om zonnecellen te plaatsen. De oriëntatie is niet ideaal en er kan gemakkelijk schaduw op vallen van het verkeer of verkeersborden. De prijs van zonnecellen daalt echter gestaag waardoor bij nieuwe installaties een steeds groter deel van de kosten in de draagconstructie gaat zitten. Hierdoor wordt het steeds aantrekkelijker om zonnepanelen te integreren in bouwdelen. Voor LSCs werkt deze relatie nog veel sterker door. Bij de Solar Noise Barrier vormt het aluminium frame met PMMA platen de geluidsbarrière die toch al gebouwd moest worden de voornaamste kostenpost, de fluorescente kleurstof verwerkt in het PMMA, de pv-cellen aan de randen en de extra montagekosten zijn de enige meerkosten van een geluidswal die met een paar procent efficiëntie groene stroom levert tegenover een normale geluidswal. De gehele geluidswal vol leggen met silicium pv cellen is ook een optie. Het doel van dit project is echter uit te zoeken wat de beste optie is.



Slooff april 2016

Figuur 10 De praktijk test installatie in den Bosch van het Solar Noise barrier project waarin 4 verschillende optie worden getest. Onderaan zijn klassieke pv-cellen in de transparante behuizing verwerkt, daarboven dubbelzijdige pv-cellen, daarboven een gele LSC en daarboven een rode LSC.

Tijdens de bijeenkomst van 8 april waren de metingen nog bezig, het raytracing model was reeds gevalideerd maar de jaar rond opbrengst en economische analyse was nog niet beschikbaar.

4.3 LSC technologie op dit moment en inschatting van de potentie in de praktijk

Op dit moment ligt de record efficiëntie van LSCs op 7.1% (L. H. Slooff, 2008), het gaat hier echter om een klein formaat LSC die voornamelijk in de PAR regio absorbeert. Afhankelijk van de onderzochte kleurstoffen en de afmetingen worden er regelmatig artikelen gepubliceerd met LSC efficiënties variërend van ~0 tot 5% waar bij de publicaties waarin zeer inefficiënte systemen worden gerapporteerd het doel niet is om een zo efficiënt mogelijke LSC te maken maar de meer fundamentele aspecten zijn onderzoeken.

Proeven op grotere schaal zijn er op dit moment nog maar zeer weinig. Voor de Solar Noise Barrier zijn de jaar rond opbrengsten nog niet bekend maar in California heeft al een praktijk proef plaats gevonden waarbij een kas is uitgerust met diverse types permanente luminescente Zonne collectoren (geactiveerd met het zelfde type kleurstof als de Solar Noise Barrier, absorptie/emissie spectrum in Figuur 15) waarbij ~ 57 kWh/m² per jaar opgewekt kon worden met de meest efficiënte LSC configuratie (C. Corrado, 2016). Hierbij moeten echter een aantal kant tekeningen worden geplaatst: ten eerste natuurlijk dat California bijna 2 maal zoveel zon heeft als Nederland en ten tweede dat er in de plaats van alleen pv strips aan de zijdes van de ruiten hier ook dunne pv-strips zijn aangebracht in patronen over de gehele glasplaat om reabsorptie verliezen te beperken. Verder wordt er in de studie beweerd dat het gebruik van deze LSCs een neutraal tot positief effect had in de gewas studies (de publicaties daarover werd op het moment van schrijven nog gewerkt), deze studie zelf (C. Corrado, 2016) werd pas op 18 juli 2016 gepubliceerd, er kan daarom op dit moment van schrijven ook nog niet worden ingeschat in hoeverre de gewasgroei in die studies is geoptimaliseerd in de referentie situatie en of het hier om schaduw of vruchtgroente gewassen gaat.

Uiteindelijk zal de elektriciteit opbrengst zeer sterk afhangen van het gewas wat onder een LSC kasdek gekweekt gaat worden en is juist het voordeel van LSCs dat de eigenschappen van de LSC op de vraag van het gewas afgestemd kan worden.

5 Twee aantrekkelijke opties om LSCs in te passen in de glastuinbouw

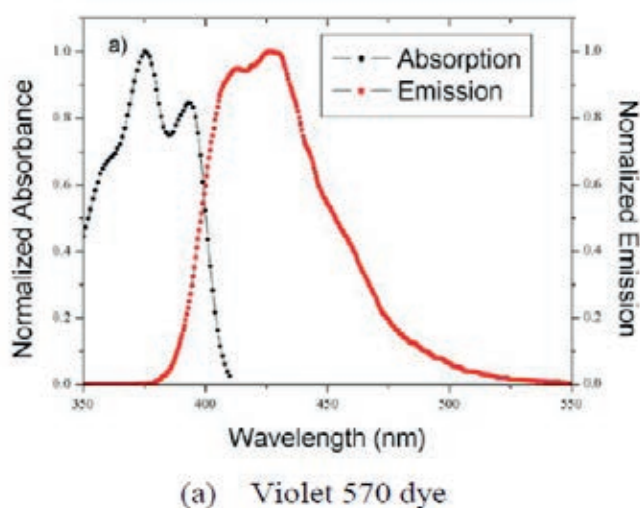
Zoals in hoofdstuk 2 al duidelijk was geworden zijn er een aantal mogelijkheden waarop LSC in de tuinbouw toegepast zouden kunnen worden als deze de juiste optische respons hebben. Voor de opties die hieronder worden beschreven ligt de basis kennis al klaar en zou het met de juiste ontwikkeling effort mogelijk moeten zijn om binnen ~5 jaar een prototype kas te demonstreren.

Nabij infrarood licht zal ondanks dat het een groot energetisch aandeel heeft binnen het Zonne spectrum dus buiten beschouwing worden gelaten. De NIR fluorescente kleurstoffen die in de literatuur worden beschreven lenen zich niet voor toepassing in LSCs omdat deze voor zover bekend bij de deelnemers aan de workshop altijd een beperkte efficiëntie en Stokes shift laten zien, het zou uiteraard zeer welkom zijn als er binnen de Topsector Chemie fundamenteel onderzoek op dit gebied zou worden gestimuleerd.

5.1 UV straling benutten.

UV straling heeft weliswaar sturende effecten op de morfologie van een gewas maar er is geen reden om aan te nemen dat het benutten van de UV straling voor andere doeleindes problemen oplevert voor de gewas groei. Het energetische aandeel van UV straling in het Zonne spectrum is met ~5% uiteraard beperkt en zal qua opbrengst (additioneel PAR licht of elektriciteit) dus ook altijd onder de 5% liggen. In de volgende paragraaf worden een aantal fluorescente kleurstoffen uit de literatuur opgesomd samen met eventueel beschikbare informatie over deze kleurstoffen. Deze opsomming zal zeer zeker niet uitputtend zijn maar dient meer om een aantal voorbeelden te geven van kleurstoffen die qua spectrale omzetting interessant kunnen zijn voor de glastuinbouw. Er is vaak weinig of geen informatie beschikbaar over de stabiliteit, verwerkbaarheid of eventuele toxicologie.

5.1.1 Lumogen-F violet 570

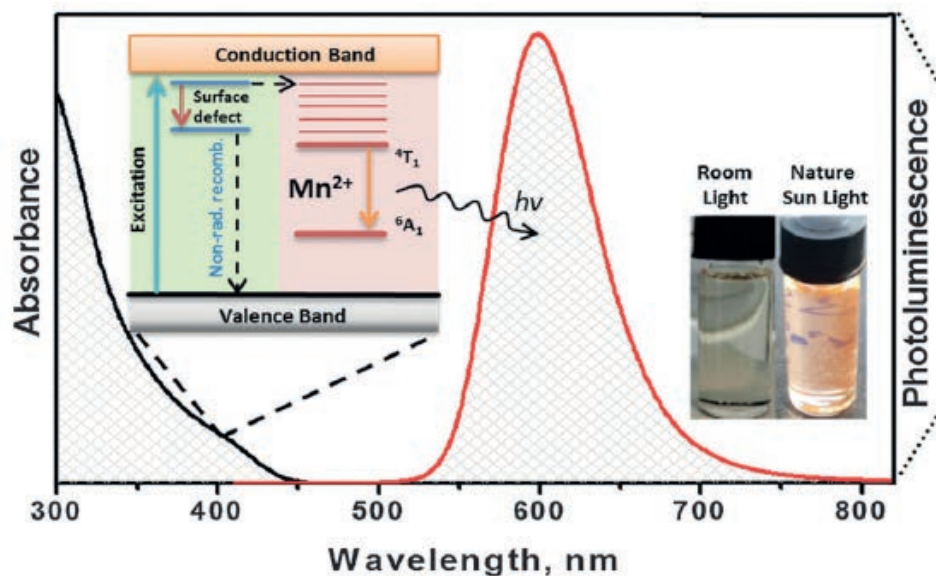


Figuur 11 Absorptie en emissie spectrum van Lumogen-F violet 570 (Hind A. Ahmed, 2013).

Luminescent quantum yield in Ethylene Vinyl acetate: ~100 % (Efthymios Klampaftis, 2012)

Luminescent quantum yield in Toluene: 100 ± 8 % (Hind A. Ahmed, 2013)

5.1.2 Mangan²⁺gedoteerde Zink/Cadmium/Zwavel quantum dots

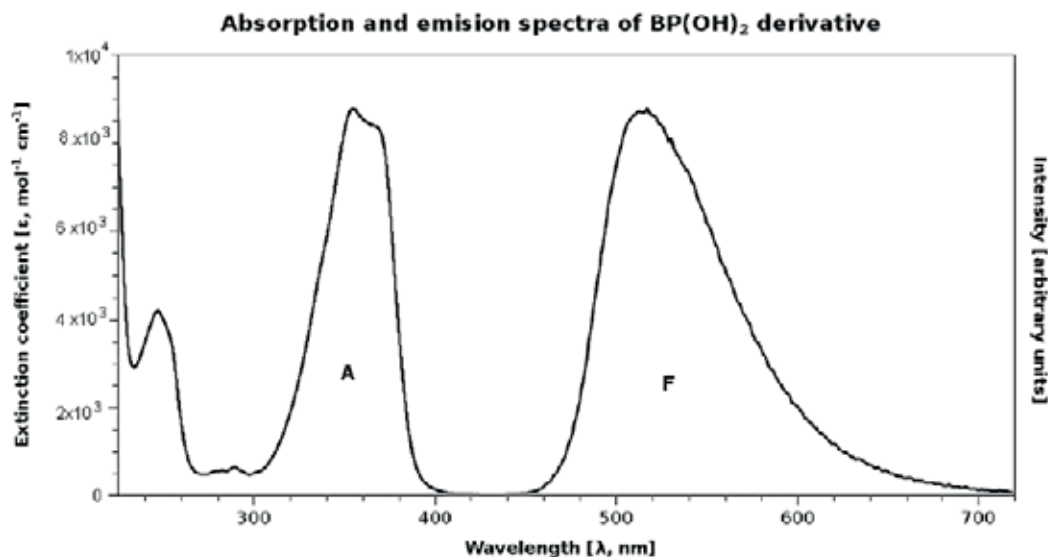


Figuur 12 Absorptie en emissie spectrum van Mn^{2+} gedoteerde ZnCdS/ZnS quantum dots. (I. Levchuk, 2016).

Luminescent quantum yield in toluene: 70% (I. Levchuk, 2016)

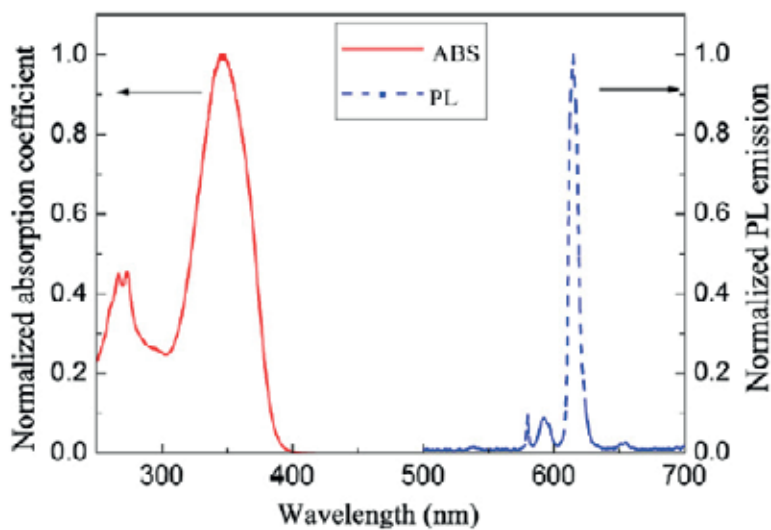
Voor Mn^{2+} gedoteerde Zink/Seleen quantum dots welke vrij zijn van giftige zware metalen wordt op de website van NNCrystal een quantum yield van 60% gerapporteerd zonder vermelding van het oplosmiddel (NN-Crystal)

5.1.3 diheptyl-bipyridyl-diol



Figuur 13 Fluorescente kleurstof DH-BP(OH)_2 met een gerapporteerde quantum yield in hexaan van $27 \pm 2\%$. (T. Saraidarov, 2010).

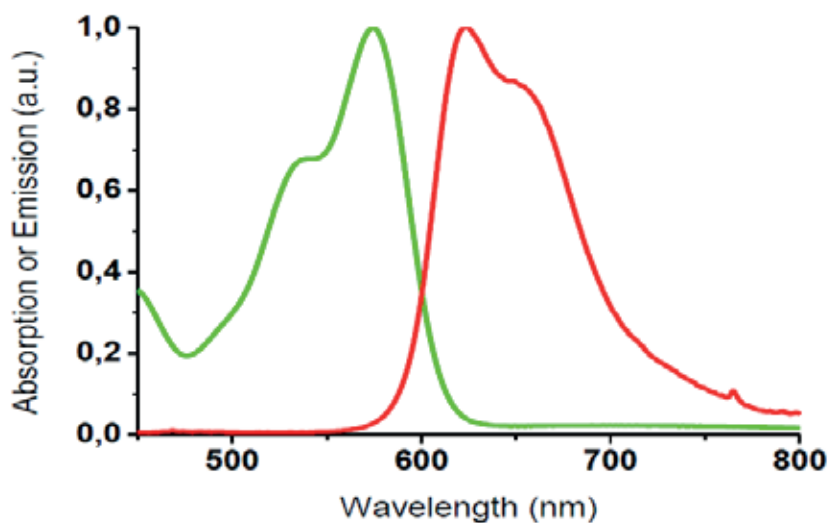
5.1.4 $\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{TPPO})_2$



Figuur 14 Fluorescent Europium complex $\text{Eu}(\text{TTA})_3(\text{TPPO})_2$ met een gerapporteerde quantum yield van 73%. (Tongxin Wang, 2011).

5.2 Verwijderbare fluorescente coating actief in het PAR als stroom opwekkend alternatief voor krijten

Een kleurstof die in de praktijk al veel voor LSCs is gebruikt is Lumogen-F red 305, deze kleurstof zit verwerkt in de Solar Noise Barrier en in de rode delen van de stroom leverende Mondriaan. De reden daarvoor is de hoge quantum yield, goede Stokes shift, een goed onderzochte en bewezen stabiliteit en commerciële beschikbaarheid. Deze kleurstof absorbeert tevens een – voor een fluorescente kleurstof - vrij breed deel van het spectrum. Op het eerste gezicht is deze kleurstof daarom juist minder geschikt voor de tuinbouw aangezien deze in de PAR regio absorbeert, voor schaduw gewassen zou deze kleurstof echter toegepast kunnen worden in verwijderbare coatings voor tijdens de zomer maanden. Hiermee zou lichtverlies tijdens de wintermaanden worden voorkomen, wel moet dan worden uitgezocht of de kleurstof bij het verwijderen van de coating van het kasdek opgevangen of gezuiverd kan worden, bijvoorbeeld met behulp van de mobiele zuiveringsinstallaties die momenteel worden ontwikkeld voor het verwijderen van gewasbeschermingsmiddelen uit het looswater.



Figuur 15 Absorptie en emissie van Lumogen-F Red 305 (Paul P. C. Verbunt, 2012).

6 Roadmap naar implementatie

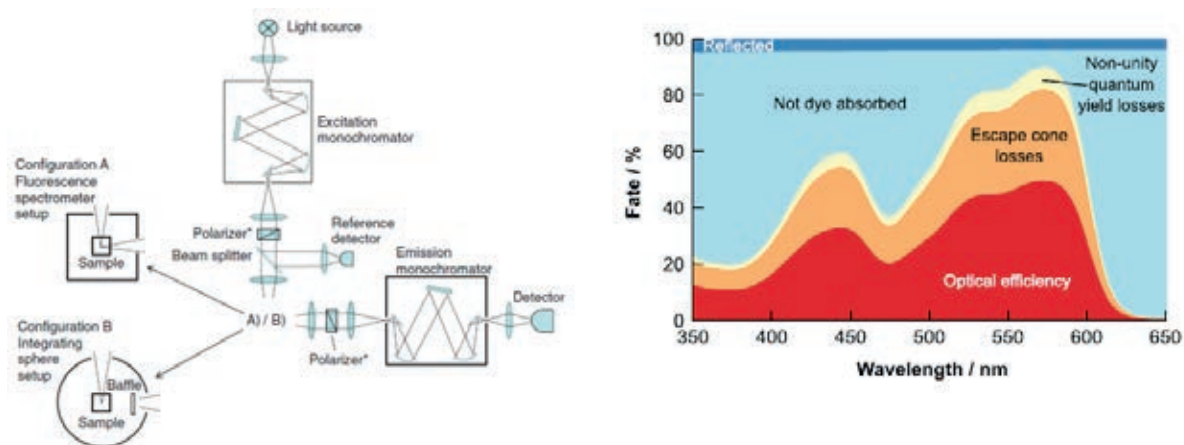
6.1 Reken modellen

Er zijn momenteel meerdere rekenmethodes ontwikkeld op de TU/e, TU Delft, Universiteit Utrecht en ECN die worden gebruikt om voorspellingen te doen over wat de uiteindelijke opbrengsten van LSCs zullen zijn zodra deze zijn opgeschaald. In de verschillende methodes wordt het effect van verschillende verlies mechanismes uitgerekend maar de verschillende methodes houden rekening met verschillende mechanismes, zo houdt de rekenmethode van de TU/e als enige rekening met het dichroïsme van sommige kleurstoffen en wordt op dit moment bij de methode die wordt toegepast in Delft nog geen rekening gehouden met de waveguide absorptie.

Of deze methodes tot dezelfde voorspellingen leiden is niet bekend maar er zal tot een rekenmethode gekomen moeten worden waar iedereen het mee eens is. Bij voorkeur zal het gebruik van deze methode op ten duur als service aangeboden worden door een onderzoeksinstituten samen met de metingen die nodig zijn als input voor deze methode zodat de industrie de door hun ontwikkelde materialen kan vergelijken.

6.2 Meet methodes

Accuraat meten aan fluorescente materialen is zeer lastig, zeker wanneer men bijvoorbeeld de absolute quantum yield wil bepalen, hierover is dan ook zo recent als 2013 nog een protocol over gepubliceerd in Nature (Christian Würth, 2013). Omdat het excitatie licht en de fluorescente emissie onderscheiden moet kunnen worden is er voor een correcte uitvoering een integrerende bol nodig met zowel een monochromator voor de lichtbron als een monochromator voor de sensor in combinatie met diverse fluorescente standaarden. (Christian Würth, 2013) Een andere optie is het gebruik van een absoluut gekalibreerde lichtbron en fotodiode array in combinatie met een integrerende bol.



Figuur 16 Links de benodigde meetopstelling voor het absoluut karakteriseren van fluorescente kleurstoffen (Christian Würth, 2013). Rechts een voorbeeld van het inzicht dat wordt verschaft door metingen in een dergelijke opstelling beschreven in: (C. Tummeltshammer, 2016)

Deze data geven duidelijk inzicht in de verliezen in een LSC en de optische efficiëntie van het materiaal. Omdat het hier niet om een standaard meet instrument gaat maar de industrie wel deze gegevens nodig zal hebben voor het ontwikkelen van LSCs voor de glastuinbouw is het van belang dat deze metingen door een instituut als service wordt aangeboden zodat kleine bedrijven niet worden uitgesloten van deze ontwikkelingen.

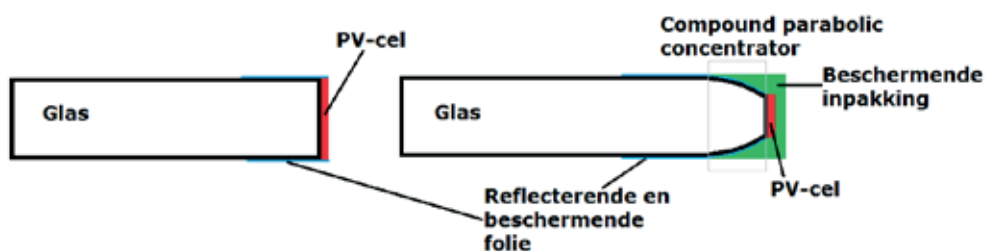
6.3 Constructie

Aan de kas constructie moet niet per se veel worden aangepast behalve dat het gebruikte glas uitgerust moet zijn met pv-cellen aan de randen en de elektrische bekabeling gefaciliteerd moet worden. Aangezien het glas niet meer voor diffusie gebruikt kan worden zal dit zo gewenst op een andere manier gerealiseerd moeten worden, bijvoorbeeld met een folie of verticale lamelle.

6.4 Glas

Om de waveguide absorptie verliezen zo veel mogelijk te beperken moet er glas gekozen worden met een zo laag mogelijke absorptie, dus met een extreem laag ijzer gehalte, op dit punt zal de markt verkend moeten worden om zo het meest geschikte basis materiaal te vinden en glasproducenten moeten op de hoogte worden gebracht van de behoefte aan glas met een nog lager ijzer gehalte aangezien het voor veel toepassingen niet zinvol is om hun best presterende glas verder te verbeteren.

Over het algemeen worden de randen van glasplaten afgewerkt via de norm EN12150. Het subtype 'polished edge' binnen deze norm zou bruikbaar kunnen zijn om het glas te gebruiken voor LSCs, het zou mogelijk zo kunnen zijn dat de scherpe hoek van 90 graden een zwak punt vormt voor een gehard glas, ook laat dit weinig ruimte over om de pv-cellen te beschermen. Een betere optie zou zijn de rand zo te slijpen dat deze de vorm krijgt van een compound parabolische collector met een acceptatie hoek van $\sim 50^\circ$. (B. D. Markman, 2012) Op deze manier is een minder scherpe hoek nodig en is er ruimte over voor een beschermende inpakking van de pv-cellen.



Figuur 17 Illustratie van 2 opties voor de montage van pv-cellen aan de randen van de glazen waveguide.

De blauw weergegeven reflecterende folie dient tevens als bescherming tegen vervuiling. Omdat de buitenste ~ 2 cm van ruiten worden gebruikt voor de montage zijn deze zeer gevoelig voor vervuiling, zolang deze vervuiling aan de buitenkant van een reflecterende folie plaats vindt zal dit geen probleem vormen voor de werking van de LSC.



Figuur 18 Foto van de rand van een ruit die een aantal jaren op een kas heeft gelegen, de regio die is gebruikt voor de montage vertoont de gebruikelijke vervuiling voor ruiten die zijn gebruikt in de praktijk.

6.5 Fotovoltaïsche cellen

Voor de fotovoltaïsche cellen aan de randen van LSCs zijn veel opties beschikbaar, welke van deze opties het meest geschikt is moet nog onderzocht worden en is waarschijnlijk afhankelijk van het type LSC dat wordt gekozen. De best presterende pv-cellen met een enkele pn-junctie zijn momenteel de Galium Arsenide cellen met een band gap energie van $\sim 870\text{nm}$. Een andere goede optie zouden interdigitated back contacted silicium pv-cellen zijn aangezien bij deze cellen alle stroom via de achterzijde wordt afgevoerd waardoor er aan de voorzijde geen schaduwwerking is van elektrische contacten en de weerstand van de transparante geleider aan de voorzijde ook geen belemmering vormt voor de relatief grote hoeveelheid stroom die in een klein oppervlak wordt gegenereerd in een LSC. Voor het gebruik in LSCs zouden CIGS pv-cellen ook positief uit kunnen pakken omdat bij deze cellen de band gap energie gevarieerd kan worden via de verhouding Indium/Gallium die gekozen wordt tijdens de productie, hierdoor kan de band gap afgesteld worden op de emissie van de gebruikte LSC.

6.6 Fluorescente kleurstoffen: levensduur, efficiëntie en spectrale response

Het zal duidelijk zijn dat een luminescente Zonne collector valt of staat met de eigenschappen van de fluorescente kleurstoffen waarmee deze wordt vervaardigd. Het is echter zo dat belangrijke eigenschappen zoals de levensduur, de efficiëntie en zelfs de spectrale response niet volledig inherente eigenschappen zijn van de kleurstofmoleculen. De levensduur wordt vaak sterk beïnvloed door de omgeving, zo kunnen niet gereageerde polymeer uiteinden en initiators de levensduur nadelig beïnvloeden net zoals de doorlatendheid voor zuurstof en water hierop invloed kunnen hebben. De efficiëntie kan ook beïnvloed worden door de omgeving door emissie loze relaxatie paden via de omgeving te introduceren of de omgeving kan juist de efficiëntie ten goede komen doordat deze de bewegingsvrijheid van de kleurstof beperkt waardoor er emissie loze relaxatie paden van de kleurstof zelf worden beperkt. (Riccardo Turrisi, 2015) De spectrale response van een kleurstof kan beïnvloed worden door de polariteit en de brekingsindex van de directe omgeving. Hier ligt dus een uitdaging voor onderzoekers en industrie om samenstellingen van coatings en folies te formuleren met efficiënte fluorescentie en een goede levensduur (minimaal 1 jaar voor toepassing in verwijderbare coatings of minimaal 15 jaar voor permanent actieve LSCs).

7 Discussie en conclusie

Het zal nog een tijd duren voordat een tuinder in Nederland die een nieuwe kas gaat bouwen moet afwegen of het een goed idee is om deze te bedekken met luminescente Zonne collectoren. Over het algemeen wordt gesteld dat de kosten voor het toepassen van LSCs laag uit zullen pakken omdat de fluorescerende coating niet veel duurder hoeft te zijn dan ieder ander type gekleurd folie, er maar een zeer klein oppervlak aan pv-cellen nodig is en er qua draag constructie mee gelift kan worden op de constructie die toch al wordt gebouwd. Echter is er op dit moment niemand die concreet kan vertellen hoe duur het nu echt zou zijn om een kas te bouwen met LSCs als kasdek materiaal, hoeveel stroom deze zal leveren en ook niet hoe dit de gewas groei zou beïnvloeden.

In meer zonnrijke gebieden is het op dit moment al wel een serieuze optie om een kasdek te installeren met de LSC panelen van Soliculture. Waarschijnlijk zijn deze permanente LSCs die actief zijn in het PAR gebied voor Nederland niet rendabel (Alers), hoewel ook dit niet zeker is.

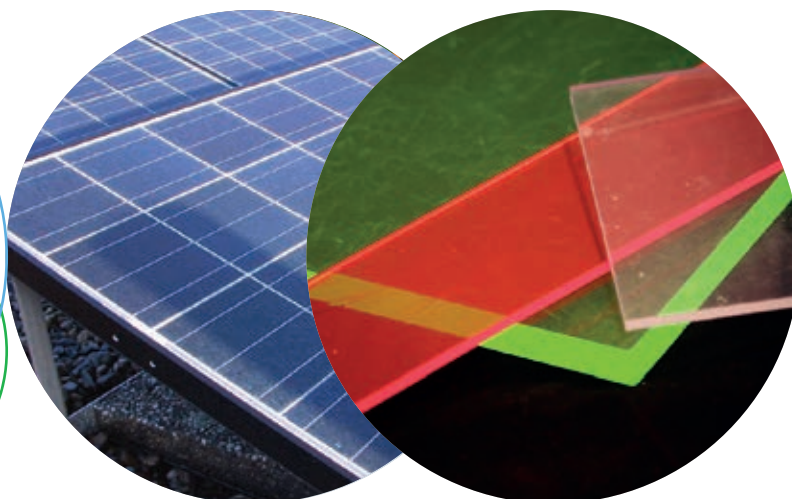
Om duidelijkheid te creëren over de mogelijkheden van LSCs zal eerst op fundamenteel niveau LSC concepten ontwikkeld moeten worden die voldoen aan de randvoorwaardes van de glastuinbouw hier in Nederland. Daarna zullen er desk studies samen met materiaal karakterisaties uitgevoerd moeten worden waaruit moet blijken wat de mogelijke opbrengsten zijn voor een aantal LSC concepten die aan deze randvoorwaardes voldoen. Hieruit moet ook duidelijk worden waar de meest invloedrijke materiaalkundige verbeterpunten liggen, welke duidelijk naar de leveranciers gecommuniceerd moeten worden.

Ook zal samen met de toeleverende industrie (chemie, pv, glas en montage bedrijven) de kosten in kaart gebracht moeten worden om zo een aantal business cases op te kunnen stellen waarna eventueel een demonstratie kas gebouwd kan worden waarin de compatibiliteit met de teelt en energie opbrengst gevalideerd moet worden.

Literatuur

- Alers, G. (n.d.).
personal communication .
- B. D. Markman, R. R. (2012).
Nonimaging optics in luminescent solar concentration. *OPTICS EXPRESS*, 622-629.
- C. Corrado, S. W. (2016).
Power generation study of luminescent solar concentrator greenhouse. *J. Renewable Sustainable Energy*, 8(4).
- C. Tummeltshammer, A. T. (2016).
Losses in luminescent solar concentrators unveiled. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 40-47.
- Christian Würth, M. G.-G. (2013).
Relative and absolute determination of fluorescence quantum yields of transparent samples. *Nature protocols*, 1535 - 1550.
- Efthymios Klampaftis, D. R. (2012).
Increase in short-wavelength response of encapsulated CIGS devices by doping the encapsulation layer with luminescent material. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62-67.
- Hind A. Ahmed, J. W. (2013).
Enhancement in solar cell efficiency by luminescent down-shifting layers. *Advances in Energy Research*, 117-126.
- I. Levchuk, C. W.-G. (2016).
Industrially scalable and cost-effective Mn²⁺ doped ZnxCd_{1-x}S/ZnS nanocrystals with 70% photoluminescence quantum yield, as efficient down-shifting materials in photovoltaics. *Royal Society of Chemistry*.
- L. H. Slooff, E. E. (2008).
A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency. *phys. stat. sol. (RRL)* 2, 257-259.
- Lakowicz, J. R. (2006).
PRINCIPLES OF FLUORESCENCE SPECTROSCOPY. In J. R. Lakowicz, *PRINCIPLES OF FLUORESCENCE SPECTROSCOPY* (pp. 205-235). Springer.
- NN-Crystal. (n.d.).
Manganese Doped Zinc Selenide Quantum Dots (DD) - NN-Labs. Retrieved June 15, 2016, from nn-labs: <http://www.nn-labs.com/product-catalog/d-dots/>
- Paul P. C. Verbunt, S. T.-W. (2012).
Increased efficiency of luminescent solar concentrators after application of organic wavelength selective mirrors. *OPTICS EXPRESS*, 655-668.
- Riccardo Turrisi, A. S. (2015).
Stokes shift/emission efficiency trade-off in donor-acceptor perylenemonoimides for luminescent solar concentrators. *J. Mater. Chem. A*, 8045-8054.
- T. Saraidarov, V. L. (2010).
Non-self-absorbing materials for Luminescent Solar Concentrators (LSC). *Chemical Physics Letters*, 60-62.
- Tongxin Wang, J. Z. (2011).
Luminescent solar concentrator employing rare earth complex with zero self-absorption loss. *Solar Energy*, 2571-2579.
- Yimu Zhao, G. A. (2014).
Near-Infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators. *Adv. Optical Mater.*, 606-611.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen UR Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wageningenur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport GTB-1409

Wageningen UR Glastuinbouw initieert en stimuleert de ontwikkeling van innovaties gericht op een duurzame glastuinbouw en de kwaliteit van leven. Dat doen wij door toepassingsgericht onderzoek, samen met partners uit de glastuinbouw, toeleverende industrie, veredeling, wetenschap en de overheid.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.