

## Kas met geïntegreerde omzetting van warmtestraling naar elektrische energie (Elektriciteits Leverende Kas, ELKAS).

Sonneveld, P. J., G.L.A.M. Swinkels, G.P.A. Bot

Wageningen UR, Plant Research International B.V.(former IMAG), P.O. Box 16, 6700 AA Wageningen, The Netherlands,  
email: [piet.sonneveld@wur.nl](mailto:piet.sonneveld@wur.nl)

**SAMENVATTING:** PRI is een nieuwe ontwikkeling gestart in een tweede generatie energieleverende kassen. Doel van dit project is een technologie te ontwikkelen die het warmtegedeelte van de zonne-energie omzet in hoogwaardige elektrische en thermische energie. De warmtestraling wordt gereflecteerd met een speciale NIR reflecterende folie met een hoge doorlaat voor zichtbaar licht en in het bijzonder voor PAR. Deze folie reflecteert meer dan 45% nabij infrarode straling (NIR). Omdat hierdoor aanzienlijk minder warmte in de kas komt kan de kas meer gesloten blijven zonder een hoge koelbelasting. Het meer gesloten houden van de kas resulteert in een hogere CO<sub>2</sub> concentratie bij een beperkte CO<sub>2</sub> dosering, waardoor de groei en opbrengst toeneemt.

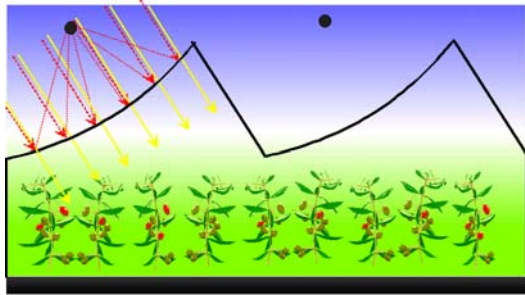
Deze gereflecteerde straling wordt omgezet in elektrische energie met fotovoltaïsche cellen (PV cellen). De NIR reflecterende folie wordt in een paraboolvorm aangebracht waardoor de NIR straling gefocuseerd wordt en is er maar een gering oppervlak aan PV cellen nodig. Hierdoor blijft de lichttransmissie hoog en zijn de kosten beperkt.

De optimale vorm van de reflecterende folie voor een maximale energieopbrengst is bepaald met een zogenaamd Ray tracing computer programma. De PV cellen die in het focus punt gemonteerd worden vereisen extra koeling door de hoge warmtelast van de geconcentreerde straling (concentratie factor van 40x). Deze warmte kan eventueel gebruikt worden voor opslag in een aquifer of warmtebuffer. De eigenschappen van verschillende zonnecel materialen zijn onderzocht voor deze toepassing. Al de onderdelen zoals hiervoor genoemd worden geïntegreerd in een nieuw type kas van ongeveer 75 m<sup>2</sup> op het PRI terrein.

### 1 INLEIDING

In de noordelijke landen, met een kouder winter klimaat is, mede door de stijgende energie prijzen energiebesparing een belangrijk onderwerp. Dit terwijl in kassen in de zomer extra koeling noodzakelijk is en doormiddel van natuurlijke ventilatie het energie overschot in de vorm van warme lucht verwijderd wordt. In zuidelijkere landen met hogere stralingsbelasting en hogere temperaturen gedurende de zomer is de koeling

Fig. 1 ELKAS met een warmte reflecterende en licht transparante folie in een parabolische vorm (----) en een collector (PV cellen) in het focuspunt (—▶) zichtbaar licht of PAR, (—▶) warmte straling



Van de kassen nog belangrijker [1]. Met dit nieuwe kastype kan koeling worden gecombineerd met energieopwekking. Bij de eerste ontwikkelingen werden lineaire Fresnell lenzen gebruikt zoals beschreven door Jirka et al. [2] en Tripanagnostopoulos et al. [3]. Fraas et al. [4] gebruikt een verlichtingsysteem met glas vezels. Een schematische opzet van het nieuwe PRI ontwerp met de selectieve folie is weergegeven in Fig. 1. Het voordeel van dit ontwerp is een zeer gelijkmatige en hoge verlichtingssterkte in de kas. Het basis idee bestaat uit een licht transparant en warmte reflecterende folie in een parabolische of cirkelvormige vorm waardoor warmtestraling wordt geconcentreerd. Ten eerste zal dit

de hoge warmte belasting gedurende warme zomerse dagen sterk verminderen. Ten tweede kan de geconcentreerde stralingsenergie omgezet worden in elektrische energie. Met een Ray tracing computer programma is de speciale vorm van de reflector geoptimaliseerd voor een maximale energie opbrengst en een lage lichtonderschepping. De PV cellen die in het focuspunt van de gereflecteerde straling gemonteerd zijn hebben enige koeling nodig door de hoge warmte belasting door de concentratie factor van ongeveer 40. De eigenschappen van verschillende zonnecel materialen namelijk Germanium (Ge), Gallium-Antimoon (GaSb) and Silicium (Si) cellen zijn onderzocht voor deze toepassing.

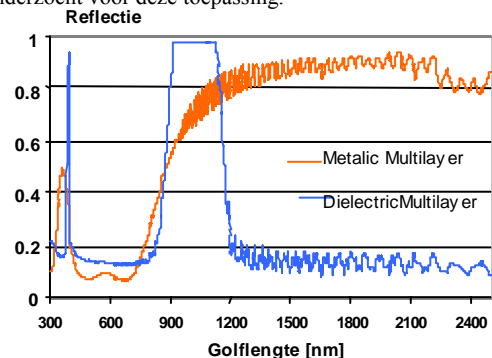


Fig. 2 Reflectie of spectraal selectief reflecterend metaal and kunststof multilaags folie

### 2 METHODE EN RESULTATEN

#### 2.1 Scheiding van PAR en NIR straling

In dit en voorgaande projecten zijn een groot aantal materialen onderzocht wat betreft the lichttransmissie en de reflectie van warmte straling. Twee materialen werden geselecteerd met goede eigenschappen: een

multilaags folie op basis van dunne metaallagen en een op basis van kunststof folie. De transmissie en reflectie eigenschappen van deze folies zijn weergegeven in Fig. 3. De multilaagsfolie op basis van kunststoffen toont een zeer goede transmissie in het PAR gebied (ca. 85%) en een goede reflectie voor een beperkt NIR gebied van 900-1200 nm. The metallische multilaags folie heeft een wat lagere transmissie (ca. 70%) en een goede reflectie voor het gehele NIR gebied van 900-2500 nm. Voor tuinbouw toepassingen heeft PRI een speciale reflecterende folie ontworpen die een hoge PAR transmissie combineert met een hoge NIR reflectie. De reflectie curve van dit nieuwe ontwerp is weergegeven in Fig. 3. Deze folie heeft een NIR reflectie van 97 % in het gebied van 750-1800 nm in combinatie met een PAR reflectie (gebied 400-700nm) van slechts ca. 7. Resultaten van de klimaat effecten in een kas met deze NIR reflecterende folie is gegeven door bHemming et al. [5] en Sonneveld et al. [6].

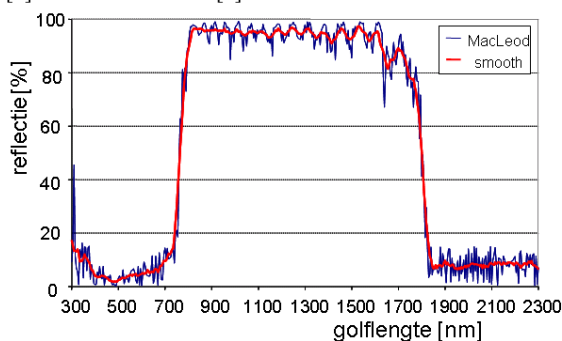


Fig. 3 Reflectie van een nieuw ontwerp spectrale multilaags folie.

## 2.2 Concentratie van warmtestraling met een licht-doorlatende folie.

Met het ray tracing computer programma (Raypro) is het optimale geometrische ontwerp en de opbrengst van de reflector ontworpen. In het bijzonder is de invloed op de opbrengst onderzocht van een ontwerp met parabolische of een cirkelvormige trog reflector. In Fig. 4 and 5 zijn de verschillende varianten van de parabolische en cilindervormige trog reflectoren weergegeven. Voor de parabolische trog reflector van Fig. 4, zal de gehele reflector met collector moeten meebewegen met de elevatie van the zon. Een voordeel van een parabolische trog reflector is wel de hoge concentratie factor waardoor het oppervlak van de zonnecellen klein kan blijven.



Fig. 4 Parabolische reflectoren draaiend in de Oost-West richting.

Met de cirkelvormige geometrie van Fig. 5 kan de reflector vaststaan en is alleen de plaats van het brandpunt afhankelijk van de elevatiehoek van de zonnestraling. Het brandpunt beweegt afhankelijk van de positie van de zon volgens een cirkel ongeveer met een

straal die de heft is van de straal van de reflector. Een voordeel van de cirkelvormige trog concept is naast de vaststaande reflector de relatief eenvoudige regeling, omdat de beweging van het brandpunt in één richting plaatsvindt. Een nadeel is de beperkte concentratie factor. In Fig. 6 is de opbrengst van deze concentrator weergegeven bij een hoek van inval van  $0^\circ$  en  $20^\circ$ . Bij de grotere invalshoek van  $20^\circ$  daalt de concentratie factor naar ongeveer 40 waarbij de opbrengst nog redelijk behouden blijft.

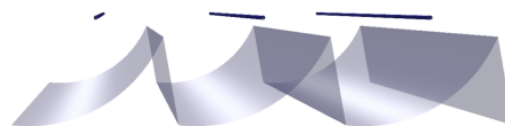


Fig. 5 Cirkelvormige trog reflectors georiënteerd in de Noord-Zuid richting

Met Raypro, het ray tracing programma, is de totale hoeveelheid energie die een silicium zonnecel in het brandpunt levert berekend met de klimaat data van een heldere dag op 25 Juni in Nederland (De Bilt). Het rendement van deze zonnecel is bepaald op 15 % voor het NIR gebied. Het resultaat van deze berekeningen met silicium cellen is weergegeven in Fig. 7 voor de twee verschillende ontwerp gevallen van Fig. 4 and 5.

Fig. 6 Opbrengst van een cilindrische trog reflector als functie van de concentratie factor en de vormfactor voor een hoek van inval van  $0^\circ$  en  $20^\circ$ . De vormfactor is gedefinieerd als: straal van de cilinder gedeeld door de afstand van de koorde

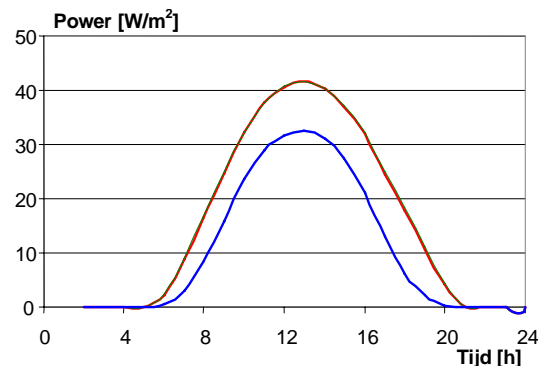


Fig. 7 Berekende resultaten van het elektrische vermogen op een heldere dag 25 Juni in Nederland (De Bilt) met een Silicium PV cellen in het brandpunt van een: (—) Parabolische trog reflector met Noord-Zuid oriëntatie, (—) Parabolische trog reflector met Oost-West oriëntatie en (—) Cilindrische trog reflector met Oost-West oriëntatie.

In Tabel 1, is de karakteristieke energieopbrengst per  $m^2$  weergegeven voor een heldere dag (25 juni) in Nederland voor de twee ontwerpen. De invallende globale straling in de kas is  $3480 \text{ MJ/m}^2$  (Tr VIS/NIR). Van de opgenomen energie (Abs VIS/NIR) is de hoeveelheid omgezette elektrische energie per  $m^2$  kasoppervlak (Elec) berekend. Door de concentratie factor van ongeveer 40,

is het oppervlak van de PV cellen een stuk kleiner dan bij normale silicium PV systemen. De zonnecellen moeten actief gekoeld worden met lucht of water zoals beschreven door Zondag et al.[8].

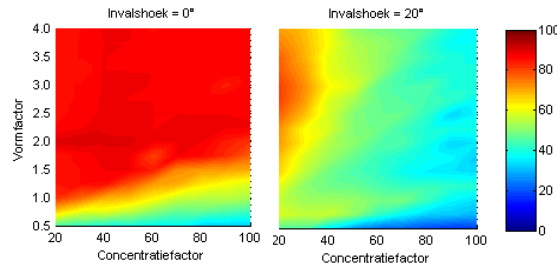


Figure 8. Opbrengst voor een cilindervormige concentrator als een functie van de concentratie en vorm factor voor een invalshoek van  $0^\circ$  en  $20^\circ$ . De vorm factor is gedefinieerd als: straal van de cilinder gedeeld door de koord afstand.

Tabel 1 Overzicht van het dagelijks opgewekte maximaal vermogen en energie opbrengst van de ELKAS.  
\*) Heldere dag 25 Juni in Nederland (De Bilt).

Systeem	Dagelijkse energie opbrengst*		
	Piek vermogen* [W/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[KWh/m <sup>2</sup> ]
Globale straling	925	31	8,6
Referentie PV	138	4,6	1,3
Parabolische reflector in O-W	41,7	1,3	0,4
Parabolische reflector in N-Z	41,7	1,4	0,4
Cilindrische reflector in O-W	32,7	0,9	0,3

### 2.3 Omzetting van de NIR warmtestraling naar elektrische energie met PV cellen.

Voor de omzetting van de NIR warmtestraling naar elektrische energie kunnen PV cellen gebruikt worden. De eigenschappen van verschillende cellen, Germanium (Ge), Gallium-Antmoon (GaSb), Koper-Indium-Sulfide (CIS) en Silicium (Si) cellen zijn onderzocht.

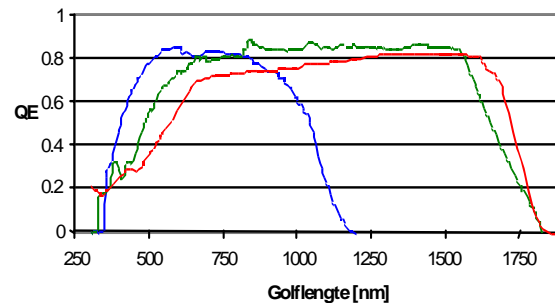


Fig. 8 Quantum rendement van Ge-cellen (—),GaSb cellen (—) and Si-cellen (—).

In Fig. 8 is het kwantum rendement (QE) van Ge, GaSb and Si cellen weergegeven. Het kwantum rendement van de Ge and Si (multi crystallijn) cellen was gemeten door IMEC in Leuven. Voor de GaSb cellen was het kwantum rendement verkregen uit een publicatie van Schlegl et al. [9] en voor het CIS materiaal was de data van de ZSW instituut in Stuttgart (tabel 2). Van deze data was de maximale stroom  $I_{sc}$  berekend. Deze resultaten zijn samen met de bandgap, de open celspanning  $V_{oc}$ , vulfactor en het rendement samengevat in Tabel 2. Het rendement is bepaald voor een opvallende straling met een golflengte groter dan 750 nm.

Tabel 2 Overzicht van de verschillende PV cellen en systemen en de berekende QE en rendementen voor straling met een golflengte groter dan 750 nm.

Cel	Band-Gap [eV]	$V_{OC}$ [V]	$I_{SC}$ [A/m <sup>2</sup> ]	vul-factor	Power dens. [W/m <sup>2</sup> ]	Ren. [%]
Ge	0.67	0.27	306	0.70	57.8	12.0
GaSb	0.74	0.37	173	0.71	45.8	14.5
CIS	1.05	0.51	172	0.72	63	13.1
Si	1.11	0.65	146	0.80	75.9	15.7
Si+Ge	-	-	-	0.80	99.9	20.7

Uit de grafiek van Fig. 8 blijkt dat de Siliciumcellen alleen voor een beperkt golflengtegebied (tot ca. 1150 nm) een goed kwantum rendement heeft, terwijl Germanium en GaSb het bereik doorloopt tot ca. 1750 nm. De celspanning  $V_{oc}$  van de Si cellen is echter bijna het dubbele als die van Ge en GaSb. Het netto effect is het hoogste rendement voor Si-cellen van 15,7 %, zoals weergegeven in tabel 2. Samen met de lagere kosten van de Si cellen en de betere beschikbaarheid zal de verdere ontwikkeling plaatsvinden met Si-cellen. Een interessante optie kan een combinatie van een Si en een Ge cel zijn, wat resulteert in een totaal rendement van 20,7 %. Deze combinatie is echter niet eenvoudig te realiseren.

### 2.4 Klimaat in de Kas

Met computer berekeningen is de warmtebalans van de kas bepaald om de nieuwe klimaat eigenschappen in de kunnen voorspelen. Wanneer de NIR warmtestraling gereflecteerd wordt door het speciale spectraal selectieve

materiaal zal een gereduceerde warmte last en lagere temperaturen ontstaan in de situaties van hoge globale straling. Deze verminderde warmtetoetreding zal tevens de verdamping van het gewas verminderen volgens het model van Stangheli [1]. Het effect hiervan is weergegeven in Fig. 9. Dit Figuur laat een vermindering van de warmtetoetreding zien met een factor twee. De gereduceerde warmtetoetreding is tevens gunstig voor het watergebruik, en voor de nog benodigde koeling en de klimaattemperaturen in de kas [5, 6].

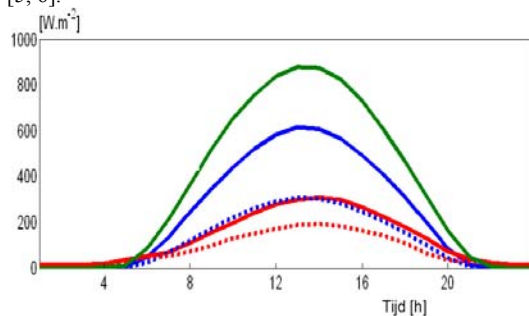


Fig. 9 Berekende warmtebelasting in een kas op een heldere dag van 25 Juni in Nederland (De Bilt). De warmtebelasting in de kas en het bijbehorend koeffect door de verdamping van tomaten gewas is bepaald met het computer simulatie programma KASPRO [10]. (—)Globale straling, (—) warmte toetreding, (—) koeffect van de verdamping, (----)warmte toetreding met de NIR folie en (----)koeffect van de verdamping met de NIR folie.

Alle hiervoor genoemde onderdelen zullen geïntegreerd worden in een nieuw ontworpen kas met een in cirkelvorm gebogen glas vorm, een NIR-reflecterende folie en PV cellen die met een regelmechanisme in het brandpunt gehouden worden. Het principe zal aangetoond worden in een prototype kas met een oppervlak van ongeveer 75 m<sup>2</sup>.

### 3 SAMENVATTING

Met de nieuw te ontwikkelen spectraal selectieve NIR-reflecterende film kan de warmtebelasting van een kas met ongeveer een factor twee terug gebracht worden. Hierdoor kan de kas eenvoudiger meer gesloten blijven, blijft meer CO<sub>2</sub> behouden en verminderd het watergebruik.

De gereflecteerde NIR warmtestraling kan worden gefocuseerd met een cirkelvormige trog reflector (cilinder) met een concentratie factor van ongeveer 40. Hierbij is alleen beweging van de collector met de PV cellen nodig. Door de concentratie van de straling is er maar een klein oppervlak PV cellen nodig waardoor de lichtonderschepping en de meerprijs beperkt blijft. De beste keus voor de collector zijn Silicium cellen door het hoge rendement van 15,7 % en de lagere kosten.

In combinatie met het principe van een Energie Leverende kas (met aquifer) verminderd de koelbehoefte met de helft en de warmte van de PV cellen kan benut worden om de aquifer te vullen. De vrijkomende elektrische energie kan aan het elektriciteitsnet geleverd worden.

### 4. ACKNOWLEDGEMENTS

Dit onderzoek is gefinancierd door de Nederlandse organisatie SenterNovem (EOS), het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselveiligheid (LNV) en Productschap Tuinbouw (PT).

### 5. REFERENTIES

- [1] C. Stangheli., 1987. Transpiration of Greenhouse Crops. PhD- Thesis Wageningen University
- [2] V. Jirka., K. Kučeravý, M. Malý, F. Pech, J. Pokorný, 1999, Energy flow in a greenhouse equipped with glass raster lenses, Renewable Energy, 16, pp 660-664
- [3] Y. Tripanagnostopoulos, M.Souliotis, J.K. Tonui., A. Kavga, 2004. Irradiation aspects for energy balances in greenhouses. Greensys2004 Int. conf.; Acta Hort. 691, pp733-740.
- [4] L.M. Fraas., W.E Daniels, J Muhs, 2001. Infrared photovoltaics for combined solar lighting and electricity for buildings, Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference, Munich Germany, October 2001.
- [5] S. Hemming , F. Kempkes, N. van der Braak, T. Dueck and N. Marissen, 2005. Filtering natural light at the greenhouse covering – Better greenhouse climate and higher production by filtering out NIR? Presented on ISHS Light symposium June 2005, Lillehammer; Acta Hort. in Press.
- [6] Sonneveld, P. J, G.L.A.M. Swinkels, F. Kempkes, J. van Campen and G.P.A. Bot , Greenhouse with an integrated NIR filter and a solar cooling system, Paper no. 06-99, Greenhouse Cooling Conference Almeria, Spain, 24 - 27 April 2006
- [7] Th. Bartzanas, Kittas C., Heat and Mass Transfer in a Large Evaporative Cooled Greenhouse Equipped with a Progressive Shading, Greensys 2004, Acta Hort. 691, October 2005, pp 625-631.
- [8] H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J. van Velden, R.J.C. van Zolingen and A.A. van Steenberg, 2002. The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. Solar Energy 72, 113-128.
- [9] T. Schlegl, F. Dimroth, A. Ohm, A.W. Bett, TPV Modules based on GaSB Structures, 20th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, CCIB Barcelona Spain, 6-10 June 2005
- [10] H.F. Zwart, de, 1996, Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using simulation model, PhD- Thesis Wageningen University, IMAG rapport 96-5