



WAGENINGEN UR

For quality of life

Fresnel concentrerende systemen voor de tuinbouw

Openbare rapportage

P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J.J. Janssen, B.A.J. van Tuijl & G.P.A. Bot





WAGENINGEN **UR**

For quality of life

Fresnel concentrerende systemen voor de tuinbouw

Openbare rapportage

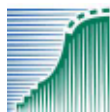
P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J.J. Janssen, B.A.J. van Tuijl & G.P.A. Bot

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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

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

Dit onderzoek is gefinancierd door:



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1 Inleiding	3
2 Vergelijking verschillende Fresnellens systemen	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Normale Fresnellens - Integratie in kanaalplaten	6
2.3 Lineaire Fresnellens - Integratie in kanaalplaten	8
2.4 Booglens kas	9
2.5 Kas met modulaire Fresnellenzen	11
2.6 Conclusie economische haalbaarheid	13
3 Ontwerp Fresnellens kas	15
3.1 Klimaatgegevens	15
3.2 Concept Fresnellens kas	16
3.3 Metingen aan de lenzen	17
3.4 Afdek materiaal en energieopbrengst	20
3.5 Conclusies ontwerp	21
4 Bouw van de Fresnelkas	23
5 Metingen en opbrengst bepaling	25
5.1 Positieregeling	25
5.2 Meting van dagopbrengsten	25
5.3 Bepaling van jaaropbrengsten	30
5.3.1 Stralingsgegevens	30
5.3.2 Warmtebehoefte van een tuinbouwkas	30
5.3.3 Afstemming vraag en aanbod	31
6 Conclusies	33
7 Knelpunten, risico's en aanbevelingen	35
8 Referenties	37
9 Publicaties	39
10 Appendix 1. Literatuuroverzicht	41
11 Appendix 2. De procesbesturing van de Fresnelkas	43
12 Appendix 3. Enquête	45

Samenvatting

Fresnellens zijn vlakke platen waarbij het oppervlak zodanig bewerkt is zij net als een normale lens in staat is evenwijdige straling te focuseren. De bewerking kan circulair zijn, de Fresnellens is dan te vergelijken met een ronde lens met brandpunt, ook kan de bewerking in de lengte zijn, deze z.g. lineaire Fresnellens is te vergelijken met een normale cylinderlens met een brandlijn. Vooral voor grote lenzen is een Fresnellens aantrekkelijk, hij is dun en heeft een laag gewicht waar een normale lens heel dik en zwaar wordt, bovendien kan zij een kleinere brandpunt(lijn)afstand hebben dan standaard lenzen.

Met een Fresnellens kan directe straling in het brandpunt worden geconcentreerd en gebruikt worden voor energie opwekking. Dit maakt de Fresnellens bruikbaar voor belichtingsregeling in kassen en gebouwen. Door de directe straling te onderscheppen worden de klimaatomstandigheden bij hoge intensiteiten van de zonneinstraling beter. Speciaal voor potplanten die vaak lagere lichtintensiteiten vragen biedt dit interessante mogelijkheden. De onderschepping van het aandeel direct licht dat bij hoge instraling 40-70% van de zonnestraling vormt, is mogelijk door en in het brandpunt(lijn) een fotovoltaïsche module (PV-module) te positioneren die de gefocuseerde directe straling omzet in elektrisch vermogen. De doorgelaten diffuse straling wordt nog steeds gebruikt voor de belichting van de planten in de kas. In het geval van lage stralingsintensiteiten ('s morgens, 's avonds, bewolkt weer en 's winters) kan de PV-module uit het brandpunt verwijderd worden zodat de totale straling zoveel mogelijk ten goede komt aan de teelt en het belichtingsniveau op peil blijft.

De verschillende Fresnellenssystemen zijn in hoofdstuk 2 zijn met elkaar vergeleken en is het economisch perspectief geschetst. Met normale Fresnellens of modulaire systemen kunnen hogere concentratie factoren bereikt (ca. 1000x) worden in vergelijking met Lineaire lenzen of booglenzen (ca. 100x). Op korte termijn is de kas met lineaire lenzen technisch het meest haalbaar, omdat deze Fresnellens en de hierop in de brandlijn passende strips PV cellen reeds op de markt verkrijgbaar zijn. Wanneer de lineaire Fresnellens in de oostwest richting geplaatst wordt is de benodigde verplaatsing van de PV module het geringste. Met deze systemen is een optische concentratiefactor van ca. 80x haalbaar. Hierdoor blijft het oppervlak van de PV module klein en daarmee ook de diffuse lichtonderschepping. De PV module moet dan wel gekoeld worden, de koelwarmte kan in een aquifer voor gebruik in de winter worden opgeslagen. De uiteindelijke afschrijvingsperiodes zijn voor de verschillende uitvoeringen van de Fresnelkassen nagenoeg gelijk. Op dit moment is de Fresnelkas nog niet haalbaar. Over 5 jaar is de gewone kas met een afschrijvingstermijn van ca. 10 jaar nog net niet haalbaar maar een energieneutrale kas wel met een afschrijvingstermijn van ca. 7 jaar. In de laatst genoemde kas wordt de geogste warmte hergebruikt in een buffer en een aquifer. Hierdoor wordt bespaard op kosten voor de warmtewisselaar en elektrische energie. De economische afschrijvingsperiode van ca. 7 jaar is voor PV toepassingen kort. Wanneer de productie van cellen en lenzen enige omvang gekregen heeft en de prijs van energie flink gestegen is (over ca. 10 jaar) zijn de afschrijvingsperiodes gedaald tot respectievelijk ca. 4 jaar en 3 jaar.

In hoofdstuk 3 is de lichttransmissie voor direct en diffuus licht van de verschillende Fresnellenssystemen gemeten en de posities van het brandpunt bij verschillende invalshoeken. Voor loodrecht opvallend licht blijkt de lichttransmissie hoog te zijn namelijk tussen 92-98%. Voor diffuus licht liggen de transmissiewaarden tussen 80-83% wat vergelijkbaar is met enkel glas. De Fresnellens is bij de concept kas geplaatst tussen dubbelglas omdat hierdoor de lens goed beschermd is tegen condensatie, water en vuil. Het opbrengen van de lens op het glas (laminatie) en een Anti-Reflectie coating alzijdig zal nog resulteren in 10% extra elektrische energie opbrengst en ruim 10% meer licht in de kas.

Aan de hand van Nederlandse stralingsgegevens en het type afdekkingsmaterialen is de maximale opbrengst met Silicium PV cellen bepaald op ca. 32 kWh/m² per jaar. Wanneer er GaAs PV (triplejunction) cellen gebruikt worden dan kan de opbrengst toenemen tot ca. 64 kWh/m² per jaar. Bij het basisconcept wordt uitgegaan van een asymmetrische kas met lineaire Fresnellens geplaatst in de op het zuiden georiënteerde zijde van het dak met de nok in de oostwest richting. Uit de stralingsgegevens is tevens afgeleid dat met een Fresnellens kas op een heldere dag tot 81% van de energie kan worden weggeschermd. Om dit te bereiken is het nodig dat de gehele brandlijn bedekt wordt door de collector.

De bouw van de kas is in hoofdstuk 4 beschreven. Naast het mechanische deel van de motoren en standregeling is tevens de samenstelling van de zonnecelmodule beschreven. In hoofdstuk 5 is het elektrisch piekvermogen en de dag- en jaaropbrengsten bepaald. Er is een elektrisch piekvermogen van 40 W/m^2 (Fresnellens oppervlak) en een thermisch piekvermogen van 170 W/m^2 gemeten. De hieruit afgeleide opbrengst per jaar is 29 kWh/m^2 (Fresnellens oppervlak) elektrische energie en 518 MJ/m^2 (144 kWh/m^2) thermische energie. De waarde van de bepaalde elektrische opbrengst ligt dicht bij de voorspelde waarde. Waarschijnlijk worden verliezen door grotere invalshoeken (deels) gecompenseerd door een deel van het diffuuslicht dat bijdraagt aan de opbrengst. Onder de voorwaarden van het oplossen van de onder aanbevelingen genoemde knelpunten is het Fresnelkas concept binnen afzienbare tijd economisch interessant.

1 Inleiding

Bij siergewassen wordt een te hoge stralingsintensiteit voorkomen door krijten of schermen. Krijten is gedurende het zomerseizoen een permanente voorziening waarbij ook bij lage instraling de stralingsintensiteit wordt verlaagd. Met regelbare schermen kan dit wel op de stralingsintensiteit worden aangepast. Bij beide methoden geldt dat overtollige straling niet wordt benut. Bij het gebruik van Fresnellenzen kan het directe licht gecontroleerd worden ingevangen zodat de lichtintensiteit kan worden aangepast. Bovendien kan dit directe licht worden benut voor energieconversie.

Fresnellenzen zijn vlakke plaat lenzen waarbij het oppervlak zodanig is gestructureerd dat de lenswerking optreedt. Zodoende zijn zij in staat directe straling te focuseren en diffuus licht door te laten. Het vermogen van Fresnellenzen om directe en diffuse zonnestraling te scheiden is een nuttige eigenschap voor verlichtingscontrole in kassen. Het directe deel van de invallende zonnestraling kan op een absorbeerstrook worden geconcentreerd en omgezet worden in elektrische energie. Tevens wordt de stralingsbelasting in de teeltruimte sterk vermindert. De voordelen van Fresnellenzen boven normale lenzen zijn het lagere volume en gewicht, de kleinere brandpunts-lengte en de lagere kosten, vooral bij grote lensafmetingen zoals die in een kas nodig zijn. Het gebruik van Fresnellenzen als transparant dekmateriaal voor verlichting en energiecontrole van interne ruimten en kassen is als eerste getest door Jirka *et al.* (1998, 1999). Hierbij is de geconcentreerde energie omgezet via een collector in warm water. De toepassing in kassen is tevens getest door Tripanagnostopoulos (1997a/b/c) waarbij zowel de opwekking van elektrische als thermische energie met PV-cellen voorgesteld is. Meer recent zijn er experimenten in kassen verricht door het Duitse bedrijf BSR Solar Technologies (Website ENVI system en Envelope Technology). Tevens zijn recent twee nieuwe patent aanvragen verschenen van Giacomo (2006, 2008). Het nu gerapporteerde onderzoek aan de Fresnelkas is gebaseerd op de patent aanvraag van Van Tilborgh (2005) en wordt het concept nader uitgewerkt voor toepassingen in de kastuinbouw.

De belangrijkste doelstelling(en) van het project zijn:

- beheersen van de lichtintensiteit op het gewas in het bijzonder bij siergewassen
- aanwenden van niet voor het gewas benodigde zonnestraling voor opwekking van elektriciteit
- benutten van overtollige zonnewarmte voor verwarming

Dit wordt bereikt door

1. Bij te hoge lichtintensiteiten concentratie van de directe straling met een Fresnellens op een zonnecel module.
2. De op de collector opvallende energie wordt omgezet in hoogwaardige elektrische energie. De restwarmte wordt met koelwater afgevoerd en opgeslagen op dag/nacht en seizoensbasis.

Hierbij gelden de volgende eisen:

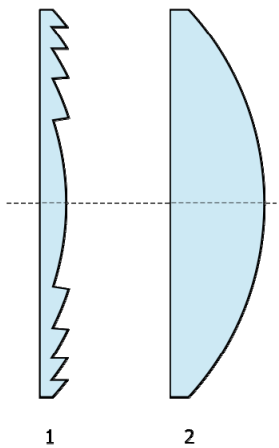
1. Het diffuse licht moet zoveel mogelijk ongehinderd de teeltruimte bereiken.
2. De belichting in de teeltruimte moet zo gelijkmatig mogelijk zijn.
3. Regelbaarheid: bij lage lichtconcentraties kan het directe licht doorgelaten worden naar de teeltruimte.
4. Condensatie op het kasdak mag geen problemen veroorzaken.
5. De kas moet op termijn economisch haalbaar zijn.

In Hoofdstuk 2 zijn verschillende Fresnellens systemen met elkaar vergeleken en is het economisch perspectief geschetst. Voor het realiseren van de doelstellingen is een hoge lichttransmissie van Fresnellenzen voor directe en diffuse straling belangrijk. In Hoofdstuk 3 is dit onderzocht. In dit hoofdstuk is tevens onderzocht wat er met het brandpunt gebeurt bij niet loodrecht inval van de directe straling en wat in dat geval de plaats van het brandpunt is. Tevens is aan de hand van de meetgegevens in hoofdstuk 4 de maximaal haalbare opbrengst en het hoogst haalbare schermpercentage bepaald met de stralingsgegevens van Nederland. In het laatste hoofdstuk is een concept Fresnellenskas uitgewerkt dat zoveel mogelijk voldoet aan de gestelde eisen.

2 Vergelijking verschillende Fresnellens systemen

2.1 Inleiding

Bij een Fresnellens is de kromming van een normale lens gesegmenteerd en op het oppervlak van een vlakke plaat aangebracht. Op het oog lijken dit groeven maar elke groef heeft een oppervlaktekromming die van een lens is afgeleid. Dit is te zien in Figuur 2.1 met recht een conventioneel en links een Fresnellens. Voor een ronde lens zijn dit cirkelvormige groeven, dit wordt een gewone Fresnellens genoemd en deze heeft een brandpunt. Voor een cylinderlens zijn dit rechte groeven, dit wordt een lineaire Fresnellens genoemd, deze heeft een brandlijn. Hoewel de groeven in principe op beide zijden kunnen worden aangebracht (dubbelbolle lens) wordt dit in de praktijk meestal slechts aan een zijde gedaan. In Figuur 2.2a is rechts een gewone en links een lineaire Fresnellens afgebeeld, de ronde en lineaire structuur zijn hierin te herkennen. In Figuur 2.2b is van de lineaire Fresnellens de brandlijn te zien.



In het projectvoorstel is voorgesteld van drie Fresnel kassystemen een schetsmatig ontwerp te maken.

Deze drie systemen waren:

1. Lineaire Fresnellenzen uitgevoerd als kanaalplaat.
2. Gewone Fresnellenzen als kleine modules in het kasdek.
3. Concept met grote zeshoekige Fresnellenzen .

Op de workshop met tuinders zijn in totaal vijf systemen voorgesteld:

- a. Lineaire Fresnellenzen uitgevoerd als kanaalplaat.
- b. Normale Fresnellenzen uitgevoerd als kanaalplaat.
- c. Normale Fresnellenzen als kleine modules in het kasdek.
- d. Concept met grote zeshoekige Fresnellenzen.
- e. Booglens concept (de booglens wordt later besproken)

Figuur 2.1. Conventionele (rechts) en Fresnellens (links).

Aan de hand van de resultaten van de workshop, zie Appendix, en in overleg met LNV zijn de concepten a, b, c en e overbleven en verder uitgewerkt in dit rapport.

Voor een eerste test is uitgegaan van in de handel verkrijgbare lenzen (zie Figuur 2.1 en 2.2).

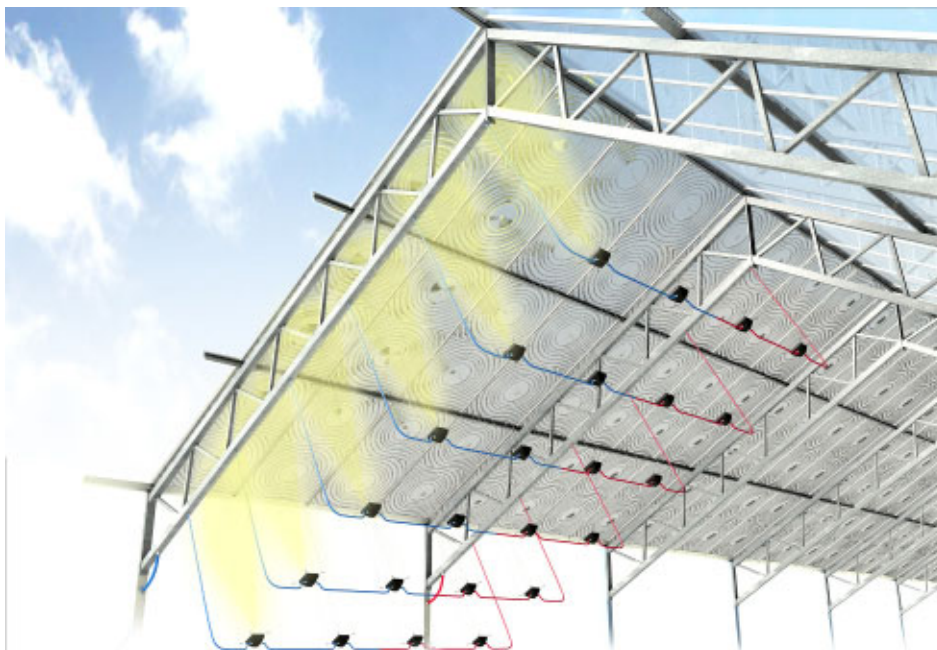


Figuur 2.2a. Foto met een lineaire Fresnellens JB (links) en een gewone Fresnellens JPK (rechts).



Figuur 2.2b. Foto met een lineaire Fresnellens PP.

2.2 Normale Fresnellens - Integratie in kanaalplaten



Figuur 2.3. Impressie van een kasdek met normale Fresnellens geïntegreerd als een kanaalplaat (tekening Bode Project- en Ingenieursbureau).

In Figuur 2.3 is een impressie gegeven van een Kasdek met geïntegreerde Fresnellens die per lens een brandpunt hebben. De lenzen kunnen ingebouwd worden in een kanaalplaat of dubbelglas. Om vervuiling en vochtproblemen te voorkomen zijn de groeven van de Fresnellens aan de onderzijde van het oppervlak van de bovenste plaat aangebracht. In elk brandpunt van de normale Fresnellens moet een kleine collector worden geplaatst. De zodoende onderschepte directe straling verlaagt de lichtintensiteit, door beter of slechter in het brandpunt positioneren kan de lichtintensiteit tot het gewenste niveau worden teruggebracht. Zodoende kan een voor de gewasproductie optimale lichtintensiteit worden gerealiseerd. De onderschepte straling wordt in de PV module van de collector omgezet in elektrisch vermogen.

Met normale Fresnellens zijn hoge concentratie factoren mogelijk 200-2000x afhankelijk van de kwaliteit van de lens. Door deze hoge concentratiefactor is er slechts een zeer klein PVcel oppervlak (ca. 0,1%) noodzakelijk. Hierdoor is de lichtonderschepping van de zonnecelmodule zeer gering (ca. 0,1%). Naast Silicium cellen die geschikt gemaakt zijn voor geconcentreerde straling kunnen tevens triple junctie cellen gebruikt worden voor de omzetting naar elektrische energie. Met triple junctie cellen kan een zeer hoog omzettingsrendement van ca. 30% bereikt worden waardoor de elektrische energie output zeer hoog is. Het oppervlak van de PV cellen is klein (lensoppervlak/concentratiefactor), het economisch perspectief is goed (ook op kortere termijnen) en de lichtonderschepping gering. Een knelpunt van dit concept met normale lenzen is de toename van de afmeting van het brandpunt bij niet loodrechte inval. Dit is nader toegelicht in paragraaf 5.1. Daarnaast is de koeling een knelpunt omdat slechts een klein koeloppervlak beschikbaar is met hoge warmtelast en omdat elke cel moet worden gekoeld zodat de cellen op koelbuisjes moeten worden aangesloten. Voorts moet elke cel elektrisch worden verbonden om het opgewekte vermogen af te kunnen voeren.

Een overzicht van de economische kengetallen is weergegeven in Tabel 2.1. In Tabel 2.1 worden economische kengetallen gegeven voor een als boven uitgevoerde Fresnelkas. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de gewasproductie niet nadelig wordt beïnvloed. Ook positieve effecten van een betere gewasproductie ten gevolge van het beter afgestelde lichtniveau worden niet meegerekend.

Tabel 2.1. Economische verkenning normale Fresnel kas.

Onderdeel	Investering					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]
Totale extra Investering						
Fresnel lens in kanaalplaat	70	60	50	70	60	50
PV cellen (C=1000x) ¹	76	40	30	76	40	30
Laminatie ²	8	4	4	8	4	4
Standregeling ²	40	18	18	40	18	18
Warmtewisselaar ²	10	10	10	10	10	10
Installatie ²	15	15	15	15	15	15
Totale kosten	231	153	133	231	153	133
Afschrijving+rente [€ per m ²]						
Rente (gemiddeld over afschrijvingsperiode; 5%)	5,8	3,8	3,3	5,8	3,8	3,3
Afschrijving	0,8	14,6	38	8,3	22,8	47,7
Totale jaarkosten	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51
Baten € per m ²						
Elektrische energie ^{3,4}	2,9	9,8	30	2,9	9,8	30
Thermische energie ⁴	0,7	5,6	8,3	2,2	7,8	12
Besparing warmtewisselaar + elektr. verbruik				6	6	6
Besparing schermstelsel (2 schermen) ⁵	3	3	3	3	3	3
Totale opbrengst	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51
Terugverdientijd	231/0,8= 280 jaar	153/14,6= 10,5 jaar	133/30= 3,5 jaar	231/8,3= 27,7 jaar	153/22,8= 6,7 jaar	133/47,7= 2,8 jaar

1. Deze kosten zijn bij grote aantallen.
2. Deze kosten/bedragen zijn momenteel niet exact bekend en daarom een schatting.
3. Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10€/kWh, over 5 jaar 0,20€/kWh en over 10 jaar 0,30€/kWh.
4. Zie voor de berekening van deze baten Tabel 9.2.
5. Schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving.

Er zijn tevens drie kolommen opgenomen voor een semigesloten kasuitvoering. Hierbij wordt de warmte van de PV-module gebruikt voor opslag in een aquifer. Hierdoor is in principe de warmtewisselaar voor de oogst van warmte in de kas niet meer noodzakelijk. De afschrijvingsperiode is bepaald uit de opbrengst van het systeem minus de benodigde rentekosten. In deze berekening is de afschrijvingsperiode dus gelijk aan de terugverdientijd.

Tabel 2.2. *Overzicht van de gebruikte waarden voor de hoeveelheid opgewekte elektrische en thermische energie en de waarde bepaling van de thermische energie.*

Product/periode	Nu	Na 5 jaar	Na 10 jaar
Opbrengst elektrische energie [kWh]	29	49	100
Opbrengst thermische energie [kWh]	144	245	245
Gasprijs [€/m ³]	0,20	0,40	0,60
Gasprijs [€/kWh]	0,023	0,045	0,068
Waarde deel in buffer (50%) [€/kWh]	0,012	0,023	0,034
Waarde deel in aquifer (50%) [€/kWh]	0,003	0,009	0,015
Totale waarde [€/kWh]	0,015	0,032	0,049

Er zijn tevens kolomen opgenomen voor een energieneutrale (semigesloten) kasuitvoering. De elektrische energie opbrengst en de waarde van de opgevangen warmte is weergegeven in Tabel 9.2. Hierbij is uitgegaan van een gasprijs nu van 0,20 €/m³, na 5 jaar een prijs van 0,40 €/m³ en na 10 jaar een prijs van 0,60 €/m³. Verder is aangenomen dat 50% van de opgevangen warmte direct in de kas gebruikt kan worden (via een buffer). De overige warmte wordt vernietigd (bij de gewone kas) of opgeslagen in de aquifer (kas met aquifer).

De afschrijvingsperiode is bepaald uit de opbrengst van het systeem minus de benodigde rentekosten. In deze berekening is de afschrijvingsperiode dus gelijk aan de terugverdientijd.

2.3 Lineaire Fresnellens - Integratie in kanaalplaten

Als alternatief van de gewone Fresnellens is een kasdek met geïntegreerde lineaire Fresnellens mogelijk. Deze lange lenzen kunnen eveneens ingebouwd worden in een kanaalplaat waarbij de lijnvormige groeven van de Fresnellens aan de onderzijde van het oppervlak van de bovenste plaat aangebracht worden om vervuiling en vochtproblemen te voorkomen. Met lineaire Fresnellens zijn concentratie factoren op een brandlijn mogelijk van 20-80x, afhankelijk van de kwaliteit van de lens. In deze brandlijn wordt een smalle strook PV cellen gepositioneerd. Het oppervlak van de smalle strook PV cellen is beperkt (ca. 2 %) en de lichtonderschepping gering (ca. 2 %). De kosten van de cellen zijn op dit moment nog hoog omdat er weinig van dit soort strookvormige cellen geproduceerd worden. De waterkoeling en elektrische verbinding van een strook cellen is eenvoudiger dan bij de normale lenzen met hun brandpunt (zie par. 2.2). Door het grotere totaaloppervlak van de PV modules zijn de PV cellen duurder dan bij de puntvormige cellen in het brandpunt van de normale Fresnellens (par. 2.2). De standregeling heeft echter minder variabelen (alleen een regeling in noordzuid afstand en de afstand tot de lens) waardoor deze goedkoper is dan bij de normale Fresnellens. Een overzicht van de economische kengetallen is weergegeven in Tabel 2.3. Sommige kostenposten in deze tabel zijn nog niet exact te geven en zijn daarom een zo goed mogelijke benadering. Er wordt van uitgegaan dat de gewasproductie niet nadelig wordt beïnvloed. Ook positieve effecten van een betere gewasproductie ten gevolge van het beter afgestelde lichtniveau worden niet meegerekend.

Tabel 2.3. Economische verkenning lineaire Fresnel kas.

Onderdeel	Investering					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]
Totale extra Investering						
Fresnel lens in kanaalplaat	60	50	50	60	50	50
PV cellen (C=67x) ¹	70	60	30	70	60	30
Laminatie ²	20	10	4	20	10	4
Standregeling ²	30	12	18	30	12	18
Warmtewisselaar ²	15	15	10	15	15	10
Installatie ²	10	10	15	10	10	15
Totale kosten	205	157	133	205	157	133
Afschrijving+rente [€ per m ²]						
Rente (5%)	5,1	3,9	3,3	5,0	3,9	3,3
Afschrijving	8,4	20,1	38	14,4	26,1	47,7
Totale jaarkosten	13,5	24,0	41,3	19,4	30,0	51
Baten € per m ²						
Elektrische energie ^{3,4}	2,9	9,8	30	2,9	9,8	30
Thermische energie ⁴	0,7	5,6	8,3	2,2	7,8	12
Besparing warmtewisselaar + elektr. verbruik				6	6	6
Besparing schermstelsel (2 schermen) ⁵	3	3	3	3	3	3
Totale opbrengst	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51
Terugverdientijd	205/8,4= 139 jaar	157/20,1= 10,8 jaar	133/38= 3,3 jaar	205/14,4= 22,8 jaar	157/26,1= 6,9 jaar	133/47,7= 2,7 jaar

1. Deze kosten zijn bij grote aantallen.
2. Deze kosten/bedragen zijn momenteel niet exact bekend en daarom een schatting.
3. Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10€/kWh, over 5 jaar 0,20€/kWh en over 10 jaar 0,30€/kWh.
4. Zie voor de berekening van deze baten Tabel 9.2.
5. Schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving.

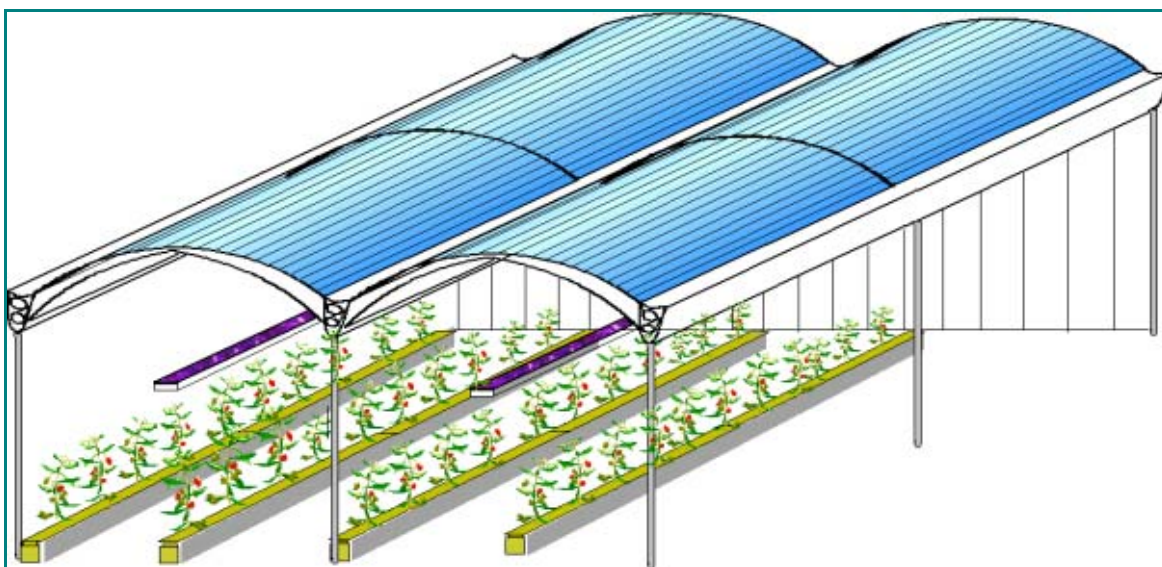
2.4 Booglens kas

Bij de booglenskas is de lineaire Fresnellens zelf gebogen volgens een bepaalde curve, meestal een cirkelboog. Een voorbeeld hiervan is in Figuur 2.4 weergegeven. Het voordeel van de gebogen en speciaal hiervoor ontworpen Fresnel is tweeledig:

1. De lichttransmissie en daarmee de productie en energieopbrengst zal hoger zijn omdat alle naar de hemel gerichte vlakken als Fresnellens zijn uitgevoerd.
2. Het systeem is relatief ongevoelig voor maatafwijkingen.

Met de booglens zijn concentratie factoren in de brandlijn mogelijk van 20-80x, afhankelijk van de kwaliteit van de lens. Hierdoor is het oppervlak van de strookvormige PV cellen beperkt (ca. 2 %) en de lichtonderschepping gering (ca. 2 %). Door het grotere oppervlak van de PV module zijn de kosten hoger. Voor de standregeling zijn minder

variabelen (alleen een regeling in noordzuid afstand en de afstand tot de lens) waardoor deze goedkoper is dan bij de normale Fresnellens. De kosten van de cellen zijn op dit moment nog hoog omdat er weinig van dit soort cellen geproduceerd worden. De opbrengst zal iets hoger zijn dan de lineaire lenzen alleen in de zuidzijde (par. 2.3) omdat de als booglenzen uitgevoerde lenzen een hogere lichttransmissie vertonen. Omdat de cellen nu als lange strip onder de lenzen geplaatst zijn, is de waterkoeling en elektrische verbinding eenvoudiger dan bij de normale lenzen. Een overzicht van de economische kengetallen is weergegeven in Tabel 2.4. Ook hier is er van uitgegaan dat de gewasproductie niet nadelig wordt beïnvloed. Ook positieve effecten van een betere gewasproductie ten gevolge van het beter afgestelde lichtniveau worden niet meegerekend.



Figuur 2.4. Impressie van een kasdek met boogvormige Fresnellenzen geïntegreerd als een kanaalplaat (booglenkas).

Tabel 2.4. Economische verkenning booglens kas.

Onderdeel	Investering					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]
Totale extra investering						
Fresnel lens in kanaalplaat	80	50	50	80	50	50
PV cellen (C=67x) ¹	70	60	30	70	60	30
Laminatie ²	20	10	4	20	10	4
Standregeling ²	30	12	18	30	12	18
Warmtewisselaar ²	15	15	10	15	15	10
Installatie ²	10	10	15	10	10	15
Totale kosten	225	157	133	225	157	133
Afschrijving+rente [€ per m ²]						
Rente (5%)	5,1	3,9	3,3	5,0	3,9	3,3
Afschrijving	1,0	14,5	37,6	8,5	22,7	47,3
Totale jaarkosten	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51,0
Baten € per m ²						
Elektrische energie ^{3,4}	2,9	9,8	30	2,9	9,8	30
Thermische energie ⁴	0,7	5,6	8,3	2,2	7,8	12
Besparing warmtewisselaar + elektr. verbruik				6	6	6
Besparing schermstelsel (2 schermen) ⁵	3	3	3	3	3	3
Totale opbrengst	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51
Terugverdientijd	225/1= 230 jaar	157/14,5= 10,8 jaar	133/38= 3,9 jaar	225/8,5= 26,5 jaar	157/22,7= 6,9 jaar	133/47,3= 3,1 jaar

1. Deze kosten zijn bij grote aantallen.
2. Deze kosten/bedragen zijn momenteel niet exact bekend en daarom een schatting.
3. Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10€/kWh, over 5 jaar 0,20€/kWh en over 10 jaar 0,30€/kWh.
4. Zie voor de berekening van deze baten Tabel 9.2.
5. Schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving.

2.5 Kas met modulaire Fresnellenzen

Een vierde kassysteem is een systeem opgebouwd uit kleinere normale Fresnellenzen zoals weergegeven in Figuur 2.5, waarbij de lenzen afzonderlijk op de zon zijn te richten. De PV cellen zijn direct aan de lens gemonteerd zodat het geheel zich richt op de zon. Inbouw tussen dubbel glas of kunststofplaten kost hier ca. 5-10% extra licht omdat de lenzen niet in het kasdek zijn ingebouwd. De energieopbrengst zal hoger zijn dan bij systeem 2 (par 5.3) omdat de modules altijd optimaal op de zon gericht zijn. Doordat normale Fresnellenzen worden gebruikt, zijn hoge concentratiefactoren mogelijk van ca. 1000x. Door deze hoge concentratiefactor zijn relatief dure GaAs cellen nodig, met een zeer klein oppervlak (ca. 0,1%). Met triple junction cellen kan een zeer hoog omzettingsrendement van ca. 30% bereikt worden waardoor de elektrische energie output zeer hoog is. Het oppervlak van de PV cellen is klein, het economisch perspectief is goed (ook op kortere termijnen) en de lichtonderschepping gering (<1%). Het

koelen van de cellen met water en de stroom afvoer is relatief complex door het grote aantal cellen, waardoor lichtverlies kan optreden. Een overzicht van de economische kengetallen is weergegeven in Tabel 2.5. De afschrijvingsperiode is bepaald uit de opbrengst van het systeem minus de benodigde rentekosten. In deze berekening is de afschrijvingsperiode dus gelijk aan de terugverdientijd.



Figuur 2.5. Systeem met modulaire Fresnellenzen.

Tabel 2.5. Economische verkenning van een kas met modulaire Fresnellens.

Onderdeel	Investering					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
Totale extra Investering	Nu	5 jaar	10 jaar	Nu	5 jaar	10 jaar
	[€/m ²]	[€/m ²]	[€/m ²]	[€/m ²]	[€/m ²]	[€/m ²]
Fresnel lens in kanaalplaat	70	60	50	70	60	50
PV cellen (C=67x) ¹	76	40	30	76	40	30
Laminatie ²	20	10	10	20	10	10
Standregeling ²	40	30	30	40	30	30
Warmtewisselaar ²	15	15	15	15	15	15
Installatie ²	15	15	15	15	15	15
Totale kosten	236	170	150	236	170	150
Afschrijving+rente [€ per m ²]						
Rente (5%)	5,9	4,3	3,8	5,9	4,3	3,8
Afschrijving	0,7	14,2	37,6	8,2	22,4	47,3
Totale jaarkosten	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51,0
Baten € per m ²						
Elektrische energie ^{3,4}	2,9	9,8	30	2,9	9,8	30
Thermische energie ⁴	0,7	5,6	8,3	2,2	7,8	12
Besparing warmtewisselaar + elektr. verbruik				6	6	6
Besparing schermstelsel (2 schermen) ⁵	3	3	3	3	3	3
Totale opbrengst	6,6	18,4	41,3	14,1	26,6	51
Terugverdientijd	225/0,7= 337 jaar	170/18,4= 12 jaar	150/38= 4 jaar	225/8,5= 28,8 jaar	157/22,7= 7,6 jaar	133/47,3= 3,2 jaar

1. Deze kosten zijn bij grote aantallen.
2. Deze kosten/bedragen zijn momenteel niet exact bekend en daarom een schatting.
3. Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10€/kWh, over 5 jaar 0,20€/kWh en over 10 jaar 0,30€/kWh.
4. Zie voor de berekening van deze baten Tabel 9.2.
5. Schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving.

2.6 Conclusie economische haalbaarheid

De verschillende Fresnellens systemen zijn in hoofdstuk 2 zijn met elkaar vergeleken en het economisch perspectief is geschetst. Met een normale Fresnellens modulair systeem kan een hogere concentratie factor worden bereikt (ca. 1000x) in vergelijking met het systeem met Lineaire Fresnellens of met booglenzen (ca. 100x). Op korte termijn is de kas met lineaire Fresnellens technisch het meest haalbaar, omdat de Fresnellens en de PV cellen reeds op de markt verkrijgbaar zijn. Wanneer de lineaire Fresnellens op het zuiden wordt gericht, dus in de oostwest richting geplaatst wordt, is de benodigde verplaatsing van de PV module het geringste. Met deze systemen is een optische concentratie factor van ca. 80x haalbaar. Hierdoor blijft het oppervlak van de PV module en daarmee de lichtonderschepping klein. De uiteindelijke afschrijvingsperiodes zijn voor de verschillende uitvoeringen van de Fresnelkassen nagenoeg gelijk: op dit moment is dat nog ca. 23 jaar bij een gewone kas en ca. 7 jaar bij een energieneutrale kas omdat veel onderdelen niet in serie geproduceerd worden. Wanneer de productie van cellen en

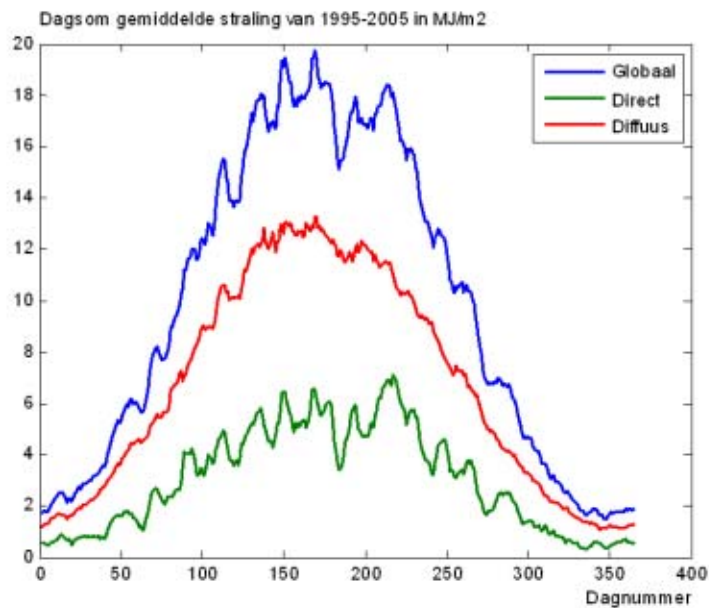
lenzen enige omvang gekregen heeft (over ca. 5 jaar) zijn de afschrijvingsperiodes gedaald tot respectievelijk ca. 14 jaar en 6 jaar. De economische afschrijvingsperiode van ca. 6 jaar is voor PV toepassingen kort. Bij toepassing in een (semi)gesloten kas wordt de geooogste warmte hergebruikt en wordt bespaard op de kosten voor de in zo'n kas benodigde warmtewisselaar. Bovendien wordt dan bespaard op elektrische energie.

3 Ontwerp Fresnellens kas

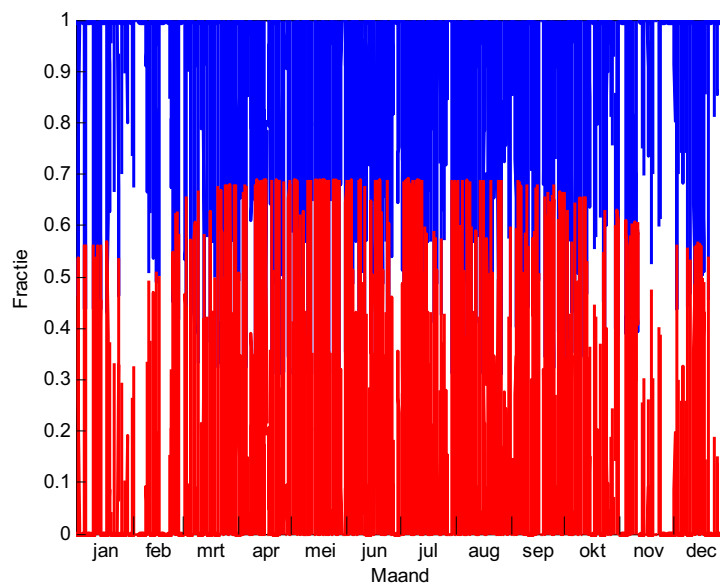
3.1 Klimaatgegevens

In Figuur 3.1 is de wekelijks gemiddelde dagsom van de globale straling in Nederland weergegeven onderverdeeld in diffuus en direct. De globale straling kan worden onderverdeeld in diffuse en directe straling. Directe straling vormt gemiddeld 29.6% van de globale straling. De totale globale straling is 3.65 GJ waarvan is dus 1.08 GJ directe straling. Deze figuur geeft een goede indicatie van de gemiddelde dagsom. In een kas wordt echter geschermd gebaseerd op momentane stralingsintensiteiten. Door per dag te middelen ontstaat echter goed beeld van de momentane verhouding tussen diffuse en directe straling. Daarom zijn de urengegevens in een aparte grafiek in Figuur 3.2 weergegeven. Aan de hand van de urengegevens blijkt het maximum aandeel directe straling 69% te zijn t.o.v. de totale straling. Er is dan dus 31% diffuse straling. Uit deze gegevens is het maximale schermingspercentage te bepalen. De maximale transmissie van het kasdek voor diffuus licht is 75%, zodat van het aandeel van 31% diffuse straling nog $0.25 \times 31 = 8.7\%$ niet wordt doorgelaten door het kasdek. Het maximale schermpercentage bij een aandeel van 69% directe straling is dus $69 + 8.7 = 77.7\%$.

Op een heldere dag (900 Wm^{-2} instraling) is het op het gewas invallend vermogen dan 195 W m^{-2} . Dit deel is te verhogen door meer direct licht in de kas toe te laten. Bij een bewolkte dag met 400 Wm^{-2} diffuse instraling is de lichtintensiteit in de kas 300 Wm^{-2} zonder onderschepping door de PV cellen.



Figuur 3.1. Gemiddelde globale straling in Nederland onderverdeeld in diffuus en direct deel.



Figuur 3.2. Fractie diffuse en directe straling in Nederland zoals bepaald uit uurgemiddelden. (rood=fractie directe straling; blauw=fractie diffuse straling)

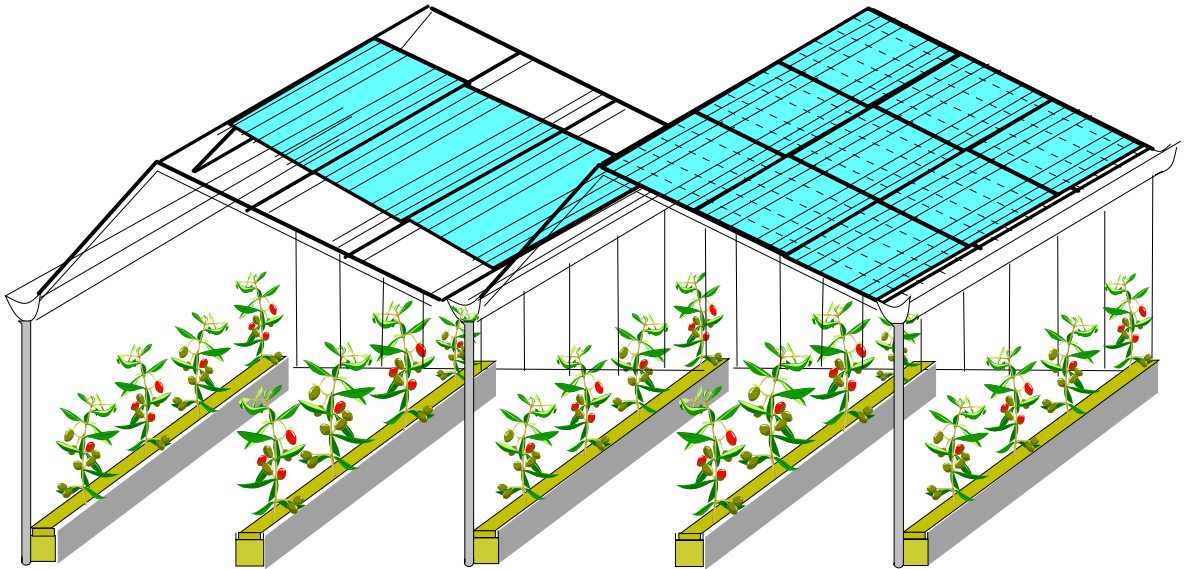
3.2 Concept Fresnellens kas

Voor de te bouwen Fresnelkas zijn aan de hand van dit vooronderzoek en de uitslag van de enquête een aantal uitgangspunten geformuleerd. Deze uitgangspunten zijn:

1. Alle directe licht wordt met een Fresnellens gefocusseerd op de collector.
2. De op de collector opvallende energie wordt omgezet in hoogwaardige elektrische energie. De restwarmte wordt met koelwater afgevoerd voor opslag.
3. Het diffuse licht moet zoveel mogelijk ongehinderd de teelruimte bereiken.
4. De belichting in de teelruimte moet zo gelijkmatig mogelijk zijn.
5. Regelbaarheid: bij lage lichtconcentraties kan het directe licht doorgelaten worden naar de teelruimte.
6. Condensatie op het kasdak mag geen problemen veroorzaken.
7. De kas moet zoveel mogelijk economisch haalbaar zijn.

Aan de hand van deze eisen volgen de uitgangspunten die voor de bouw van belang zijn:

- A. Het collector oppervlak is zodanig van afmetingen dat de gefocusseerde directe straling wordt onderschept en omgezet kan worden (uitgangspunten 1,2 en 4).
- B. De kas wordt (indien mogelijk) asymmetrisch gebouwd, omdat bij een symmetrische Venlo kas een deel van de directe straling via de noordzijde door de kap naar binnen komt en lichtstrepen in het gewas ontstaan. Dit is ongewenst (uitgangspunt 4). In de eerste opzet is de kas nog symmetrisch uitgevoerd omdat anders bij lage zonnestand de baan van het brandpunt en module de noordzijde van de kap gaat raken. Bij hoge zonnestand is echter dan niet alle directe straling weg te schermen.
- C. Er wordt uitgegaan van een concept met lineaire Fresnellens (type PP) geplaatst in de oostwest richting met een oriëntatie naar het zuiden (zie Figuur 3.3) omdat hiervoor lenzen beschikbaar zijn die gebruikt kunnen worden en de regeling eenvoudig gehouden kan worden (uitgangspunt 7).
- D. De eerste gedachte was twee kappen van ca. 3m met een vakmaat van 5m te bouwen. Vanwege kostenbesparing is uiteindelijk gekozen voor een kas van 6 x 6 m.
- E. Op termijn zijn alle drie de concepten rendabel met een afschrijvingstermijn van ca. 6-7 jaar (uitgangspunt 7).



Figuur 3.3. Schets van het concept Fresnellenskas 4x5m met een asymmetrische kap en lineaire Fresnellenzen geïntegreerd als kanaalplaat (lichtblauw aangegeven).

Het te ontwikkelen concept is niet alleen geschikt voor de teeltruimte maar ook bijzonder geschikt voor het dak van de bijgebouwen. In de werkruimte kan dan gebruik gemaakt worden van natuurlijk licht en afgeschermd directe straling waardoor een aangenaam werkklimaat ontstaat.

3.3 Metingen aan de lenzen

De belangrijkste parameter van Fresnellenzen voor tuinbouwtoepassing is de transmissie voor loodrecht (τ_p) en diffuus (τ_d) opvallend licht en de eigenschappen van de lens bij niet loodrechte lichtinval. De lichttransmissie van de lineaire en de gewone Fresnellens is gemeten met de grote integrerende bol van Wageningen UR Glastuinbouw. Daarbij is ook gekeken of de lens met de ene zijde of de andere zijde naar het licht gekeerd andere eigenschappen heeft (positie normaal en omgekeerd). De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.1. Voor diffuus opvallend licht is de transmissie van de lineaire Fresnellens en aan de rand van de gewone Fresnellens 2-3% lager dan bij standaard glas (83%). In het midden van de gewone Fresnellens is de transmissie van diffuus licht hoger namelijk 81,3% in de normale positie en 83% in omgekeerde positie. Voor loodrecht opvallend licht (LR) is de transmissie in alle gevallen (3-8%) hoger dan normaal glas (ca.90%). In het midden is de toename minder (3-4%) dan aan de rand (toename 4-8%). Omdat het oppervlak aan de rand ca. 6x groter is als in het midden zal dit voor de gemiddelde waarde van de gehele plaat zwaarder mee wegen. We krijgen dan voor de normale Fresnellens voor diffuuslicht een gemiddelde waarden van: 80,7 en 80,8% voor respectievelijk de normale en omgekeerde positie. Voor loodrecht opvallend licht wordt deze respectievelijk: 96,2 en 95,9.

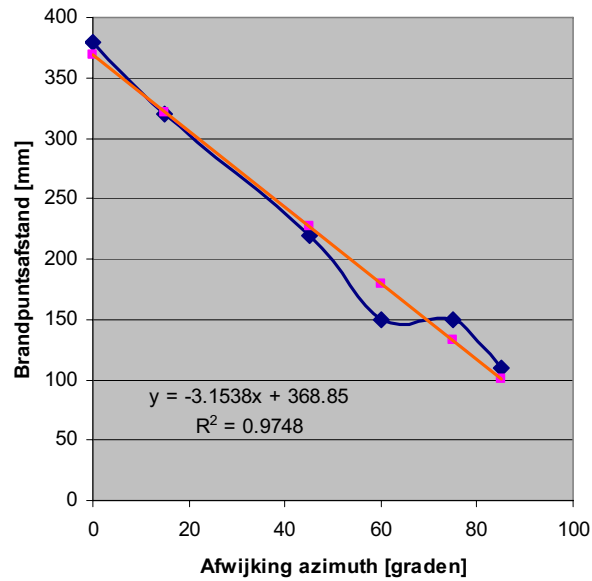
Tabel 3.1. Overzicht meetresultaten Fresnellenzen.

Lens type	Afmeting	Brandpunt Positie afstand		Rand		Midden	
				τ_p (LR)	τ_d (Diff)	τ_p (LR)	τ_d (Diff)
Lineair Fresnel PMMA JB	1200 x 400	350	normaal			94	80,8
Lineair Fresnel PMMA JB		350	omgekeerd			93,6	79,9
Normaal Fresnel PPMMA RHK	1400x1050	1200	normaal	96	79,9	93	81,3
				96,9	81		
				96,3	80,2		
				97,8	81,7		
				96,4	80,8		
Normaal Fresnel PMMA RHK		1200	omgekeerd	96,4	80,8	92,5	83,3
				96,8	80		
				96,9	80,4		
				95,9	80,1		

Van beide lenzen is de invloed gemeten van niet loodrecht invallend licht. Bij de normale Fresnellens wordt het brandpunt bij niet loodrechte inval sterk vergroot en onbruikbaar. Bij loodrechte inval is de diameter van het brandpunt 35 mm. De maximale concentratie factor kan berekend worden met: $C = \text{afmeting lens} / \text{grootte brandpunt}$; $C = 1400 \times 1050 / 35^2 = 1200$. Bij de lineaire Fresnellens type JB is de breedte van de brandlijn constant 5 mm als de invalshoek afwijkt in de richting van de groeven van de lens (azimut). De maximale concentratie factor is hier breedte van de lens/breedte van de brandlijn dus $C = 400 / 5 = 80$. De afstand van de brandlijn loodrecht vanaf de lens (ook brandpuntafstand genoemd) verandert volgens de in Tabel 3.2 aangegeven waarden. In Figuur 3.4 is deze verandering van brandpuntafstand in grafiekvorm weergegeven. Bij invalshoeken die afwijken loodrecht op de groeven van de lens (elevatie) blijft de spotbreedte eveneens constant. Echter bij invalshoeken groter dan 45° treden er chromische aberraties op. Bij een elevatie afwijking van 30° neemt bij deze lens de brandpuntsafstand toe naar 400mm. Voor beide lenzen geldt dat deze niet bruikbaar zijn voor kastuinbouw. De breedte van de lineaire lens is te klein (0,4m) en de normale lens RHK (zie Tabel 3.1) heeft geen goed focuspunt bij elevatie en azimut afwijkingen. Daarom is een derde lineaire Fresnellens PP getest met betrekking tot brandpuntafstand en ligging van het brandpunt bij verschillende afwijkingen van elevatie en azimut. De concentratiefactor van deze lens was: $C = 1000 / 15 = 66,7$. De brandpuntafstand (loodrecht vanaf de lens) vermindert volgens de in Tabel 3.3 aangegeven waarden.

Tabel 3.2. Lineair Fresnel PMMA JB 1200 x 400.

Azimut afwijking	Spot breedte [mm]	Brandpunt Afstand [mm]
0	5	350
15	5	320
45	5	220
60	5	150
75	5	150
85	5	110



Figuur 3.4. Effect van afwijkingen op de azimuth hoek op de brandpuntsafstand van de lineaire Fresnellens type JB (blauwe lijn; rode lijn is de beste lineaire fit).

De resultaten van de normale Fresnellens zijn opmerkelijk verschillend van een eerdere test van een circulaire Fresnellens van Spindler & Höyer, Type OSGL- 6009, F=310mm, D=380mm zoals aangegeven in Tabel 3.3. Het brandpunt=5mm dus de maximale concentratie factor: $C=380^2/5^2=5776!$

Tabel 3.3. Fresnellens van Spindler & Höyer.

Invalshoek	Spot breedte [mm]	Spot breedte* [mm]
0		
30	80	50
45	120	80
60	160	90

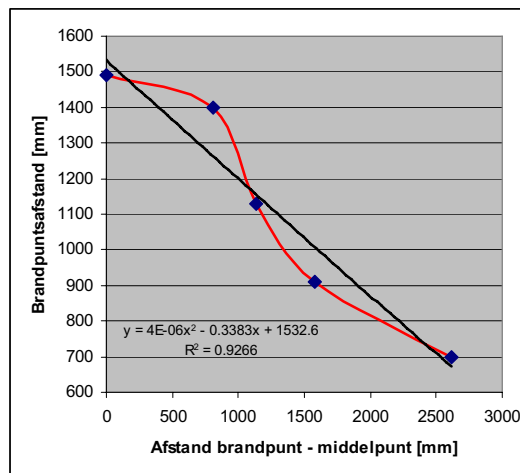
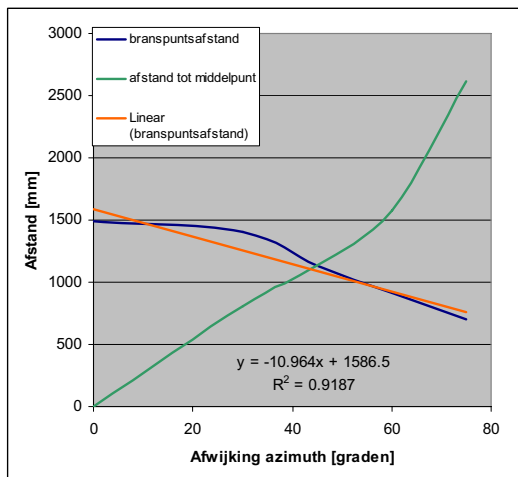
*) Als concentratiefactor teruggebracht wordt tot 100 x focuseren.

Tabel 3.4. Lineair Fresnel PMMA PP 1000 x 1000.

Azimuth afwijking	Lijnbreedte [mm]	Brandpunt Afstand [mm]
0	15	1490
30	15	1400
45	15	1130
60	15*	910
75	15*	700

*) Bij deze hoeken treden er chromische aberraties op.

De gegevens van de lineaire lens PP zijn samengevat in Tabel 3.4. Bij een elevatie afwijking van 30° neemt bij deze lens de brandpuntsafstand toe naar 1750mm. Afwijkingen in de azimuth staan vermeld in Tabel 3.4 en Figuur 3.5a/b. In Figuur 3.5a is tevens de evenwijdige afstand middelpuntbrandpunt van deze lens weergegeven. Uit deze gegevens is de baan van het brandpunt bij variërende invalshoeken te bepalen. Deze baan is weergegevens in Figuur 3.5b.



Figuur 3.5a. Effect van afwijkingen op de azimuth hoek op de brandpuntsafstand (blauwe lijn; rode lijn is de beste lineaire fit) en verschuiving van het brandpunt (groene lijn) van de lineaire Fresnellens type PP.

Figuur 3.5b. Baan het brandpunt (rode lijn; zwarte lijn is de beste fit) van de lineaire Fresnellens type PP.

Bij alle normale Fresnellenzen blijkt een sterke verbreding van het brandpunt op te treden bij niet loodrechte inval. Daarnaast is de montage, koeling en elektrische aansluiting van de vele (kleine) collectoren in de afzonderlijke brandpunten van normale Fresnellenzen complex. Lineaire Fresnellenzen vertonen een constante breedte van de brandlijn en de positie van de brandlijn bij invalshoeken die afwijken van loodrechte inval zijn redelijk eenvoudig volgbaar. Daarnaast is de montage, koeling en elektrische aansluiting van PV strips relatief eenvoudig. Daarom is gekozen voor een lineaire Fresnellens type bij de verdere ontwikkeling. Gezien de beste eigenschappen is gekozen voor het type PP.

3.4 Afdek materiaal en energieopbrengst

Aan de hand van Figuur 3.1 zijn tevens de energietotalen in de globale, directe en diffuse straling per jaar bepaald. Deze zijn in Tabel 3.5 weergegeven. In deze tabel is tevens de gemiddelde transmissie van de kasconstructie voor directe straling weergegeven en de rendementen van de Silicium en triple junctie PV cellen.

Tabel 3.5. Stralingsom per jaar, transmissie en rendement gegevens.

Item	Aandeel
Totale globale straling	3560 MJ/m ²
Totaal aandeel directe straling	1100 MJ/m ²
Totaal aandeel Diffuse straling	2460 MJ/m ²
Transmissie kasconstr. directe straling	80%
Rendement PV Si-cel	15%
Rendement PV Triple junctie cel	30%

Voor de afdekking zijn verschillende mogelijkheden beschouwd met verschillende lichttransmissies. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Lichttransmissies en geschatte jaaropbrengst op basis van lichttransmissie en hoeveelheid directe straling.

Type afdekking	Transmissie Loodrecht (%)	Transmissie diffuus (%)	Transmissie kas Loodrecht (%)	Jaaropbrengst Elektrisch [kWh/m ²]	
				Si-PV cel	Tri-j-cel
Enkele PMMA Fresnellens	93	81	74	53	106
PMMA Fresnellens als kanaalplaat	81	70	64	45	90
PMMA Fresnellens tussen dubbelglas	53	57	42	30	61
PMMA Fresnellens gelamineerd tussen AR gecoat dubbelglas	90	82	72	51	102

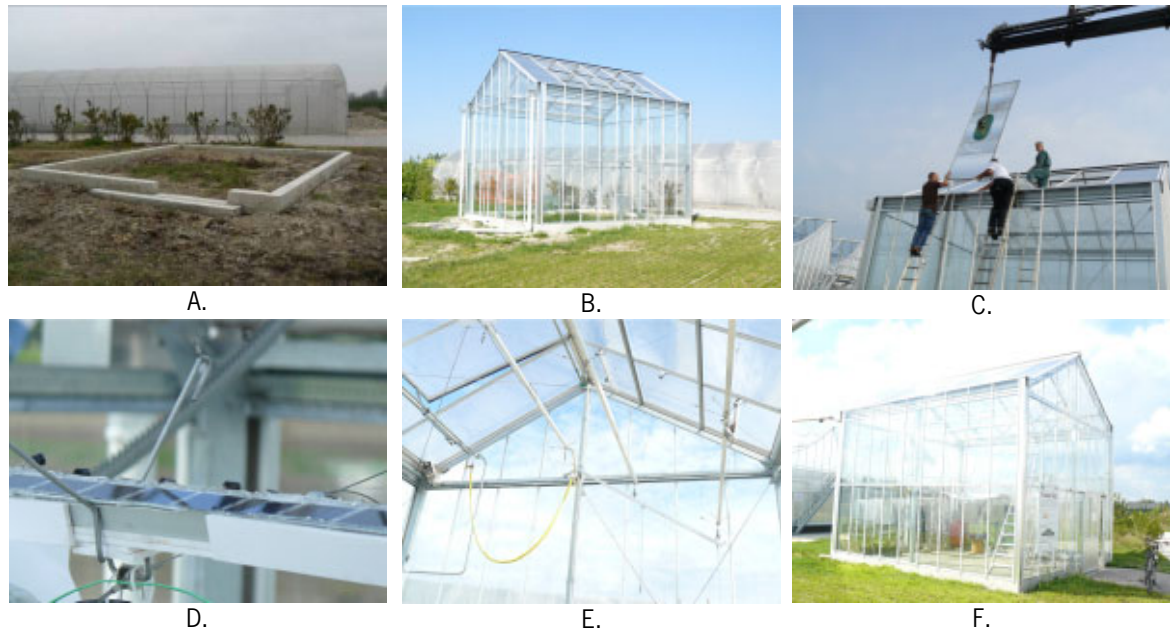
Door niet ideale omstandigheden, zoals grote invalshoeken en vervuiling, zal de totale jaaropbrengst in de praktijk lager zijn. Echter de bijdragen van het wel gefocusseerde deel van de diffuse straling zullen de opbrengst juist verhogen.

3.5 Conclusies ontwerp

In dit hoofdstuk is de invallende stralingshoeveelheid voor de Nederlandse situatie geanalyseerd. Verder is de lichttransmissie voor direct en diffuus licht van de verschillende Fresnellenssystemen gemeten en ook de posities van het brandpunt bij verschillende invalshoeken. Voor loodrecht opvallend licht blijkt de lichttransmissie hoog te zijn namelijk tussen 92-98%. Voor diffuus licht liggen de transmissiewaarden tussen 80-83% wat vergelijkbaar is met enkel glas. De Fresnellens is bij de concept kas geplaatst tussen dubbelglas omdat hierdoor de lens goed beschermd is tegen condensatie, water en vuil. Als de kunststof lens als laag op het glas wordt aangebracht (gelamineerd) en bovendien alzijdig een AR coating wordt aangebracht dan zal dit resulteren in 70% extra elektrische energie opbrengst en ruim 70% meer licht in de kas. Aan de hand van Nederlandse stralingsgegevens en het type afdekkingsmaterialen is de huidige opbrengst met Silicium PV cellen bepaald op ca. 29 kWh/m² per jaar. Door het toepassen van Ar gecoatglas en laminatie van de lenzen op het glas kan de opbrengst toenemen tot 49 kWh/m² per jaar. Wanneer er GaAs PV (triplejunction) cellen gebruikt worden kan de opbrengst toenemen tot ca. 100 kWh/m² per jaar. Een lineaire Fresnellens blijkt het beste te voldoen aan de gestelde eisen. Bij het basisconcept wordt daarom uitgegaan van een kas met lineaire Fresnellenzen geplaatst in de oostwest richting met een oriëntatie naar het zuiden. Uit de stralingsgegevens is tevens afgeleid dat tot 78 % van de invallende zonnestraling kan worden weggeschermd met een Fresnellenskas op een heldere dag. Om dit te bereiken is het nodig dat de collector voldoende breed is om de gefocusseerde straling te onderscheppen.

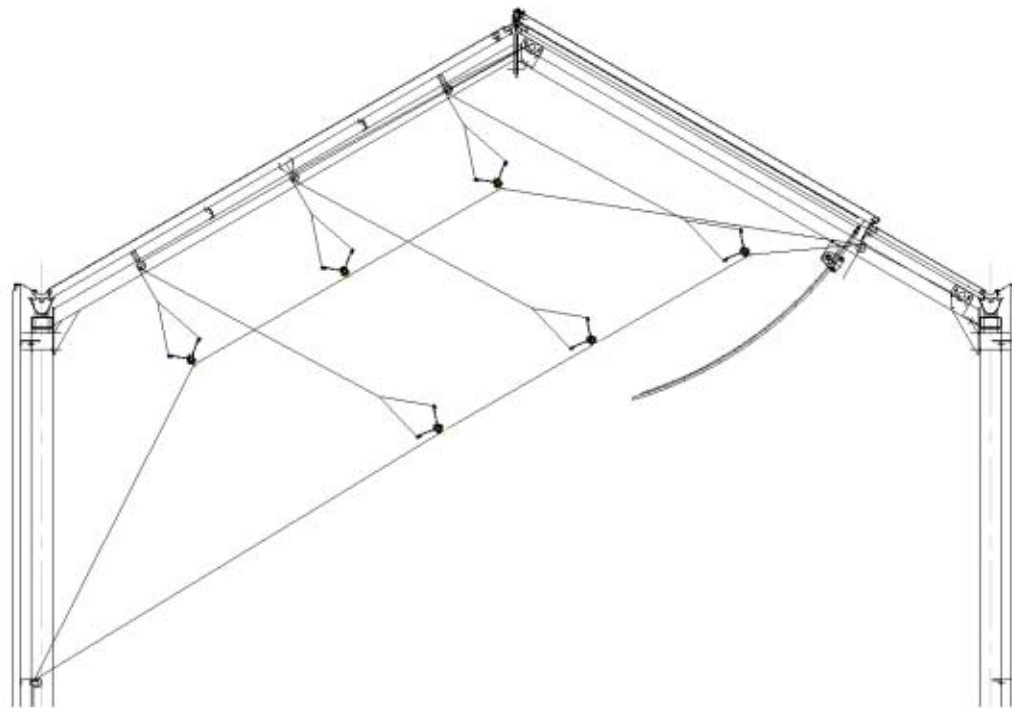
4 Bouw van de Fresnelkas

In maart 2008 werd begonnen met de opbouw van de Fresnelkas en is de betonnen vloer gestort. De onderstaande foto's in Figuur 4.1 geven de verschillende stadia aan tijdens de bouw.



Figuur 4.1. A. Betonnen fundering; B. Opbouw constructie; C. Plaatsing van de Fresnellenzen (geplaatst tussen dubbelglas); D. Detail zonnecel module; E. De drie collectors van het systeem; F. De complete kas.

De voorgemonteerde constructie is in mei 2008 opgebouwd (foto in Figuur 4.1B). De kas heeft een goothoogte van ca. 4,00 m en bestaat uit één kap van 5,36 x 5,64m. De zijwanden bestaan uit enkel glas. Voor deze proefkas is gekozen voor een symmetrisch kasdek omdat anders het gevaar bestond dat bij dit type lens niet alle posities van het brandpunt bereikt kunnen worden en het brandpunt op het kasdek kan vallen. Het kasdek bestaat uit: aan de zuidzijde vier panelen dubbelglas van 3x1m met daarin 3 lineaire Fresnellenzen geplaatst, totaal 12 lenzen (foto Figuur 4.1C en D). Iedere Fresnellens heeft een brandlijn met een breedte van ca. 15mm. De bijbehorende concentratiefactor is 66x. Deze panelen zijn met een kraan op de kas getild en gemonteerd (foto Figuur 4.1C). In de rest van het dak zijn 12mm kanaalplaten gemonteerd. Als laatste zijn de watergekoelde zonnecel modules aan de beweegbare armen gemonteerd. Per strip zijn dertig monokristalijne NR zonnecellen in serie geschakeld tot een totale lengte van 1,55m. Ze zijn geschikt voor de concentratiefactoren tot 100x en zijn uitgevoerd met parallel geschakelde diodes. Hierdoor kan de stroomlevering doorgaan als één of meer van de cellen in de schaduw komt door spanten en/of glasroedes. De details van de ophanging en sturingsconstructie van de zonnecel modules zijn in Figuur 4.2 weergegeven. Elk van de modules hangt aan drie staalkabels die op dezelfde as gerold zijn en met één motor in hoogte versteld kan worden.



Figuur 4.2. Dwarsdoorsnede van de kap met details van de ophanging- en sturingsconstructie van de zonnecel modules, waarbij de laagste en hoogste stand van de modules is aangegeven.

Met een tweede motor kan de module in horizontale richting (noordzuid) verplaatst worden waardoor de module in de brandlijn van de lineaire lenzen gepositioneerd kan worden. Ook voor de horizontale verplaatsingen zijn drie staalkabels per module geplaatst, die op één as opgerold worden, waarbij de drie modules onderling met staalkabels doorverbonden zijn. Om voldoende spanning op de staalkabels te houden is de kabel aan de andere zijde voorzien van een contragewicht. De beide driefasen motoren zijn in snelheid regelbaar met een frequentieregelaar. De drie modules met de waterkoeling zijn weergegeven op foto in Figuur 4.1E. Het eindresultaat wordt weergegeven op de foto in Figuur 4.1F. De details van het meetsysteem zijn weergegeven in Appendix 2 (H8). Op 31 juli hebben de eerste metingen plaatsgevonden van de energieopbrengst van de Fresnelkas.

5 Metingen en opbrengst bepaling

5.1 Positieregeling

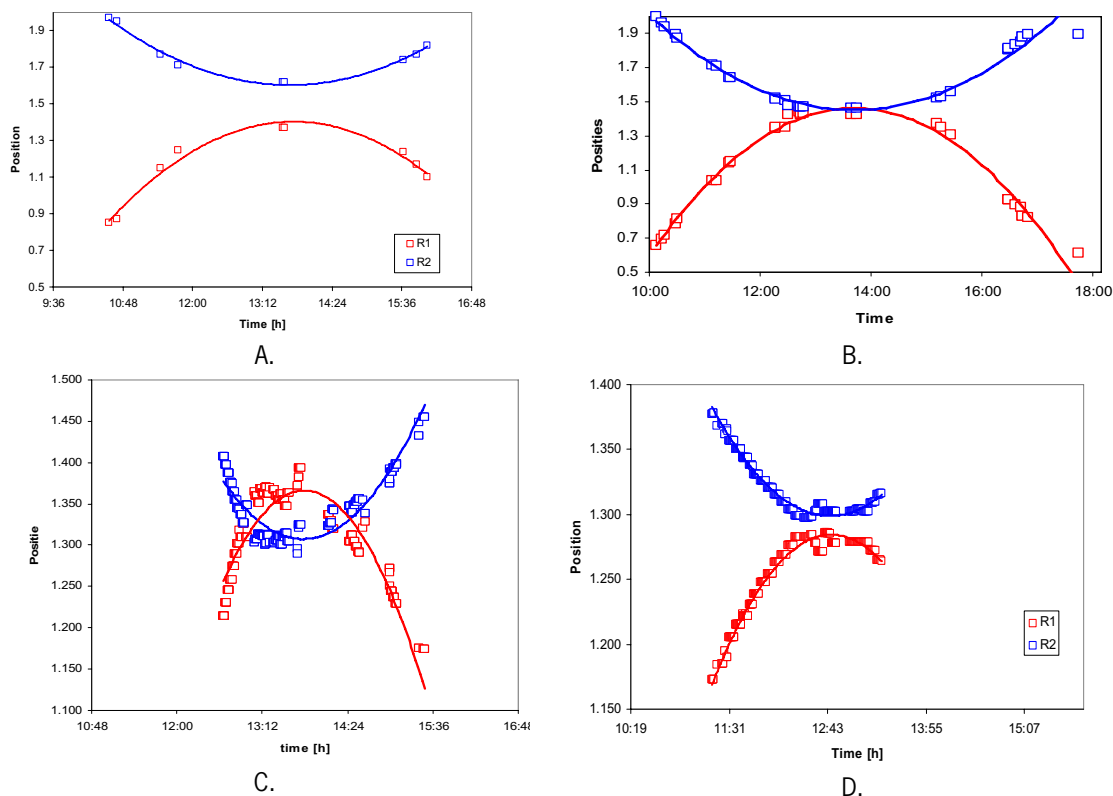
Om een zo hoog mogelijke energieopbrengst te halen moet de strip met zonnecellen zich continu in het brandpunt (of brandlijn) van de Fresnellens bevinden. Uit metingen is een grove indicatie van het brandpunt beschikbaar maar door de relatief hoge concentratiefactor is de brandlijn smal waardoor een hoge nauwkeurigheid vereist is. Bovendien is de werkelijke brandlijn van de lens waarschijnlijk niet de locatie waar de cellen de meeste opbrengst geven omdat zonnecellen gelijkmatig belicht moeten worden. Een goede en praktische manier om de optimale positie van de cellen te bepalen is een regeling die uitgaat van de maximale opbrengst. Door in een korte tijd een gebied rondom het werkelijke brandpunt te doorlopen en simultaan het elektrisch vermogen te meten wordt het optimale brandpunt bepaald. Bij het ontbreken van direct licht (bewolking) zal het verschil tussen het maximaal en minimaal gemeten vermogen gering zijn. Op deze manier kan gedetecteerd worden of er direct licht is en positionering nodig is.

Voor de metingen in hoofdstuk 5 is een positieregeling ontwikkeld die volgens bovenstaand principe elke 2 minuten de optimale positie bepaald. Op momenten waarbij er geen direct licht is wordt de positie niet veranderd. Samen met de actuele tijd worden de posities van beide motoren opgeslagen in een tabel. Gestart wordt met een lege tabel die in de loop van de tijd geheel gevuld wordt. Bestaande waarden in de tabel worden overschreven zodat de tabel altijd de meest actuele informatie bevat en waardoor de regeling zelflerend wordt. Bij een heldere dag zal de tabel al na 1 dag geheel gevuld zijn, bij wisselvallig weer zal dit veel langer duren.

Aan het einde van elke dag wordt de tabel gekopieerd naar een dagspecifieke tabel. Deze tabel kan dan het volgende jaar op dezelfde dag gebruikt worden voor positie bepalen. Het zoeken van de optimale positie zou dan overbodig zijn.

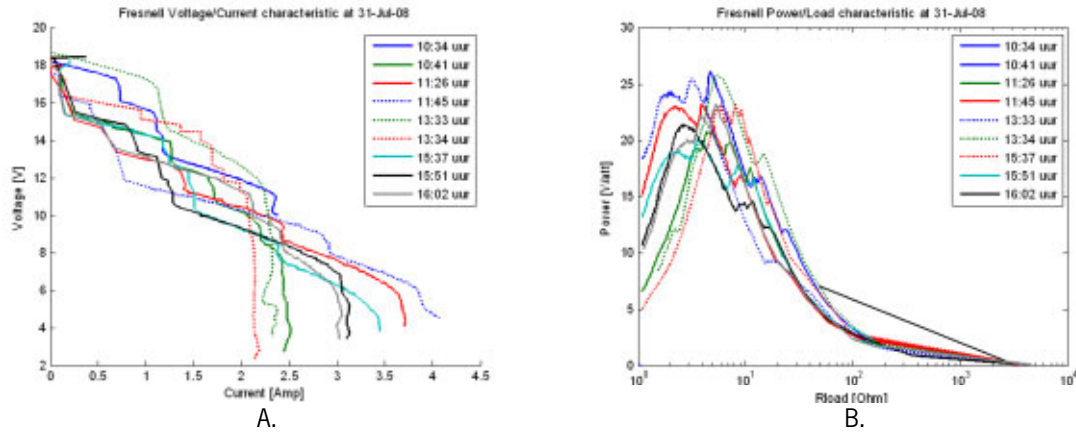
5.2 Meting van dagopbrengsten

In Figuur 5.1 zijn de posities van de twee motoren weergegeven waarbij de module optimaal in het brandpunt van de Fresnellens geplaatst is. Er is op vier dagen gemeten namelijk: 31 juli, 15 augustus, 10 september en 18 september 2008. De rode lijn (R1) geeft de positie van motor die verticale beweging stuurt en de blauwe lijn (R2) de positie van de motor die de horizontale beweging stuurt. Uit deze figuren blijkt dat de module 's morgens vroeg en 's middags laat in dezelfde positie staan namelijk dicht bij de Fresnellens in de meest zuidelijke richting. De meting op 18 september heeft geheel automatisch plaats gevonden. D.w.z. de besturingssoftware houdt de module in het brandpunt door de monitoring van het uitgangsvermogen.

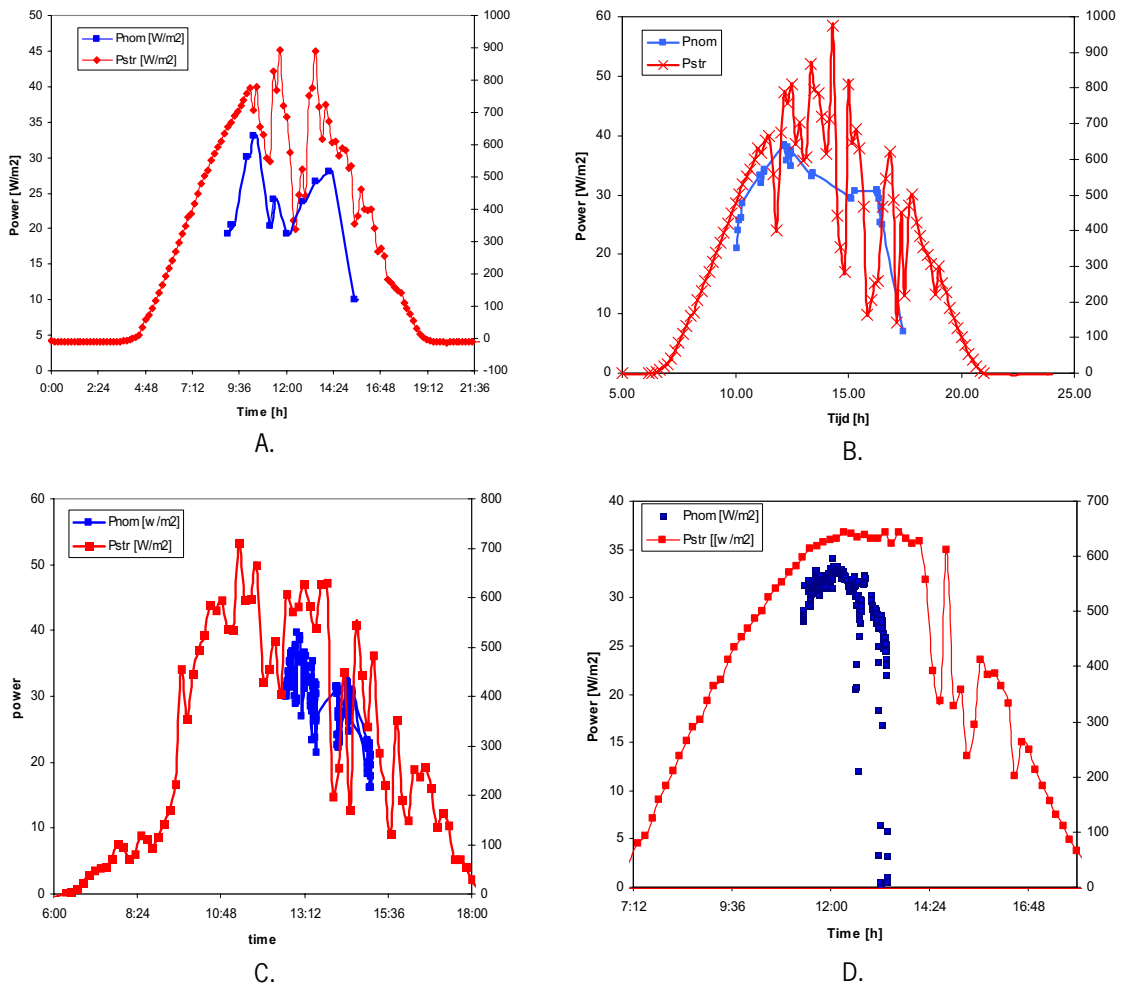


Figuur 5.1. Beide motorposities van de positieregeling waarbij de module in het brandpunt gehouden wordt voor vier verschillende dagen: A. 31 juli 2008; B. 15 aug. 2008; C. 10 sept. en 18 sept. 2008. R1 is de positie van motor die de verticale beweging stuurt en R2 is de positie van de motor die de horizontale beweging stuurt.

Op de eerste meetdag 31 juli zijn de stroomspanningcurves gemeten en de belastingscurves voor de bepaling van het maximum uitgangsvermogen en de fill-factor (verhouding van reëel uitgangsvermogen en uitgangsvermogen op basis van open celspanning en kortsluitstroom) van de PV module. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5.2A en B. De onbelaste celspanning is 18 V. Uit Figuur 5.2A blijkt dat de stroom-spanningskarakteristiek met stappen van ca. 1,2V daalt bij toenemende belasting. Dit ontstaat door onderbelichte cellen in de module waardoor de module-spanning met 0,6 V daalt (één cel) vermeerderd met het spanningverlies over de parallel geschakelde diode (verlies over één diode). Hierdoor ontstaat een vrij lage fill-factor van ca. 50%. Bij verdere optimalisatie van de diodes en posities van de cellen is de verwachting dat de fill-factor toeneemt tot ca. 70%.



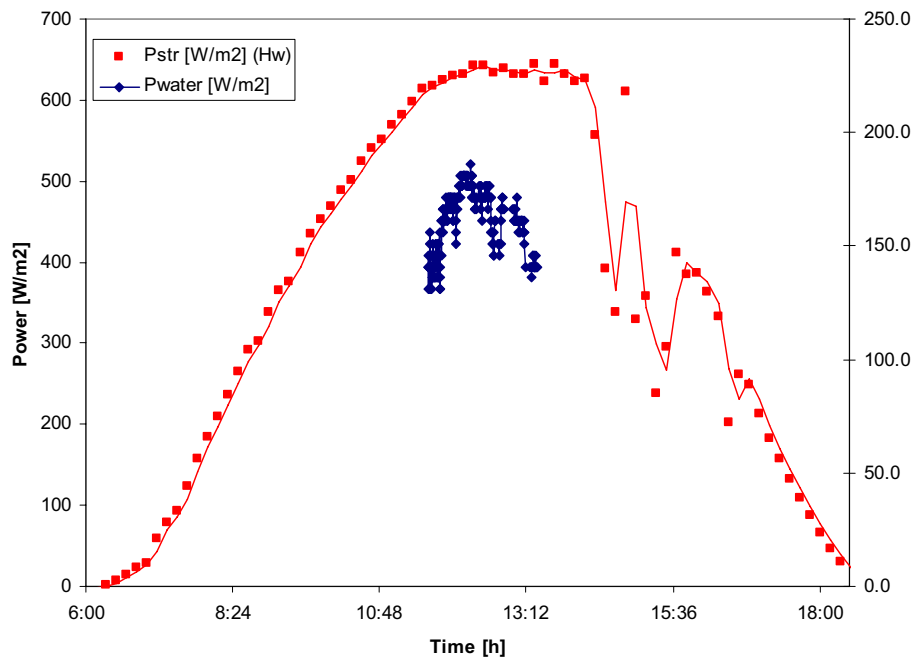
Figuur 5.2. A. Spannings-stroom curve van de module in de Fresnelkas; B. Uitgangsvermogen als functie van de belastingsweerstand.



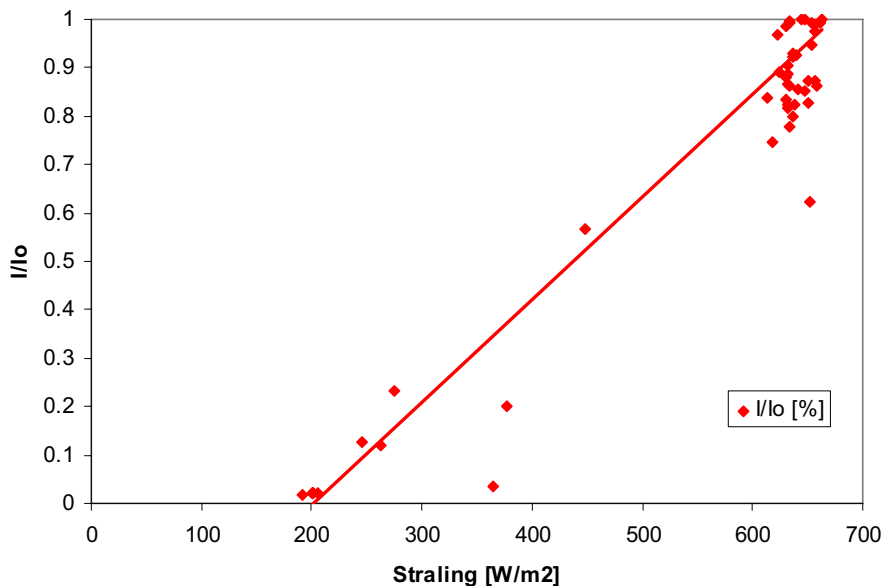
Figuur 5.3. Het opgewekt elektrisch vermogen (P_{nom}) en instraling (P_{rad}) als functie van de tijd op: A. 31 juli 2008; B.15 aug. 2008; C. 10 sept. 2008 en 18 sept. 2008.

In Figuur 5.3 is voor vier dagen, namelijk 31 juli 2008, 15 aug. 2008 en 10 sept. 2008, het opgewekte elektrische vermogen en de globale straling als functie van de tijd weergegeven. Het elektrische vermogen is bepaald uit de open celspanning (V_{oc}), de kortsluitstroom (I_{sc}) en een fill-factor van 70%. Bij de meting op 18 september is de zonnecel

module met de software automatisch in het brandpunt gehouden. Uit Figuur 5.3 blijkt dat de periode van energie-opwekking korter wordt voor de weergegeven vier dagen door de dalende elevatiehoek van de zon van 31 juli tot 10 september. Deze periode kan verlengd worden door een verbetering in de ophangconstructie van de PV-modules.



Figuur 5.4. Het opgewekt thermisch vermogen (P_{water}) en instraling (P_{rad}) als functie van de tijd op 18 sept. 2008.



Figuur 5.5. Effect van bewolking op het opgewekte vermogen.

Tabel 5.1. Gegevens van maximum stralingsniveau (P_{str}), directe aandeel (P_{dir}), directe straling in de kas ($P_{dir-inkas}$), het nominaal elektrisch vermogen (P_{nom}) en het berekende PV omzettingsrendement.

Parameter/meetdatum	15 aug. 2008	15 aug. 2008	10 sept. 2008	18 sept. 2008
P_{str} [W/m ²]	790	670	610	645
P_{dir} [W/m ²] (69% van P_{str})	462	462	421	445
$P_{dir-inkas}$ [W/m ²] (70% van P_{str})	342	324	295	311
P_{nom} [W/m ²]	34	35	40	34
PV Rendement [%]	10,8	10,8	13,6	10,9

Tabel 5.2. Gegevens van maximum stralingsniveau (P_{str}), directe aandeel (P_{dir}), directe straling in de kas ($P_{dir-inkas}$), het thermisch vermogen (P_{th}) en het berekende PV omzettingsrendement.

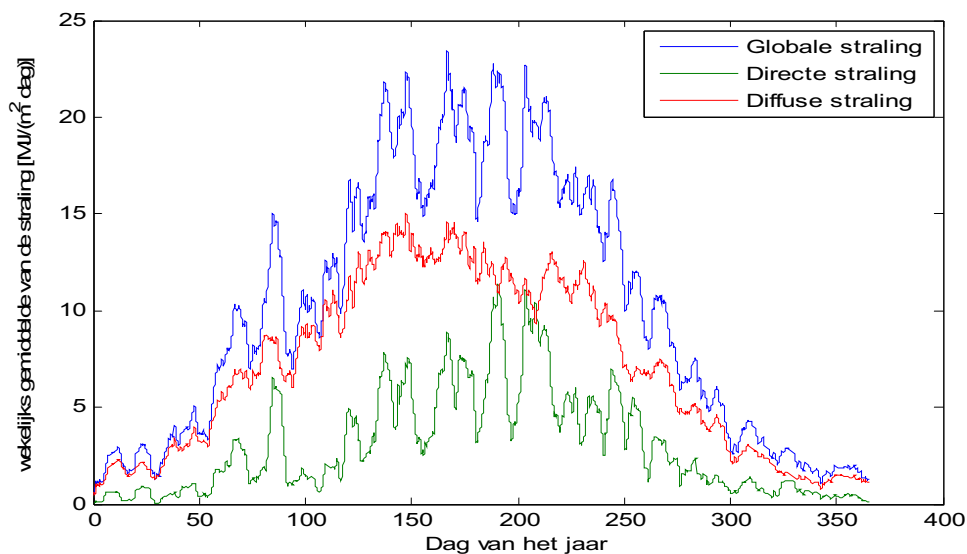
Parameter/meetdatum	18 sept. 2008
P_{str} [W/m ²]	645
P_{dir} [W/m ²] (69% van P_{str})	445
$P_{dir-inkas}$ [W/m ²] (70% van P_{str})	311
P_{them} [W/m ²]	170
Thermisch Rendement [%]	55

In Tabel 5.1 is een samenvatting gegeven van het maximum stralingsniveau (P_{str}), directe aandeel (P_{dir}) van de straling en het directe aandeel van de straling in de kas ($P_{dir-inkas}$). Uit het nominaal opgewekte elektrisch vermogen (P_{nom}) is het celrendement bepaald. De gemiddelde waarde is 11%. Gezien het feit dat de beste silicium cellen momenteel een rendement kunnen hebben van maximaal 21% is het rendement van de cellen vrij laag. Hier is nog ruimte voor verbetering. Voor een cel rendement van 15% is het geleverde vermogen 60W/m². Het opgewekte thermisch vermogen is op 18 september bepaald uit het temperatuursverschil van het water en het waterdebiet. Het meetresultaat is weergegeven in Figuur 5.4. De analyse van het thermisch vermogen is in Tabel 5.2 weergegeven. Hieruit blijkt een rendement van de gegenereerde thermische opbrengst van ca. 55%.

Uit de gegenereerde data is een verband tussen opgewekte stroom (en dus vermogen) en het stralingsniveau. Hiertoe is gedurende korte tijd het effect gemeten van opkomende bewolking. Het resultaat is in Figuur 5.5 weergegeven. Er blijkt een 'offset' van ca. 200 W/m² waaronder geen vermogen meer opgewekt wordt. Daarna neemt het opgewekte vermogen nagenoeg lineair toe met het stralingsniveau. Deze informatie wordt gebruikt voor de bepaling van de jaaropbrengst.

5.3 Bepaling van jaaropbrengsten

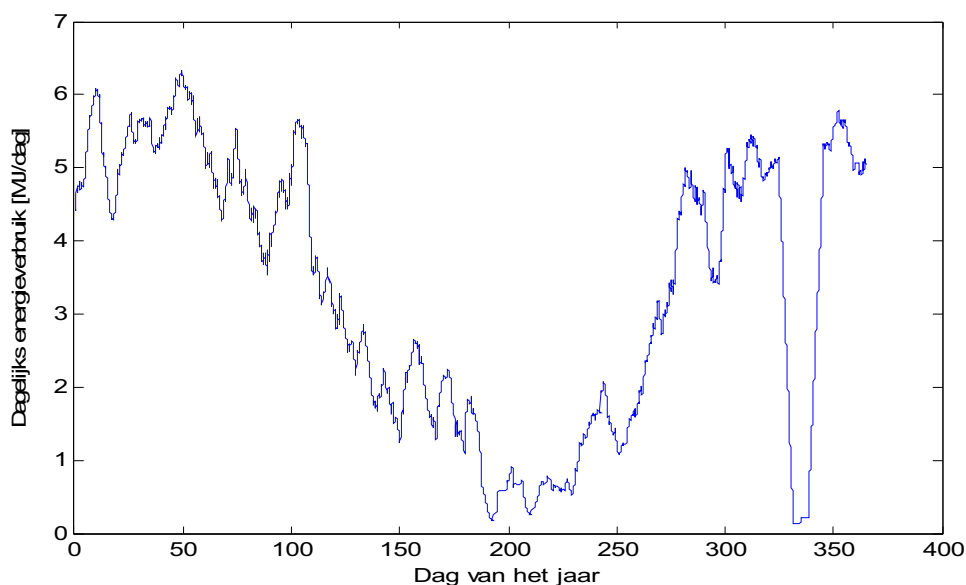
5.3.1 Stralingsgegevens



Figuur 5.6. *Dagelijkse gemiddelde stralingsom over het jaar gemeten in De Bilt.*

In hoofdstuk 3 zijn de weergegevens geanalyseerd. Figuur 3.1 gaf daarbij de wekelijks gemiddelde dagsom van de instraling. Deze figuur wordt in Figuur 5.6 nogmaals weergegeven. De som van de directe straling vormt gemiddeld 29.6% van die van de globale straling. De totale globale straling is 3.65 GJ daarvan is dus 1.08 GJ directe straling.

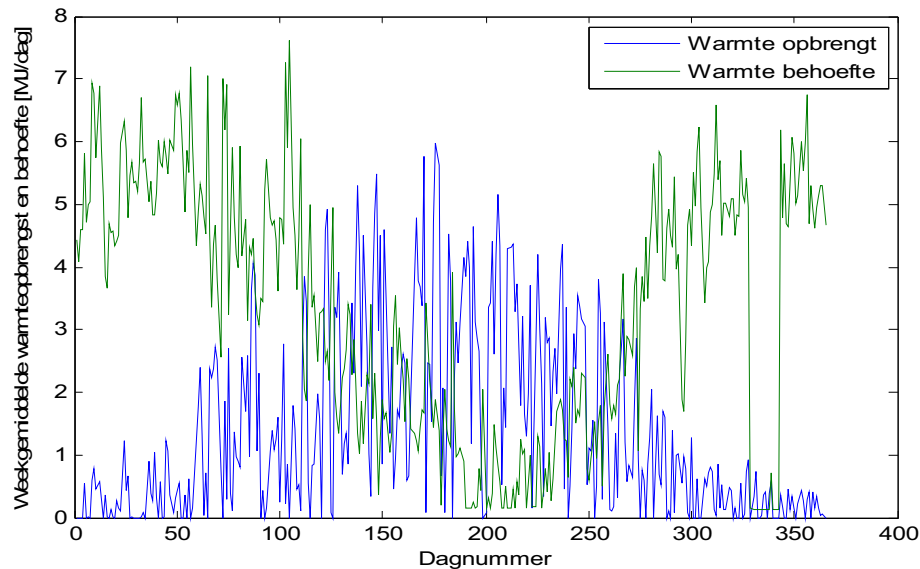
5.3.2 Warmtebehoefte van een tuinbouwkas



Figuur 5.7. *Dagelijks energieverbruik per vierkante meter van een standaard tuinbouwkas (tomatenteelt) met een energiescherm.*

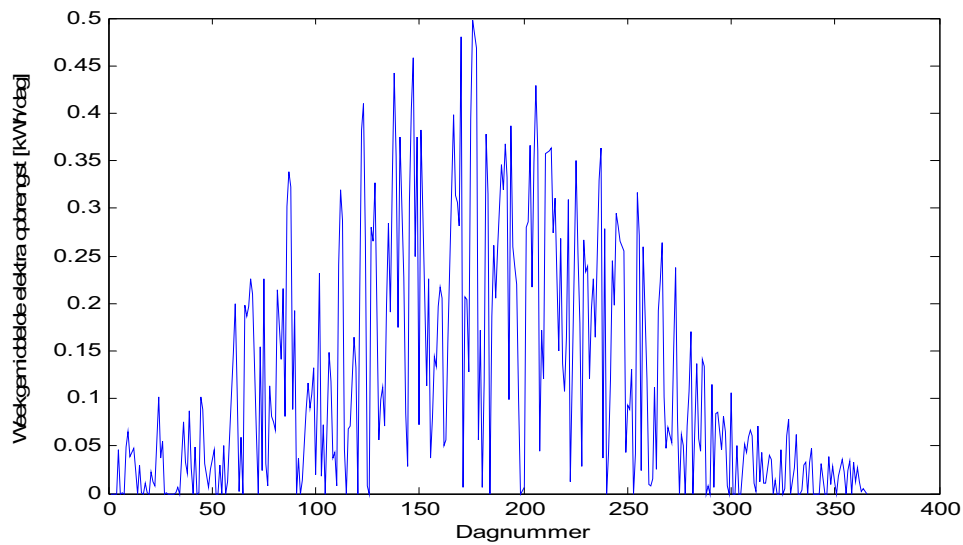
In Figuur 5.7 is het dagelijkse energieverbruik over het jaar weergegeven van een tuinbouwkas met tomatenteelt en een energiescherm. Het totale energieverbruik is 1.24 GJ. Dit is ongeveer 40 kubieke meter aardgas wat een gemiddeld verbruik is voor een tomatenteelt in een kas met een energiescherm.

5.3.3 Afstemming vraag en aanbod



Figuur 5.8. *Dagelijkse warmteopbrengst van de collector en de warmtebehoefte van de kas over het jaar.*

Het aanbod van zonnewarmte welke wordt gewonnen door de directe straling te concentreren op de collector en deze te koelen, moet worden afgestemd op de warmtevraag ofwel de warmtebehoefte van de kas. Figuur 5.8 laat de opbrengst van de collector en de warmtebehoefte van de kas over het jaar zien. Bij deze berekening zijn we ervan uitgegaan dat 70% van het directe zonlicht op de collector komt zoals in Tabel 5.1 aangegeven. Van deze onderschepte straling kan 55% worden omgezet in bruikbare warmte (Tabel 5.2). Totaal wordt dus 39% van het directe zonlicht in warmte omgezet. De hoeveelheid directe straling is berekend uit de globale straling waarbij Figuur 5.8 is gebruikt. In de berekening is aangenomen dat bij minder dan 30% van de maximale globale straling afhankelijk van de periode van het jaar zoals in Figuur 5.8 weergegeven, er geen stroom wordt opgewekt. Indien de straling meer dan 100% van de maximale straling is wordt de maximale hoeveelheid warmte gegeneerd. In het tussengebied verloopt de opbrengst lineair. Op basis van een meting die weergegeven is in Figuur 5.6 wordt 60% van deze zonnestraling effectief omgezet. In de winter kan een deel van zonnewarmte direct worden toegepast voor de verwarming van de kas. Dit bedraagt 52 MJ. Hierbij zijn de warmteverliezen van de collector naar de omgeving niet meegenomen. Met een dagbuffer kan 298 MJ worden ingezet en met een weekbuffer 344 MJ. De benodigde opslag capaciteit is voor het geval een weekbuffer wordt gebruikt, 16 MJ. Dit houdt in dat er een waterbuffer van 190 liter per vierkante meter kas nodig zou zijn om de warmte op weekbasis met een temperatuurverschil van 20 K op te slaan, ofwel 1900 m³ per ha. De maximale hoeveelheid zonnewarmte die per vierkante meter kan worden ingevangen bedraagt 518 MJ (144 kWh). Met een seizoensopslag systeem zou theoretisch 50% van de warmtebehoefte van de kas hiermee kunnen worden ingevuld. Door verliezen in de seizoenbuffer zal dit percentage lager uitvallen. Dit is ogenschijnlijk nemend en het feit dat een groot deel van de warmte direct gebruikt kan worden als een dagbuffer wordt gebruikt maakt dat een seizoenbuffer voor alleen het opslaan van de warmte van de collector niet economisch rendabel is. Ook een weekbuffer is vanwege de vereiste omvang en de relatief lage frequentie van vullen en legen niet rendabel. Opslag in een dagbuffer is wel rendabel.



Figuur 5.9. De dagelijkse elektraopbrengst van de collector over het jaar.

Figuur 5.9 geeft de jaarlijkse elektriciteitsopbrengst zien. Totaal wordt er 29 kWh per m² Fresnel oppervlak opgewekt.


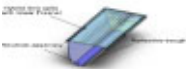
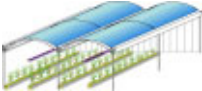

6 Conclusies

Voor de sierteelt is afvlakken van de lichtintensiteit gewenst. Met een Fresnellens kan de directe straling worden gefocuseerd op een collector om te worden omgezet naar elektrisch vermogen en thermische warmte. Met de doorgelaten diffuse straling en eventueel een te regelen deel van niet in te vangen directe straling kan het voor het betreffende gewas optimale lichtniveau worden ingesteld. Verschillende Fresnellens kassystemen zijn in hoofdstuk 2 met elkaar vergeleken en het economisch perspectief is geschetst. Met normale Fresnellens of modulaire systemen kunnen hoge concentratiefactoren bereikt worden (ca. 1000x), met Lineaire lenzen of booglenzen is deze lager (ca. 100x) maar dit is ruim voldoende voor kastoepassing. Op korte termijn is de kas met lineaire lenzen en een collector met PV cellen technisch het meest haalbaar. De collector is bij deze lenzen gemakkelijker in het brandpunt te houden en de afmeting van het brandpunt bij invallende straling met een invalshoek die afwijkt van loodrecht blijft constant. Bovendien is de montage en aansluiting minder complex. Lineaire Fresnellens en PV cellen zijn reeds op de markt verkrijgbaar. Wanneer de lineaire Fresnellens op het zuiden georiënteerd en dus in de oostwest richting gemonteerd wordt is de benodigde verplaatsing van de PV module om deze in het brandpunt te houden het geringste. Met deze systemen is praktisch een optische concentratie factor van ca. 80x haalbaar. Hierdoor blijft het oppervlak van de PV module klein en daarmee de lichtonderschepping van de door te laten diffuse straling. Een samenvatting van de eigenschappen van verschillende Fresnellens kassystemen wordt in Tabel 6.1 gegeven. De uiteindelijke afschrijvingsperiodes zijn voor de verschillende uitvoeringen van de Fresnelkassen nagenoeg gelijk. Op dit moment is de Fresnelkas nog niet haalbaar. Over 5 jaar is de gewone kas met een afschrijvingstermijn van ca. 10 jaar nog niet haalbaar maar een energieneutrale kas wel met een afschrijvingstermijn van ca. 7 jaar. In de laatst genoemde kas wordt de geogste warmte hergebruikt in een buffer en een aquifer. Hierdoor wordt bespaard op kosten voor de warmtewisselaar en elektrische energie. De economische afschrijvingsperiode van ca. 7 jaar is voor PV toepassingen kort. Wanneer de productie van cellen en lenzen enige omvang gekregen heeft en de prijs van energie flink gestegen is (over ca. 10 jaar) zijn de afschrijvingsperiodes gedaald tot respectievelijk ca. 4 jaar en 3 jaar.

Aan de hand van Nederlandse stralingsgegevens en het type afdekkingsmaterialen is de maximale opbrengst met Silicium PV cellen bepaald op ca. 32 kWh/m² per jaar. Wanneer er GaAs PV (triplejunction) cellen gebruikt worden kan de opbrengst toenemen tot ca. 64 kWh/m² per jaar. Bij het basisconcept wordt uitgegaan van een asymmetrische kas met lineaire Fresnellens geplaatst in de oostwest richting met een oriëntatie naar het zuiden, omdat bij een symmetrische kas de baan van het brandpunt de noordzijde van de kas kan raken. Uit de stralingsgegevens is tevens afgeleid dat op een heldere dag met maximale instraling tot 81% van de energie kan worden weggeschermd met een Fresnellens kas. Om dit te bereiken is het nodig dat alle gefocuseerde directe straling opgevangen wordt door de collector.

In de gebouwde prototype Fresnelkas is een elektrisch piekvermogen gemeten van 40 W/m² (Fresnellens oppervlak) en een thermisch piekvermogen van 170 W/m² (Hoofdstuk 5). De uit de metingen afgeleide opbrengst per jaar is 29 kWh/m² (Fresnellens oppervlak) elektrische energie en 518 MJ/m² (144 kWh/m²) thermische energie. De hier bepaalde elektrische opbrengst ligt dicht bij de voorspelde waarde. Waarschijnlijk worden verliezen door grotere invalshoeken (deels) gecompenseerd door een deel van het diffuus licht dat bijdraagt aan de opbrengst. Onder de voorwaarden van het oplossen van de onder de aanbevelingen genoemde knelpunten kan op basis van de economische analyse, de technische analyse en de experimenten worden geconcludeerd dat het Fresnelkas concept binnen afzienbare tijd economisch interessant is.

Tabel 6.1. *Overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de Fresnellens kas systemen.*

Type	Beschrijving	Licht- verdeling	Concentratie factor	Energie- opbrengst	Opmerkingen
	Normale Fresnelkas - Integratie in kanaalplaten of dubbelglas	o	1000	++	3D regeling en zonnecellen duur, lichtverdeling bij grote invalshoeken ongunstig. Momenteel geen lenzen beschikbaar. Economisch binnen een termijn van 10 jaar haalbaar.
	Lineair Fresnelkas - Integratie in kanaalplaten	++	70	+	Op korte termijn technisch goed haalbaar. Eenvoudig te regelen. Economisch binnen een termijn van 10 jaar haalbaar.
	Booglenz kas	++	80	+	Ontwikkeling speciale folie duur. Economisch binnen een termijn van 10 jaar haalbaar.
	Modulaire Fresnelkas	++	1000	++	3D regeling en zonnecellen duur, koelen ingewikkeld. Economisch binnen een termijn van 10 jaar haalbaar.

7 Knelpunten, risico's en aanbevelingen

Tijdens de uitvoering van het Fresnelproject zijn een aantal knelpunten naar voren gekomen. De eerste vier knelpunten hebben betrekking op de PV-module zijn:

1. Siliciumcellen geschikt voor geconcentreerde straling zijn moeilijk verkrijgbaar in grote aantallen. De meeste bedrijven vervaardigen de cellen nog op pilotschaal. Hierdoor is het prijsniveau van de cellen nog te hoog.
2. De fill-factor van de PV-module van ca. 50% is momenteel nog te laag. Deze lage waarde is ontstaan doordat een aantal cellen in de schaduw komen door de kasconstructie en de glasroeden. Oplossingen hiervoor zijn:
 - Montage van betere (schotky) diodes.
 - FET's met een lage weerstand en stuelelektronica.
 - Een combinatie van serie-parallelschakeling van de cellen.
 - Module laten meebewegen in de oostwest richting zodanig dat de schaduwplekken op plaatsen vallen zonder cellen.
 - Toepassen van gewone Fresnellenzen. De PV-cellen zijn dan altijd in het brandpunt van dezelfde lens te houden.
3. Bij de vervaardiging van de PV-modules blijkt de montage van de zware strips (noodzakelijk voor de hogere stromen van de cellen geschikt voor geconcentreerde straling) een probleem. De zware strips leiden bij solderen snel tot celbeschadigingen door thermische uitzettingsverschillen. Een oplossing hiervoor is het ontwikkelen van speciale strips die flexibiliteit combineren met voldoende doorsnede.
4. Het blijkt moeilijk bij deze relatief smal PV-module de cellen strak in een rechte lijn te houden.
5. Het lichtverlies is momenteel nog te groot door de combinatie dubbelglas-Fresnellens. Mogelijke oplossingen hiervoor zijn: AR-coating op het glas en/of de lens direct samenstellen op het glas.
6. Door de ophanging kon de PV module niet voldoende dicht bij het raam komen zodat het systeem bij lage zonnestanden (na eind september) niet meer functioneert. Dit is eenvoudig aan te passen.
7. De kas is momenteel uitgevoerd als symmetrische kas. Dit was noodzakelijk omdat het brandpunt bij lagere zonnestanden anders voorbij de positie van de noordelijk deel van de kap komt. Hoewel dit het voordeel biedt van een goede aansluiting op de bestaande kassenbouw heeft dit twee nadelen: a. De maximale energie-opbrengst per eenheid kasoppervlak wordt niet gehaald. b. De belichting in de kas is niet meer uniform omdat een deel van het (directe) licht binnenkomt via de noordkap. Mogelijk kan dit nadeel opgelost worden door een extra prisma microstructuur boven de Fresnellens waardoor het licht 'voorgebogen' wordt in een meer gunstige positie.

Een risico van de Fresnelkas is de hoge concentratiefactor in het brandpunt van de lens. Eventuele brandbare materialen zullen gemakkelijk vlam vatten wanneer deze in het brandpunt komen. Om dit te vermijden is het van belang dat de modules voldoende hoog boven het gewas en scherminstallatie blijven om brandgevaar te vermijden.

De aanbeveling om de Fresnelkas te kunnen introduceren in de markt zijn samen te vatten in onderstaande punten:

1. Oplossen van bovengenoemde knelpunten, waaronder verbeterde module, verbeterde lichttoetreding en kasdek aanpassing naar asymmetrisch kasdek.
2. Meetprogramma gedurende een jaar met verbeterde PV-Modules.
3. Analyse van lichtverdeling in de kas. Aan de hand van deze resultaten worden veranderingen in de modules aangebracht waardoor de lichtverdeling zal verbeteren.
4. Ontwikkeling van optiek voor lichtregeling in de kas.
5. Ontwikkeling van optiek voor omzetting naar extra diffuus licht (omzetting direct naar diffuus).
6. Publicaties en organisatie van workshops voor tuinders.
7. Opscaling naar ca.200 - 500m² kas voor een teeltproef met als deelnemende partijen: tuinder, kassenbouwer en een energiemaatschappij.

8 Referenties

- Al Baali, A.A., 1986.
Improving the power of a solar panel by cooling and light concentrating. *Solar & Wind Technology* **3**, 241–245.
- Andersen, M., M. Rubin & J.L. Scartezzini, 2003.
Comparison between ray-tracing simulations and bi-directional transmission measurements on prismatic glazing. *Solar Energy* **74**, 157–173.
- Bottenberg, W.R., N. Kaminar, T. Alexander, P. Carrie, K. Chen, D. Gilbert, P. Hobden, A. Kalaita & J. Zimmerman, 2000.
Manufacturing technology improvements for the PVI SUNFOCUS™ concentrator. In: Proceedings of the 16th European PV Solar Energy Conference, 1–5 May, Glasgow, UK, pp. 2233–2236.
- Brogren, M., P. Nostell & B. Karlsson, B., 2000.
Optical efficiency of a PVthermal hybrid CPCmodule for high latitudes. *Solar Energy* **69**, 173–185.
- Coventry, J., 2005.
Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy* **78**, 211–222.
- Giacomo, R, 2006.
Cover element for Greenhouses or the like, European Patent Application, EP 1 688 033 A1, 09-08-2006.
- James, L.W. & J.K. Williams, 1978.
Fresnel optics for solar concentration on photovoltaic cells. In: Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New York, pp. 673–679.
- Jirka, V., V. Kuceravy, M. Maly, J. Pokorny & E. Rehor, 1998.
The architectural use of glass raster lenses. In: Proceedings of the World Renewable Energy Congress V, Part III, pp. 1595–1598.
- Jirka, V., V. Kuceravy, M. Maly, M. Pech & J. Pokorny, 1999.
Energy Flow in a Greenhouse equipped with Glass Raster Lenses, *Renewable Energy*, 16, pp. 660–664.
- Khalil, E.J. Al-Jumaily, Munadhil, A.K.A. Al-Kaysi, 1998.
The study of the performance and efficiency of flat linear Fresnellens collector with sun tracking system in Iraq. *Renewable Energy* **14**, 41–48.
- Kurata, K., 1983.
Studies on improvement of the light environment in greenhouses. (I) Application of a Fresnel Prism to Greenhouse covering. *J.Agr. Met.*, 39, 103-106.
- Kurata, K., 1991.
Scale-model experiments of a applying a Fresnel Prism to Greenhouse Covering, *Solar Energy*, **46**, no.1, p.p. 53-57.
- Kritchman, E.M., A.A. Friesem & G. Yekutieli, 1979.
Efficient Fresnellens for solar concentration. *Solar Energy* **22**, 119–123.
- Leutz, R., A. Suzuki, A. Akisawa & T. Kashiwagi, 1999.
Design of nonimaging Fresnellens for solar concentrators. *Solar Energy* **65**, 379–387.
- Lorenzo, E. & G. Sala, 1979.
Hybrid silicon-glass Fresnellens as concentrator for photovoltaic applications. In: Proceedings of the ISES Conference Silver Jubilee Congress, Atlanta, pp. 536–539.
- Nabelek, B., M. Maly & V.I. Jirka, 1991.
Linear Fresnellenses, their design and use. *Renewable Energy* **1**, 403–408.
- Nelson, D.T., D.L. Evans & R.K. Bansal, 1975.
Linear Fresnellens concentrators. *Solar Energy* **17**, 285–289.
- O’Neil, M.J., R.R. Walters, J.L. Perry, A.J. McDanal, M.C. Jackson & W.J. Hess, 1990.
Fabrication, installation and initial operation of the 2000 sq. m. linear Fresnellens photovoltaic concentrator system at 3M/Austin (Texas). In: Proceedings of the 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Florida, pp. 1147– 1152.
- Sassi, G., 1980.
Chromatic dispersion concentrator applied to photovoltaic systems. *Solar Energy* **24**, 451–460.

Tilborgh, J. van, 2005.

Greenhouse having a daylight system, European Patent Application, WO2005104819, 2005-11-10. NL octrooiaanvraag 1026082, d.d. 1-11-2005.

Tripanagnostopoulos, Y., Th. Nousia, M. Souliotis & P. Yianoulis, P. 2002.

Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy* **72**, 217–234.

Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, R. Battisti & A. Corrado, 2005a.

Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **13**, 235–250.

Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, J.K. Tonui & A. Kavga, 2005b.

Irradiation aspects for energy balance in greenhouses. In: Proceedings of the International Conference on Sustainable Greenhouse Systems. *Acta Horticulturae* **691**, 733-740.

Tripanagnostopoulos, Y., Ch. Siabekou & J.K. Tonui, 2005c.

The Fresnellens concept for solar control of buildings. In: Proceedings of the International Conference PALENC2005, Santorini 19–21 May, Greece, pp. 977–982.

Whitfield, G.R., R.W. Bentley, C.K. Weatherby, A.C. Hunt, H.D. Mohring, F.H. Klotz, P. Kenber, J.C. Minano, E. Alarte-Garui, 1999.

The development and testing of small concentrating PV systems. *Solar Energy* **67**, 23–34.

Website ENVI system en Envelope Technology [www.energie-fuer-die-zukunft.de/downloadarea/BPS% 20Solar.pdf](http://www.energie-fuer-die-zukunft.de/downloadarea/BPS%20Solar.pdf)

Website Jirka <http://www.tic.trebon.cz/download.php?id=36>

9 Publicaties

T. Kierkels , P.J. Sonneveld, (interview).

Speciale lens zet zonnestraling om in hoogwaardige warmte, *Onder Glas*, **No. 6/7**, juni/juli 2008, p. 86-87.

P. Sonneveld (persbericht).

Nieuw: De Fresnelkas, *Glastuinbouw Techniek*, **2**, Nr. 4 (2007) p.42-43.

P. Sonneveld (persbericht)/

Workshop over nieuwe Fresnel-kas, *Nieuwe Oogst Tuinbouw*, **3** Nr. 14 (2007) p.5.

P. Sonneveld (persbericht).

Een kasdek met lenzen om elektriciteit te produceren, *Vakblad voor de bloemisterij*, **29** (2007) p.34/

10 Appendix 1. Literatuuroverzicht

De Fresnellens worden gecombineerd met kleine thermische, fotovoltaïsche, of hybride fotovoltaïsche/thermische collectoren om de geconcentreerde zonnestraling om te zetten in warmte, elektriciteit of een combinatie van beide, voor onmiddellijk of later gebruik (Tripanagnostopoulos *et al.*, 2005b). Dit principe kan tevens in gebouwen toegepast worden (Tripanagnostopoulos *et al.*, 2005c). De opgewekte energie kan als warmte (bijvoorbeeld als heet water) of als elektriciteit (batterijen of elektriciteitsnet) worden opgeslagen om aan de elektrische energievraag te voldoen.

Verscheidene lineaire en cirkelvormige lenzen zijn onderzocht. Fresnellens van het 2D type (lineaire lenzen) zijn eenvoudiger toe te passen dan 3D type (cirkelvormige lenzen). Voor de eerstgenoemde lens is minder regelapparatuur nodig voor het zonnevolg systeem wanneer de lens in de oostwest richting is geplaatst. Als de lineaire Fresnellens wordt toegepast met Noord-Zuid as dan moet de brandpuntslijn van de ochtend tot de avond continue worden bijgesteld, terwijl bij een Oost-West as slechts een bijstelling per enkele dagen of weken nodig is. Daarom is de oostwest plaatsing van de lens het meest praktisch voor stationaire toepassingen zoals in kassen. In al deze gevallen zal de brandpuntsafstand van de lens veranderen, afhankelijk van elevatie en azimut van de zon.

Beide zijden van de Fresnellens kunnen voorzien worden van groeven maar in de praktijk zijn de groeven alleen aan de onderzijde van het oppervlak aangebracht om transmissieverliezen door de accumulatie van stof en vuil te verminderen.

De optische verliezen van een Fresnellens kunnen hoog oplopen door extra reflecties aan de opstaande zijden van de interfaces, aan diffractie van dicht naast elkaar geplaatste groeven, aan absorptie binnen het lensmateriaal, aan chromatische aberratie en ook aan ontwerpfouten. Deze verliezen resulteren in lagere optische prestaties van de Fresnellens en kunnen tevens leiden tot niet-uniforme verlichting bij het brandpunt. Zonneconcentrators met Fresnellens en van het Fresnel reflector type zijn ontwikkeld voor lage concentratie toepassingen, hoofdzakelijk voor hybride systemen met PV cellen op absorptievaten. Whitfield *et al.* (1999) heeft aangetoond dat een aantal ontwerpen resulteren in twee tot drie keer lagere kosten in vergelijking met conventioneel niet-concentrerende systemen.

Resultaten met de lineaire Fresnellensconcentrator zijn gepubliceerd door Nelson *et al.* (1975), van gebogen oppervlakte lenzen om de brandpuntsafstand te minimaliseren door Kritchman *et al.* (1979), over Fresnel optica door James en Williams (1978), over de ontwikkeling door Lorenzo & Sala (1979) en over het ontwerp en het gebruik van Fresnellens van glas door Nabelek *et al.* (1991). Andere studies over Fresnellens zijn de chromatische afwijkingen van Sassi (1980), de vervaardiging de installatie en de systeemprestatie door O' Neil *et al.* (1990), stationaire Fresnellens door Leutz *et al.* (1999) en de lineaire Fresnellensconcentrator gecombineerd met lineaire cellen door Bottenberg *et al.* (2000). Andere werken over prestatiestudies van een vlakke lineaire Fresnellenscollector zijn van Khalil & Munadhil (1998) en ontwerpaspecten van deze systemen worden beschreven door Leutz *et al.* (1999). Deze groep heeft onlangs 2D en 3D acryl Fresnellensconcentrators ontwikkeld met geavanceerde technologie met een groot aantal groeven en commerciële modellen in de markt geïntroduceerd.

Fresnellens van glas hebben een kleinere concentratieverhouding wegens beperkingen in de productie. Een kleinere groef is moeilijk te produceren met glas en de hoeken zijn minder scherp. Hierdoor ontstaat een groter brandpunt.

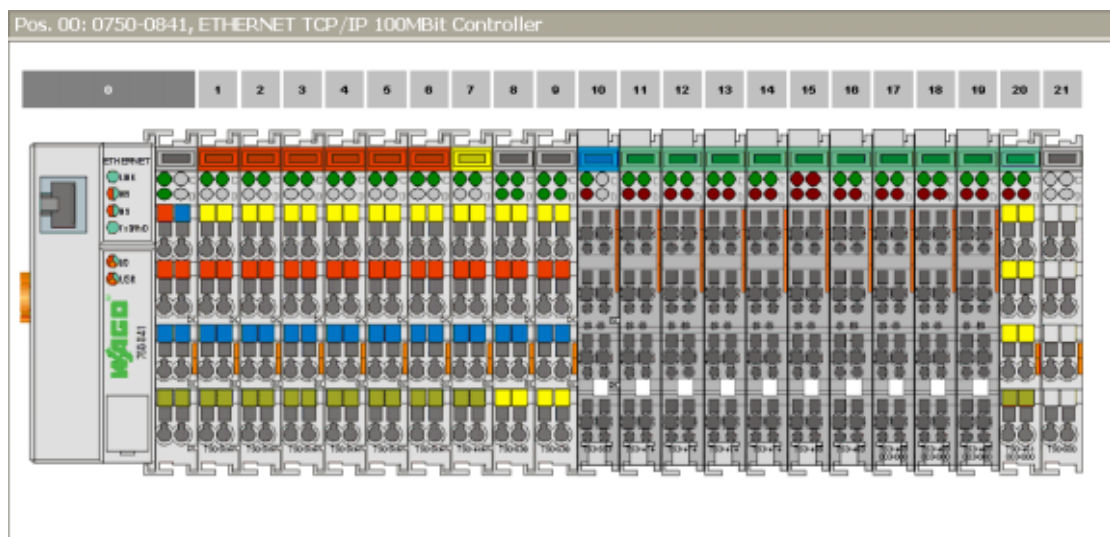
11 Appendix 2. De procesbesturing van de Fresnelkas

Het toegepaste procesbesturingssysteem is WAGO –I/O- SYSTEM 750. Het is volledig modulair van opbouw, alle benodigde I/O modules kunnen aan elkaar geschoven worden. Dit systeem wordt veel toegepast in industrie, gebouwautomatisering, machinebouw en scheepsbouw.

Elke module wordt met een positie nummer aangegeven, module 0 is de Controller die alle I/O modules aanstuurt en uitleest. De communicatie met de besturingsPC gaat via standaard Ethernet en het zgn. MODbus protocol. De kleur Rood geeft de Digitale Output modules weer, Geel voor Digitale input, Blauw voor Analoge Output en Groen voor Analoge Input.

Elke I/O module heeft status leds die aangeven of de module en de sensor/actuator al of niet correct werken. Een aantal modules kunnen geconfigureerd worden met een programma op de besturingsPC. De bedrading van sensoren en actuatoren kan rechtstreeks in de I/O modules gestoken worden op de bekende manier van lasklemmen, dit gaat snel en betrouwbaar.

Het besturingsprogramma in C# kan m.b.v. MODbus DLL alle I/O kanalen aansturen en uitlezen. Alle documentatie is volledig on line op de website www.wago.com beschikbaar. In onderstaand Figuur 11.1 wordt de configuratie van de Wagomodules in de Fresnelkas weergegeven. Een overzicht van de functie en instelling van ieder module is in Tabel 11.1 weergegeven.



Figuur 11.1. De configuratie van de Wagomodules in de Fresnelkas.

Tabel 11.1. Functie en instelling van de verschillende Wagomodules in de Fresnelkas.

Fresnel Greenhouse I/O list							
pos	ch	mod number			WAGO IO Module Description	Description IO function	sensor/actuator/item type
0		750-841			Ethernet bus coupler 10/100 mb/s	I/O control via network	
1	1	750-501	D01		2*DO 24VDC/PNP/0,5A	Watch Dog Alarm Timer	Omron ... Timer Relay
	2	„	D02		„	Free	
2	1	753-514	D03		2*DO Relais 125Vac 30Vdc 0.5A	Electronic Load 25A Solar Collector Panel1	Conrad Speed Controller
	2	„	D04		„	Short Circuit Solar Pannel	40A relay
3	1	753-514	D05		2*DO Relais 125Vac 30Vdc 0.5A	Position Up Motor M1	ABI 204F frequency contr.1
	2	„	D06		„	Position Down Motor M1	ABI 204F frequency contr.1
4	1	753-514	D07		2*DO Relais 125Vac 30Vdc 0.5A	Position Up Motor M2	ABI 204F frequency contr.2
	2	„	D08		„	Position Down Motor M2	ABI 204F frequency contr.2
5	1	753-514	D09		2*DO Relais 125Vac 30Vdc 0.5A	Cooling Circuit Heat Exchanger Fan 1	
	2	„	D010		„	Cooling Circuit Pump 1	
6	1	753-514	D011		2*DO Relais 125Vac 30Vdc 0.5A	Cooling Circuit Valve 1	
	2	„	D012		„	Cooling Circuit Valve2	
7	1	753-514	D013		2*DO Relais 125Vac 30Vdc 0.5A	Free	
	2	„	D014		„	Free	
8	1	753-400	DI01		2*DI 24VDC/PNP/3,0msec	Alarm PVUpper en Lower Limits	
	2		DI02		„	Free	
9	1	750-638	DI03		2*DI Up/Down Counter 16 bit 500	Water Flow 1	Water Meter 1P/Ltr
	2	„	DI04		„	Water Flow 2	Water Meter 1P/Ltr
10	1	„	DI05		2*DI Up/Down Counter 16 bit 500	Water Flow 3	Water Meter 1P/Ltr
	2	„	DI06		„	Free	
11	1	753-553	A001	mA	4xAO 0-20mA	Electronic Load 1	Conrad Speed Controller
	2	„	A002	mA	„	Electronic Load 2	Conrad Speed Controller
	3	„	A003	mA	„	Speed Control Position Motor M1	ABI 204F frequency contr.1
	4	„	A004	mA	„	Speed Control Position Motor M2	ABI 204F frequency contr.2
12	1	753-474	AI17	mA	2xAI 4-20mA 16 bit SE	Cooling Circuit Heat Exchanger TT01	PT100 + current converter
	2	„	AI18	mA	„	Cooling Circuit Heat Exchanger TT02	PT100 + current converter
13	1	753-474	AI19	mA	2xAI 4-20mA 16 bit SE	Cooling Circuit Heat Storage TT03	PT100 + current converter
	2	„	AI20	mA	„	Cooling Circuit Heat Storage TT04	PT100 + current converter
14	1	753-474	AI21	mA	2xAI 4-20mA 16 bit SE	TT05	PT100 + current converter
	2	„	AI22	mA	„	TT06	PT100 + current converter
15	1	753-474	AI23	mA	2xAI 4-20mA 16 bit SE	Free	
	2	„	AI24	mA	„	Free	
16	3		AI23	mA	„	Free	
	4	„	AI24	mA	„	Free	
17	1	753-483	AI01	V	2xAI 0-30VDC diff. Isolated input	Voltage Trm. Solar panel 01	PV voltage transmitter
	2	„	AI02	V	„	Voltage Trm. Solar panel 02	„
18	1	753-469 /003-000	AI11	mV	2xAI Thermocouple Adjustable U=+_120mV	Current Trm. Solar panel 05	Resistor 0.05 Ω
	2	„	AI12	mV	„	Current Trm. Solar panel 06	„
19	1	753-469	AI13	mV	2xAI Th.C Adjustable K type	Temp Trm. Solar panel 01	Th.C K type TC Direct
	2	„	AI14	mV	„	Temp Trm. Solar panel 02	„
20	1	753-469	AI15	mV	2xAI Th.C Adjustable U=+_30mV	Global Irradiation Outside	Kipp Solari Meter CM4
	2			mV	„	Global Irradiation Inside	Kipp Solari Meter CM11
21	1	0750-0461/		Ω	2*AI PT100 RTD Adjustable	Cooling Circuit Solar Pannel Inflow	PT100
	2			Ω	„	Cooling Circuit Outflow	PT100
22		0750-0600,			End Module		

12 Appendix 3. Enquête

Vragen Tuindersworkshop Fresnelkas

Wageningen, 8 aug. 2007

Naam:

Beroep:.....

Kruis voor de eerste drie vragen aan wat u het belangrijkste vindt:

1. Wat vindt u belangrijker:
 - Zo goedkoop mogelijke kas
 - Kas met maximale elektriciteitsopbrengst
 - Zo veel mogelijk (diffuus) licht
2. Welk materiaal heeft u het liefst:
 - Glas
 - Kanaalplaat (Stegdoppel)
 - Folie
3. Wat vindt u belangrijker:
 - Maximale teelt opbrengst
 - Maximale energie opbrengst
4. Wat vindt u belangrijker
 - Niet geheel egale belichting maar economische goed
 - Egale lichtverdeling maar duurdere kas
5. De ontwerpen bevinden zich nog in een pril stadium. Welke van de ontwerpen vindt u op dit moment het meest interessant?
 - Kanaalplaat met geïntegreerde lens
 - Kanaalplaat met geïntegreerde lineaire lens
 - Modulair systeem onder kasdek
 - Bewegend kasdek
 - Zeshoekige modulaire kas
 - Boogkas
6. Mag de kas een asymmetrisch dek hebben:
 - Nee
 - Ja
 - Ja met enkelzijdige nokluchting
7. Welke type kas is voor u het meest interessant?
 - Venlo type kas als basis
 - Breedkapper als basis
8. Welke praktische opmerkingen heeft u nog bij het ontwerp van de kas?
9. Krijten is een compromis: op een lichte dag wordt er te weinig licht tegengehouden en op een donkere dag teveel. Wat zou het voordeel zijn van een regelbaar systeem t.o.v. krijt?
10. Voor welk teelt lijkt u de Fresnelkas interessant?
11. Hoeveel licht wilt u in de zomer in de kas voor deze teelt?
12. Hoeveel lichtverlies is toelaatbaar in de winter?
13. Zijn er aspecten nog niet genoemd in de presentatie die van belang zijn voor de teelt?
14. Welke terugverdientijd is voor u belangrijk voor een mogelijke investering?
15. Wat zou een nieuw type kasdek (per m²) dat regelbaar direct licht wegschermt maximaal mogen kosten?

Belangrijkste antwoorden Tuindersworkshop Fresnelkas Wageningen, 8 aug. 2007

- | | | | |
|-----|--|--|-----|
| 1. | Wat vindt u belangrijker: | Zo goedkoop mogelijke kas | 22% |
| | | Kas met maximale elektriciteitsopbrengst | 52% |
| | | Zo veel mogelijk (diffuus) licht | 26% |
| 2. | Welk materiaal heeft u het liefst: | Glas | 33% |
| | | Kanaalplaat (Stegdoppel) | 44% |
| | | Folie | 22% |
| 3. | Wat vindt u belangrijker: | Maximale teelt opbrengst | 85% |
| | | Maximale energie opbrengst | 15% |
| 4. | Wat vindt u belangrijker | Niet geheel egale belichting maar economische goed | 59% |
| | | Egale lichtverdeling maar duurdere kas | 41% |
| 5. | De ontwerpen bevinden zich nog in een pril stadium. Welke van de ontwerpen vindt u op dit moment het meest interessant? | Kanaalplaat met geïntegreerde lens | 31% |
| | | Kanaalplaat met geïntegreerde lineaire lens | 30% |
| | | Modulair systeem onder kasdek | 4% |
| | | Bewegend kasdek | - |
| | | Zeshoekige modulaire kas | - |
| | | Boogkas | 30% |
| 6. | Mag de kas een asymmetrisch dek hebben: | Nee | 43% |
| | | Ja | 43% |
| | | Ja met enkelzijdige nokluchting | 14% |
| 7. | Welke type kas is voor u het meest interessant? | Venlo type kas als basis | 45% |
| | | Breedkapper als basis | 55% |
| 8. | Welke praktische opmerkingen heeft u nog bij het ontwerp van de kas? | Weinig bewegende delen (3x); eenvoudig (4x); geen lichtverlies in de winter; ruimte voor scherm laten | |
| 9. | Krijten is een compromis: op een lichte dag wordt er te weinig licht tegengehouden en op een donkere dag teveel. Wat zou het voordeel zijn van een regelbaar systeem t.o.v. krijt? | Toch voldoende licht op diffuse dag (4x); juiste luchtsom, juiste klimaat; beter stuurbaar; vlakker diffuus licht; kortere teelt | |
| 10. | Voor welk teelt lijkt u de Fresnelkas interessant? | Freesia (2x); Phtalonopsis (2x), bromelia; kalanchoe; potplanten; kamerplanten; schaduwplanten; begonia's; orchideën; meer dan je denkt; lage hoeveelheid licht vragende gewassen. | |
| 11. | Hoeveel licht wilt u in de zomer in de kas voor deze teelt? | 150 PAR, 10.000lux; 250W (3x); 300W (4x); 400W (3x), 500W, 600—700W; 800W | |
| 12. | Hoeveel lichtverlies is toelaatbaar in de winter? | Weinig/geen (4x); 5% (2x); 10% (2x); 20% (3x) | |
| 13. | Zijn er aspecten nog niet genoemd in de presentatie die van belang zijn voor de teelt? | Schermdoek toch nodig voor energiebesparing (2x); te veel warmte opbrengst | |
| 14. | Welke terugverdientijd is voor u belangrijk voor een mogelijke investering? | 5 jaar (12x); 10 jaar (4x); 10-15 j (2x) | |
| 15. | Wat zou een nieuw type kasdek (per m ²) dat regelbaar direct licht wegschermt maximaal mogen kosten? | 5€;10€ (4x); 15€; 20 j; 25€; 30-40€; 75€ (2x) | |

Evaluatie enquête

De resultaten van de enquête zijn in de appendix weergegeven. Aan de enquête hebben 30 mensen deelgenomen waarvan ca. 80% tuinders. Op de workshop met tuinders kwamen drie systemen met elk ca. 30% van de stemmen naar voren als meest haalbaar. De drie systemen zijn:

- a. Lineaire Fresnellenzen uitgevoerd als kanaalplaat.
- b. Normale Fresnellenzen uitgevoerd als kanaalplaat.
- c. Booglens concept

Omdat het lineaire systeem op korte termijn het meest haalbaar is wordt voor dit systeem gekozen. In de materiaal keuze kreeg integratie in een kanaalplaat om vervuiling en condensatieproblemen te voorkomen de meeste stemmen (44%). In het ontwerp wordt voor deze oplossing gekozen. Voor de eerste proefkas zal i.v.m. de kosten voor een Venlo type kas gekozen worden. De gewenste investering van ca. 145€ per m² is hoger dan de tuinders als wenselijk aangaven. Maar een toekomstige afschrijvingstermijn van 6 jaar valt in de enquête genoemde periode van 5-10 jaar die voor tuinders als aanvaardbaar was aangegeven. De vraag van voldoende licht op een bewolkte dag lijkt haalbaar met de Fresnellens omdat de gemeten lichttransmissie niet meer dan 3% extra verlies aan diffuus licht geven.

