

Innovatieve venstersystemen met hoogrendement energie omzetting

Ref.nr. OPD 02/174

1 maart 2005

Vertrouwelijk

Innovatieve venstersystemen met hoogrendement warmte absorptie

Ref.nr. OPD 02/174

1 maart 2005

Dr. Ing. P.J. Sonneveld
Ir. G.L.A.M. Swinkels
Ir. M. van Alst
Dr. D.S. van Es
Ir. G.G.J. Schennink

A&F BV
Agrotechnologisch Onderzoeksinstituut
Bornsesteeg 59
Postbus 17
6700 AA Wageningen
Tel: 0317-475024
Fax: 0317-475347

1	Introductie	2
1.1	Doelstelling.....	2
1.2	Marktpartijen.....	3
1.3	Propositie te ontwikkelen systeem	3
2	Beschrijving en theoretische achtergrond	4
2.1	Huidige situatie	5
2.1.1	De oriëntatie van een venstersysteem.....	5
2.1.2	Zonwering	6
2.1.3	Samenstelling van daglicht.....	7
2.1.4	Thermische isolatie	10
2.1.5	Bestaande systemen warmte- en zonwering:	15
2.2	Wensen en eisen	16
2.3	Theorie breking en interne reflectie	19
2.4	GratingSysteem	22
3	Resultaten en discussie.....	23
3.1	Modelberekeningen	23
3.2	Gesimuleerde varianten.....	24
3.2.1	Micro-grating systemen	24
3.2.2	Naar binnen gerichte zaagtand-grating	27
3.2.3	Naar buiten gerichte zaagtand-grating.....	27
3.2.4	Naar binnen gerichte V-grating	28
3.2.5	Naar buiten gerichte V-grating	29
3.2.6	Repeterende uitvoeringen Micro-grating	30
3.2.7	Elementen met gecentreerde V-grating	31
3.2.8	Elementen met naar buiten gerichte V-grating	33
3.2.9	Elementen met buiten gerichte zaagtand.....	35
3.2.10	Taps toelopend materiaal	37
3.2.11	Repeterend taps toelopend materiaal	39
3.2.12	Paraboolreflector	40
3.2.13	Cirkelreflector.....	43
3.2.14	Geregelde paraboolreflector	46
3.2.15	Geregelde kwart-cirkelreflector	47
3.2.16	Samenvatting	48
3.3	Prototype	50
3.3.1	Constructie.....	50
3.3.2	Metingen	52
3.4	Economische haalbaarheid.....	54
	Systeem:	55
	Extra investering	55
4	Conclusies en aanbevelingen	56
5	Referenties	56

1 **Introductie**

1.1 **Doelstelling**

Tijdens de kick-off meeting 14 mei 2003, waarbij aanwezig ir. P. Ramsak (Novem NEO), dr. D. van Es en ir. M. van Alst (beide van A&F) bij A&F in Wageningen is na gezamenlijk overleg besloten om de originele doelstelling aan te passen. Gekozen is om eerst de haalbaarheid van het voorgestelde systeem te onderzoeken en daarna het voorgestelde onderzoeks- en ontwikkelingstraject starten.

Doelstelling zoals in de originele projectaanvraag:

Ontwikkelen van een innovatief venstersysteem waarmee selectief (nabije) infrarood-straling wordt afgevangen en daarbij in energie wordt omgezet.

Doel van dit project is de ontwikkeling van een multifunctioneel energiescherm dat transparant is voor zichtbaar licht en selectief (N)IR-straling intern reflecteert. De gereflecteerde (N)IR-straling wordt dusdanig gereflecteerd dat omzetting naar energie en opslag van deze energie mogelijk is.

Allereerst zal er gestart worden met een positiebepaling:

- Wat is er momenteel op dit gebied op de markt?
- Wat is onderscheidend aan het voorgestelde systeem?
- Waar liggen de beste kansen?

Haalbaarheidsproject:

Een analyse en een beoordeling van de mogelijkheden om het voorgestelde systeem te ontwikkelen en in de praktijk toe te passen.

Onderzoeks- en ontwikkelingsproject:

Het vermeerderen van technische en wetenschappelijk inzicht ten aanzien van het voorgestelde systeem.

1.2 Marktpartijen

In dit eerste stadium van het project zijn een aantal marktpartijen benaderd en de wensen en eisen voor een venstersysteem mee besproken. Nieuwe ontwikkelingen en de haalbaarheid van het voorgestelde systeem zijn besproken. Dit alles heeft geleid tot een samenvatting van de bestaande venstersystemen die in hoofdstuk 2 wordt gegeven. Hierin staat ook een tabel waarin alle wensen en eisen met betrekking tot een venstersysteem worden genoemd.

De benaderde marktpartijen variëren van onderzoeksinstituut (TNO-Bouw), tot leverancier van complete venstersystemen (Rapid Pane / Glaverbel, Saint Gobain), tot bedrijven met elk een specialisatie op het gebied van venstersystemen.

Benaderde bedrijven in dit stadium van het project zijn:

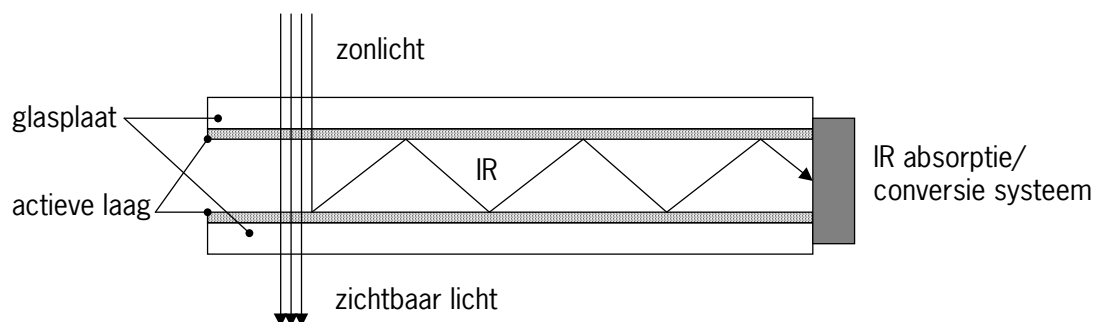
- TNO-Bouw te Delft, onderzoeksinstituut. Met onderzoekers ir.P.J.C.J. de Wilde en ir.M.E. Spiekman is uitgebreid gesproken over de wensen en eisen aan een venstersysteem. Eerder door TNO uitgevoerd onderzoek op het gebied van venstersystemen is aan bod gekomen en de haalbaarheid van het hier voorgestelde systeem is besproken. Wat betreft energieopwekking zijn o.a. de (transparante) zonnecel, zonneboiler en waterfilm aan bod gekomen.
- Rapid Pane / Glaverbel te Amersfoort, vlakglasproducent. Met directeur, de heer L. Grootscholten is gesproken over de wensen en eisen aan een venstersysteem. Verder zijn een groot aantal nieuwe ontwikkelingen besproken, zoals de transparante zonnecel, transparant nanoschuim en verwarmd glas.
- Philips Research te Eindhoven, voormalig Natlab. Met de onderzoekers de heer A. Sparidaens en dr.ir. H.J. Cornelissen is transparant nanoschuim en het voorgestelde systeem besproken. Het voorgestelde systeem is een variatie op systemen die momenteel worden onderzocht voor toepassingen in LCDs.
- Ledo te Rijswijk, leverancier van warmtewerende folies. Hiermee is de mogelijkheid om beglazing te voorzien van een warmtewerende (metaal) folie besproken.
- Leromco te Vorden, glasmontagebedrijf. Met directeur H. Rombouts is uitgebreid gesproken over de wensen en eisen aan een venstersysteem.
- Heatec / Glastherm te Amsterdam, hiermee is uitgebreid besproken over de voor- en nadelen van verwarmd glas m.b.t. energiewinst.
- Saint-Gobain Glass te Veenendaal, producent vlakglas. Met de heer P. Woesthoff is uitgebreid gecommuniceerd over de wensen en eisen aan een venstersysteem.

1.3 Propositie te ontwikkelen systeem

Ontwikkelen van een innovatief venstersysteem waarmee selectief (nabije) infrarood-straling wordt gereflecteerd en daarbij in energie wordt omgezet.

Tijdens periodes met een overmaat aan zonnewarmte wordt er in de utiliteits- en glastuinbouw in sterke mate gekoeld d.m.v. ventilatie om de gewenste binnentemperatuur te bereiken. Tevens wordt veel energie verbruikt door bijvoorbeeld airconditioningsystemen of andere ventilatiesystemen. Doel van dit project is de ontwikkeling van een multifunctioneel energiescherm dat transparant is voor zichtbaar licht en selectief (N)IR-straling afvangt. De gereflecteerde (N)IR-straling wordt dusdanig gereflecteerd dat omzetting naar energie en opslag van deze energie mogelijk is.

Schematische weergave van het voorgestelde systeem:



2 Beschrijving en theoretische achtergrond

In dit verslag zal de definitie van het venster worden aangehouden zoals omschreven in het woordenboek van Van Dale:

ven-ster (het ~, ~s)

opening in een gebouw waardoor het daglicht naar binnen kan, meestal afgesloten met een ruit

Het doel van dit project is om de wensen en eisen voor een compleet venstersysteem te analyseren en op basis van deze analyse het voorgestelde systeem te ontwerpen.

2.1 Huidige situatie

Momenteel bestaan er diverse venstersystemen die op verschillende manieren het binnenklimaat regelen.

De allerbelangrijkste functie van het raam is licht in een ruimte binnen te brengen. Daarnaast is het raam ook een "venster" op de wereld, en moet het voldoen aan de allerhoogste vereisten op het gebied van techniek, esthetiek, kwaliteit en prijs. En uiteraard vormt het een barrière met buiten.

Bij de keuze van een raam spelen tal van criteria mee: de lucht - en waterdichtheid, de weerstand tegen wind, de brandveiligheid, de thermische en akoestische isolatie, de bescherming tegen inbraak, het onderhoudsgemak, het bedieningsgemak, de esthetische eigenschappen, de kwaliteit van de basismaterialen en van het beslag, de eigenschappen van het glas en uiteraard ook de kwaliteit van de plaatsing. Verder moet het leverbaar zijn in variabele afmetingen, vorm en kleur.

2.1.1 De oriëntatie van een venstersysteem.

De plaatsing van een venstersysteem is afhankelijk van de oriëntatie.

Noordzijde.

Aan de noordzijde komt vrijwel geen direct zonlicht, alleen diffuus licht. De lichtkwaliteit is er zeer stabiel, ontwerpers geven daarom vaak de voorkeur aan deze oriëntatie. De noordzijde is bijzonder geschikt voor leesruimten, werkplaatsen en computerlokalen. Verbeterde thermisch isolerende beglazing maakt het mogelijk de raamopeningen op het noorden te vergroten zonder extra warmteverlies in de winter.

Zuidzijde.

Raamopeningen op het zuiden profiteren van een maximale zoninval in de winter als de zon laag staat. Deze oriëntatie is dus nuttig om warmte te winnen in de koude seizoenen. In de zomer, als de zon hoog staat, kunnen zuidelijke raamopeningen makkelijk worden beschermd met een afdak en andersoortige permanente zonwering.

Oost- en Westzijde.

Ramen gericht op het oosten en het westen ontvangen maximale hoeveelheid zonne-energie in de zomer, 's ochtends aan de oostelijke kant en 's avonds op het westen. Als de zon laag boven de horizon staat (in de morgen en avond), kunnen deze ramen worden voorzien van een aangepaste zonwering om opwarming en verblinding te voorkomen.

Naast de oriëntatie van het venster is de juiste afmeting en plaatsing van de opening van groot belang. Wanneer rekening gehouden wordt met de energiebalans (de benodigde energie voor opwarming, verlichting en afkoeling van een ruimte) dient het venster een minimaal oppervlakte van 35 tot 50% van het geveleppervlakte in te nemen. De plaatsing van het venster dient zo hoog mogelijk te geschieden, hierdoor dringt het licht verder in een ruimte binnen.

2.1.2 Zonwering

Een goede zonwering (behalve op de noordzijde) is van belang om koeling en airconditioning van een ruimte te beperken. Zonwering moet bij voorkeur aan de buitenzijde van de beglazing worden aangebracht om opwarming te voorkomen. Om goed te functioneren in de zomer moet de zonwering **80 tot 85%** van de zonne-energie tegenhouden.

Ter illustratie: In de volle zon werkt een raam van 1 bij 1,5 meter als radiator met een vermogen van 1 kilowatt: gunstig in de winter, ongewenst in de zomer.

De plaatsing van de zonwering dient bij voorkeur te geschieden aan de buitenzijde van de beglazing. Dit geldt sterk voor de zuid- en westoriëntatie. Als de zonwering zich aan de binnenkant bevindt creëert dit het zogenaamde serre-effect dat significante opwarming oplevert.

De zonne-energie die de ruimte via een beglazing binnendringt, wordt geabsorbeerd door voorwerpen en binnenmuren die daardoor opwarmen en op hun beurt een thermische straling genereren, hoofdzakelijk langgolelige infrarood straling (groter dan 5 µm). Beglazing laat vrijwel geen stralen door met een golflengte groter dan 5 µm. De zonne-energie die toetreedt, blijft dus als het ware gevangen in de ruimte waardoor deze warmer wordt: het zogenaamde serre-effect.

Dit effect doet zich bijvoorbeeld voor bij een geparkeerde auto met gesloten ruiten in de volle zon.

Tijdens de zomer worden de meteorologische omstandigheden bepaald door de volgende factoren:

- Relatief hoge temperatuur
- Onbewolkte lucht
- Grote hoeveelheid zonne-energie
- Weinig wind
- Veel zonuren
- Zon hoog aan de hemel

Een venstersysteem met een hoge zonnefactor (nader beschreven in volgende paragraaf) zal in de zomer veel zonne-energie binnen laten en dit zal een aanzienlijke temperatuursverhoging opleveren, het serre-effect. Zonwering biedt de mogelijkheid om het energiegebruik van de airconditioning te reduceren, temperatuursverhoging te voorkomen en verblinding te vermijden.

Veel zonweringsystemen zijn echter niet permanent, dus vergen bediening, onderhoud en vervanging. Tevens bezitten deze systemen vaak een lage transparantie.

Heroriëntatie zonlicht.

In kantooromgevingen is de verlichting meer dan 60% van de werkuren ingeschakeld. Dit is een gevolg van zowel de seizoenen als de zonweringsystemen die bedoeld zijn om het gebouw koel te houden bij zonnig weer. Door zonweringsystemen loopt de inval van daglicht terug wat leidt tot grotere behoefte aan verlichting. In sommige gebouwen wordt

daarom gebruik gemaakt van de heroriëntatie van het daglicht d.m.v. vaste of beweegbare glaslamellen.

Vaste glaslamellen die aan de buitenzijde geplaatst zijn weerkaatsen het daglicht naar het plafond. De verlichting van het plafond en de lichte verduistering in de nabijheid van het venster creëren een meer gelijkmatige verlichting in de ruimte. Echter de lichtdoorlatendheid van deze systemen kan erg laag zijn (20% van de originele waarde). De directe transparantie van de systemen is inferieur vergeleken met een origineel glazen raam aangezien deze glaslamellen zichtbaar zijn.

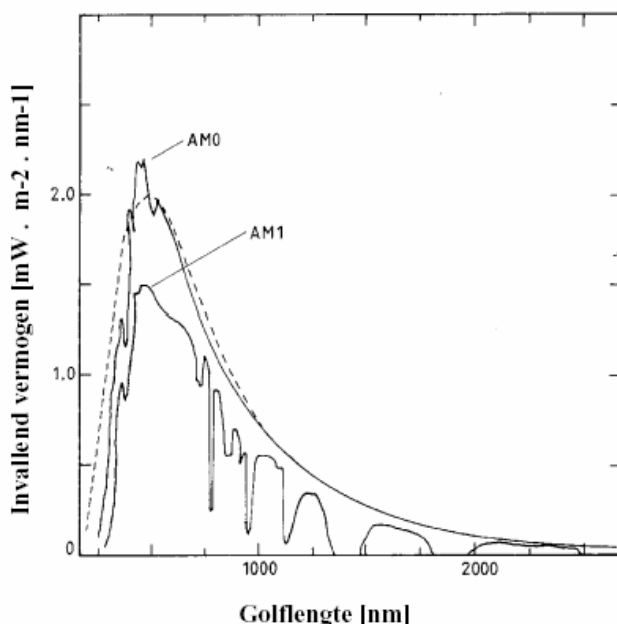
Deze glaslamellen worden ook toegepast in een beweegbare vorm. De zonwering is hierbij afhankelijk van de gekozen oriëntatie en absorptievermogen van de glaslamellen. Ook deze glaslamellen zijn zichtbaar.

Een derde mogelijkheid om licht te heroriënteren is door de integratie van een metaal of kunststof rooster in een dubbele beglazing. Deze roosters, gefixeerd en beschermd door het glas, zijn zo ontworpen dat direct zonlicht geheroriënteerd wordt en weerkaatst of in het gebouw geleidt wordt.

De directe transparantie van deze beglazing is laag en wordt voornamelijk toegepast in daken. Om het beoogde effect te bereiken moet de oriëntatie en de hoek van de beglazing en de geografische positie van het gebouw bepaald worden.

2.1.3 Samenstelling van daglicht.

Zonnestralen die de aarde bereiken zijn samengesteld uit ongeveer 3% ultraviolette straling met een golflengte van 0,28 tot 0,38 μm (UV), 55% infrarood straling met een golflengte tussen 0,78 en 2,5 μm (IR) en 42% zichtbaar licht met een golflengte tussen de 0,38 en 0,78 μm . Overigens is de term zichtbaar licht een contaminatie, licht is altijd zichtbaar. De termen ultraviolet en infrarood licht zijn derhalve ook onjuist, het moet ultraviolette en infrarode straling zijn.



derd of

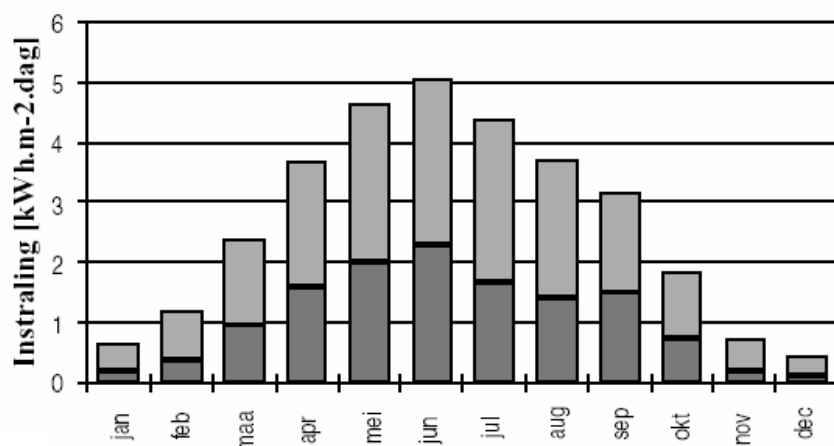
Figuur 2.1 Het spectrum van het zonlicht. De streeplijn geeft de straling van een zwarte straler bij 5762 K, verder wordt het AM0 en AM1 spectrum gegeven.

Wanneer daglicht op een venstersysteem invalt wordt een deel weerkaatst, een deel geabsorbeerd en een deel doorgelaten. De relatie tussen deze 3 componenten bepalen de zontoetredings- of zonnefactor (g) van een venstersysteem. Deze worden in Nederland meestal gedefinieerd volgens de EN 410-norm. Hoe lager de zonnefactor, des te lager is de hoeveelheid binnenkomende energie.

Bij zonwering moet met 3 typen prestaties rekening worden gehouden:

1. Verandering van de zonnefactor (g)
2. Verandering van de warmteoverdracht van buiten naar binnen (U -waarde)
3. Verandering van de lichttransmissie

De aard en de hoeveelheid zonlicht dat invalt op een gebouw is afhankelijk van de weersomstandigheden, het seizoen en de geografische ligging van het gebouw. Hoewel deze waarden variëren zijn ze vrij nauwkeurig bekend. In onderstaande figuren worden deze gegeven voor Ukkel (KMI) in België.



Figuur 2.6 De gemiddelde dagelijkse zonne-instraling op een horizontaal vlak in Ukkel, opgesplitst naar direct en diffuus licht. De lichtgrijze balken geven het diffuus gedeelte weer en de donkergrijze het directe deel van de maandelijkse zonneinstraling.

Uit de figuur blijkt dat de hoeveelheid instraling in de zomermaanden een factor 5 hoger ligt dan in de wintermaanden. Het aandeel direct invallende zonneinstraling is in de zomermaanden ook relatief hoger dan in de wintermaanden. Hiervan kan dus gebruik worden gemaakt bij een zonweringsysteem dat als tweeledig doel heeft om en zon te weren als deze te weren zonne-energie te benutten.

Uit onderstaande tabel blijkt dat bij een hoge zonneinstraling, dus wanneer zonwering noodzakelijk is, het aandeel directe zonneinstraling 80 tot 90% is. Dit is dus zeer hoog en

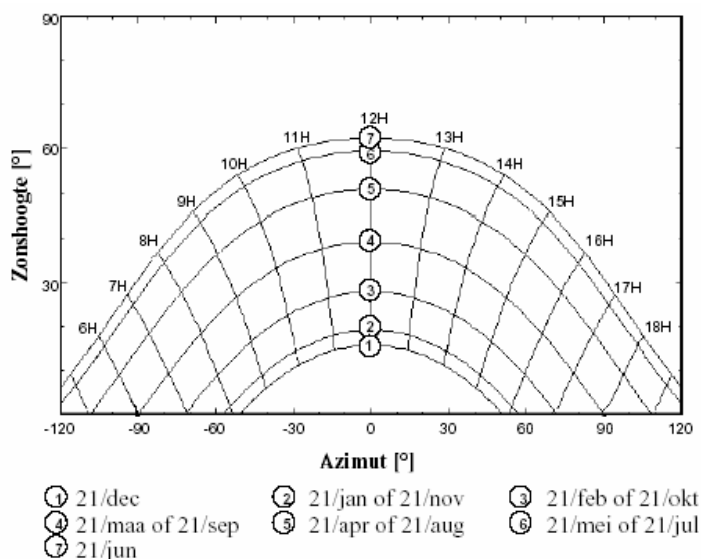
aangezien de direct invallende zonnestraling een bekende invalshoek heeft biedt dit mogelijkheden voor het in dit rapport te inventariseren systeem.

Weersomstandigheden	Globale straling [W/m ²]	Diffuus deel [%]
blauwe hemel zonder wolken	600 - 1.000	10 - 20
mistig bewolkt, zon zichtbaar als gele schijf	200 - 400	20 - 80
zwaar bewolkt	50 - 150	80 - 100

Typische waarden voor zonne-instraling onder verschillende weersomstandigheden.

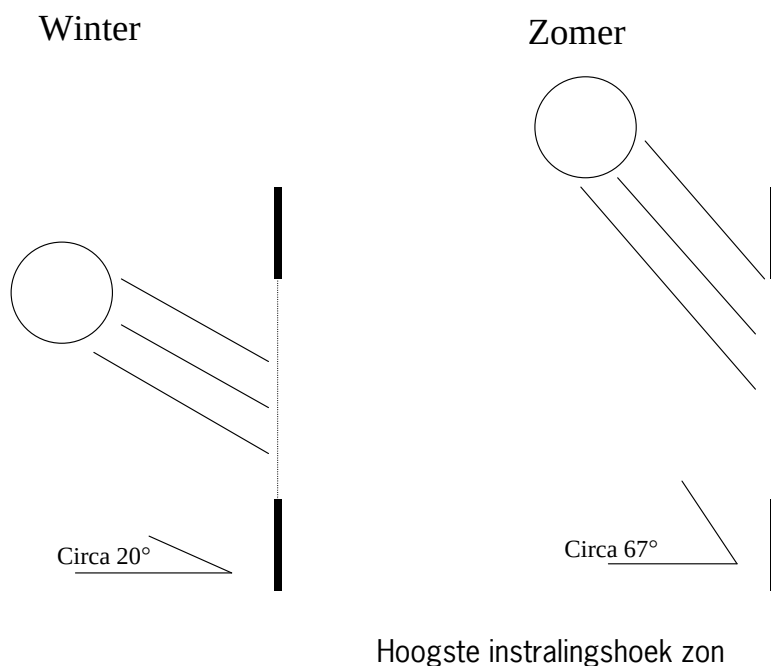
De hoeveelheid zonne-energie is in de zomermaanden aanzienlijk hoger dan in de wintermaanden. Het directe deel van het licht is op een onbewolkte dag 80 tot 90% terwijl de globale straling juist zonder bewolking relatief hoog is.

En uit onderstaand schematisch overzicht blijkt ook dat de invalshoek van het direct invallende deel van de zonnestraling bekend is. Deze varieert afhankelijk van het seizoen, tijdstip en geografische ligging.



Het dagverloop van de zonshoogte wordt gegeven voor Ukkel. Elke lijn geeft de stand van de zon weer voor telkens de 21ste dag van elke maand in functie van de azimut of het zonneur (Bron : PVSYST, GAP, Université de Genève).

Uit bovenstaande figuur kan worden afgeleid dat de invalshoek van de zon rond het middaguur in de zomer ongeveer 67 graden is en in de winter rond de 20 graden. In onderstaande figuur wordt dit weergegeven.



Al met al kunnen de bovenstaande feiten benut worden bij het ontwerp van een permanent zonweringsysteem dat energie moet opwekken.

2.1.4 Thermische isolatie

Warmteuitwisseling door een venstersysteem kan via 3 verschillende mechanismen verlopen:

1. Geleiding
2. Convectie
3. Straling

Geleiding is de warmteoverdracht in een lichaam of tussen 2 lichamen die met elkaar in contact zijn.

Convectie is de warmteoverdracht tussen het oppervlak van een vaste stof en een vloeistof of een gas. Bij deze overdracht is materie in beweging.

Straling is de warmteoverdracht door stralingsuitwisseling tussen 2 lichamen met verschillende temperaturen.

Een vuistregel voor het energieverlies is dat 2/3 deel van de energie door straling en 1/3 deel van de energie door geleiding en convectie verloren gaat.

Het warmtetransport door een wand d.m.v. geleiding, convectie en straling wordt uitgedrukt middels de U-waarde. Deze geeft de warmtedoorgang van 1 m² wand per seconde weer, bij een temperatuursverschil van 1 graad Kelvin tussen het interieur en exterieur van de ruimte. De U-waarde wordt uitgedrukt in W/m². In Nederland wordt hier de EN 673-norm voor gehanteerd. Des te kleiner de U-waarde, des te lager het warmteverlies.

Een vuistregel voor energiebesparing en U-waarde is dat 11 maal de U-waarde het aantal m³ in aardgas is per m² glas per jaar.

Bestaande thermische isolatie:

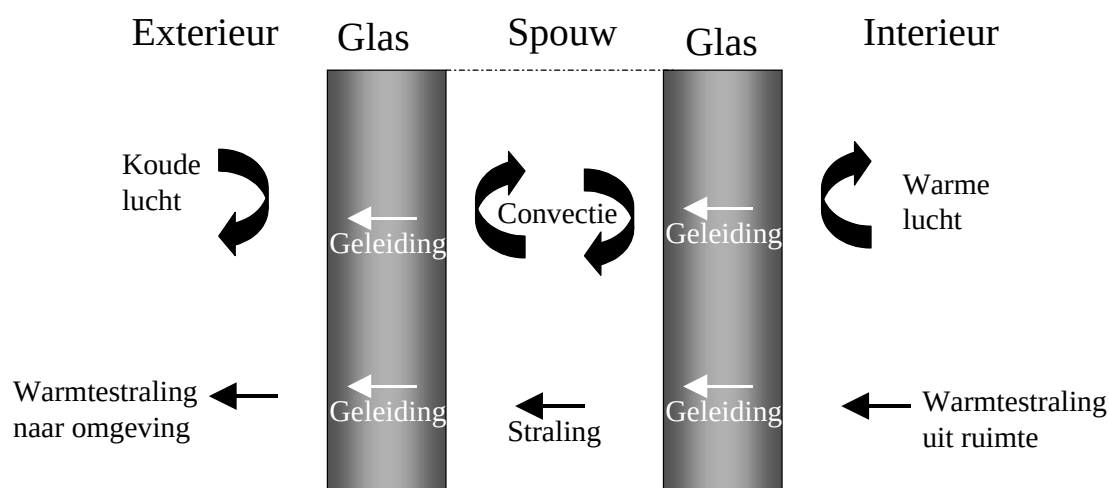
- Enkel glas
- Dubbel glas
- Driedubbel glas
- Gasgevuld dubbelglas
- Gecoat glas
- Verwarmd glas

In haalbaarheid- en onderzoekstadium zijn de thermische isolatie:

- Transparant nanoschuim

Enkel glas zelf isoleert nauwelijks, het heeft dan ook geen zin om enkel glas dikker te maken: een dikke en dunne ruit laten vrijwel evenveel warmte door.

Bij isolerend dubbelglas stroomt de warmte relatief langzaam van binnen naar buiten. De werking van dubbele beglazing met een lagere U-waarde is gebaseerd op een spouwvulling van droge lucht of een gas om zo het warmtetransport door convectie en straling te verminderen. Hierbij wordt dus gebruik gemaakt van de lage thermische geleiding van droge lucht of gas. Niet alleen door geleiding maar ook door straling verdwijnt er warmte. Verder treedt er in de spouw van dubbel glas convectie op waardoor er energie van binnen naar buiten verdwijnt.



De overdracht door straling wordt gereduceerd door de beglazing te voorzien van een lage emissiviteitscoating. De overdracht door geleiding en convectie kan verder verlaagd worden door de droge lucht te vervangen door een zwaarder gas met een lagere thermische geleiding, dit is meestal argon. Convectiestromingen in de spouw treden op bij een spouwbreedte groter dan 20 mm. De vraag van architecten naar meer licht en betere isolatiewaarden, wordt door glasproducenten beantwoord met nieuwe technologische ontwikkelingen. Na enkel glas, deed dubbel glas zijn intrede. Niet tegenstaande de voelbare isolatieverbetering is het energieverlies relatief hoog. Een dunne metaalfilm die wordt aangebracht in dubbele beglazing bezit een warmtereflecterend vermogen, waardoor een aanzienlijk betere isolatiewaarde bereikt wordt.

In onderstaande tabel zijn de U-waarde van verschillende soorten glas weergegeven. HR-coating is een metaalcoating die een lagere warmte-emissie heeft.

Enkel glas	Dubbel glas	Drie-dubbel glas	Dubbel glas met HR-coating	Dubbel glas met HR-coating en Argon	Drie-dubbel glas met HR-coating en Argon
U = 5.7	U = 2.8	U = 1.9	U = 1.4 - 2.0	U = 1.1 – 1.6	U = 0.8

De U-waarde van een spouwmuur is ongeveer 0.5 W/m².

Aangezien Nederland een zeeklimaat heeft en er dus vaak een hoge RV is bestaat er bij ruiten met een lage U-waarde de kans op condensatie van de buitenkant van de ruit. In sommige gevallen treedt dit hinderlijke verschijnsel reeds op bij een U-waarde van 1.1 W/m².

Een coating bestaat uit een of meerdere laagjes metalen of metaaloxides die op het glasoppervlak worden aangebracht. De dikte van een dergelijke coating is ongeveer $7 \cdot 10^{-8}$ m oftewel 70 nm. Door een coating aan te brengen kan de hoeveelheid straling die een ruit doorlaat worden beïnvloed.

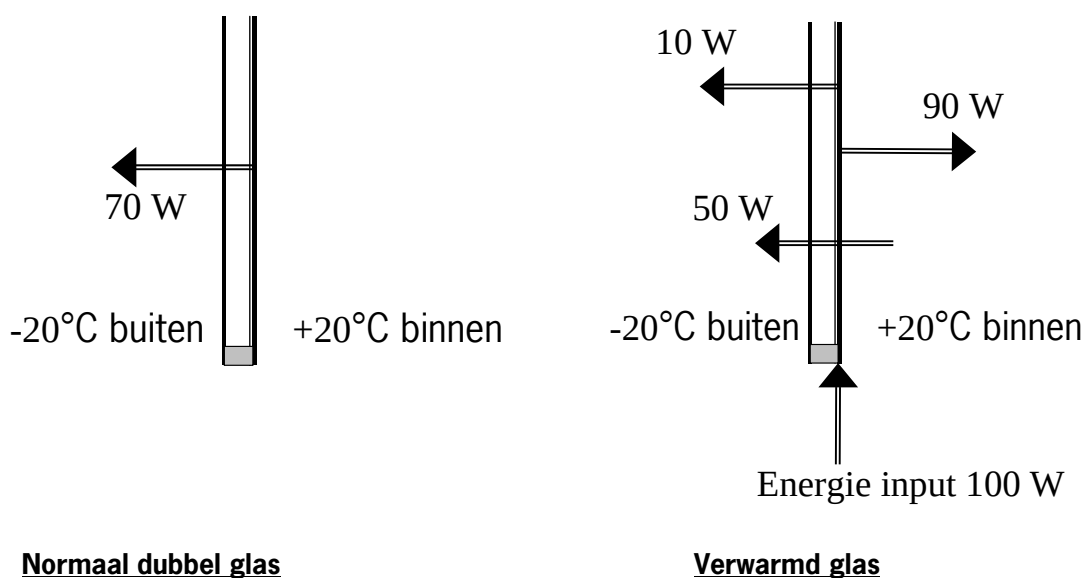
De spouw van een dubbelglazen ruit is niet perfect afgesloten voor water. Er vindt altijd transport van water naar de spouw plaats. Als gevolg hiervan stijgt de warmtegeleiding en wordt een ruit "lek". Om dit tegen te gaan wordt een kleine hoeveelheid droogmiddel aan het profiel van de ruit toegevoegd, wat het binnenkomende water in de spouw permanent absorbeert.

In een koude kamer die traditioneel verwarmd wordt, staat de warmtebron een deel van haar warmte af aan de lucht, die op haar beurt de ruimte gaat opwarmen. In dit geval spreekt men van convectie. Door het principe van uitzetting gaat warme lucht stijgen en koude lucht dalen. Precies hier ligt de oorzaak van het onbehaaglijke tochtgevoel, waarbij vooral koude glasvlakken een belangrijke rol spelen. De opgewarmde lucht koelt af aan het koudere glasoppervlak, daalt en veroorzaakt luchtstromingen. Het plaatsen van een radiator of putconvector voor het venster was totnogtoe de minst vervelende oplossing voor dit probleem.

Een ander nadeel van convectiestroming is de hoge concentratie van warmte tegen het plafond, terwijl er aan de vloer koude blijft. Dit verschijnsel staat bekend als koudeval.

Een mogelijk alternatief is het gebruik van verwarmd glas. Omdat bij verwarmd glas met zuivere stralingswarmte gewerkt wordt, is een omgevingstemperatuur van 16 á 18 °C ruim voldoende voor een behaaglijk warmtegevoel. Het stralingseffect is vooral besparend bij hoge plafonds, of huizen die open zijn tot in de nok. Wanneer het verwarmd glas in gebruik is blijft de oppervlaktetemperatuur van de binnenruit 35°C. Aangezien de kamertemperatuur steeds lager is, is er een warmtestraling vanaf het raam de ruimte in. Het raam vormt een optimaal warmteschild met een U-waarde van ongeveer 0. Isolierend verwarmbaar dubbelglas bestaat uit twee zijden gehard glas. De buitenruit heeft een dikte van 5 mm, de binnenruit 4 mm. Op beiden ruiten zijn is de spouwzijde van een metaalcoating voorzien. De buiten- en binnenruit worden gescheiden door een vochtvrije luchtspouw van 6-8 of 13 mm en hermetisch afgesloten door een thermisch onderbroken afstandhouder. Wanneer er een spanningsverschil op de metaalcoating wordt aangebracht zal er een elektronenstroom ontstaan, waardoor de metaalcoating en dus het glas verwarmd wordt.

In onderstaand schematisch overzicht wordt het verschil in energie-efficiënte en –verbruik voor normaal (gemiddelde U-waarde) dubbel glas en verwarmd glas weergegeven. De data zijn gevonden in studies van Labortec te Brussel (B) en CEBTR te Saint-Rémy (F).



Het energieverlies is in bovenstaande situatie voor verwarmd glas dus 10 W terwijl 90 W voor de verwarming benut wordt. Overall gaat er dus 60 W aan energie naar buiten terwijl er in normaal dubbel glas een energieverlies van 70 W is bij gelijke binnentemperatuur.

Het menselijk lichaam wisselt door straling warmte uit met zijn omgeving. Zo ontstaat een koudegevoel in de nabijheid van een wand met een lage temperatuur, zelfs in een ruimte met een hoge temperatuur. Des te lager de U-waarde, des te hoger is de temperatuur aan de binnenzijde van het venster en des te lager is het "koudegevoel". Dit is bijvoorbeeld het geval in zwembaden waar de temperatuur aangenaam warm is, maar dichtbij de vensters toch een sterk koudegevoel heerst.

In onderstaande tabel zijn de U-waarden van normaal (gemiddeld) dubbel glas en verwarmd glas vergeleken. De waarden voor het kozijn zijn gelijk gesteld.

	Dubbel glas	Verwarmd glas
U_w (venster)	1.6	1.4
U_f (houten kozijn)	1.8	1.8
U_g (glas)	1.3	0.98

De technologie achter verwarmd glas is relatief nieuw en moet verder ontwikkeld worden, maar biedt in potentie een energiezuiniger alternatief dan normaal dubbel glas.

De U-waarde voor het totale venster is de verhouding tussen de U-waarde van het raam en de U-waarde van het kozijn volgens de volgende vergelijking (EN ISO 10077-1):

$$U_w = \frac{A_f \bullet U_f + A_g \bullet U_g + L_g \bullet \psi}{A_f + A_g}$$

Met:

- U_w = warmtetransport venster
- U_f = warmtetransport kozijn
- U_g = warmtetransport raam
- ψ = lineair thermische geleiding zijkant raam
- A_f = Oppervlak kozijn
- A_g = Oppervlak raam
- L_g = Lengte om raam

Voor een compleet venstersysteem is het dus noodzakelijk om zowel het raam als het kozijn mee te nemen in de evaluatie.

Momenteel zijn er een aantal kozijnen op de markt:

- Hout
- Kunststof
- Aluminium

Een kozijn van hout heeft een U-waarde van ongeveer 1.8, vrijwel gelijk aan de U-waarde van een kunststofkozijn.

Er zijn ook nieuwe kunststofkozijnen op de markt die bestaan uit een kunststof frame, versterkt met glasvezels en gecoat met een dunne laag metaal. De U-waarde van deze

kozijnen is ongeveer 1.5. Dit levert een energiebesparing op van ongeveer 5% voor het gehele venstersysteem. In het voorgestelde systeem kan dit kozijn ook geïmplementeerd worden, echter is de implementatie van het energie-conversie systeem niet bekend.

Verder bestaan er de zogeheten warm-edge spacers. Dit zijn profielen die gebruikt worden om dubbelglas op een zekere afstand te houden met een lage warmtegeleiding. Bij de randen van een ruit van dubbel glas vindt er namelijk veel warmtetransport plaats doordat hier plaatselijk een hoge warmtegeleidingcoëfficiënt heerst. Het gebruik van afstandprofielen die geheel bestaan uit een butyl-afdichting hebben een relatief lage warmtegeleiding. De nieuwste ontwikkeling op dit gebied is de TPS-techniek waarin een butyl-afdichting dat een droogmiddel bevat als afstandsprofiel wordt toegepast.

2.1.5 Bestaande systemen warmte- en zonwering:

Momenteel zijn er een groot aantal systemen verkrijgbaar op het gebied van warmte- en zonwering:

- Gecoat glas
- Zonneschermbul>
 - (In dubbelglas) Luxaflex
 - Niet transparant zonwerend scherm binnen / buiten (evt. semi-transparant scherm)
 - Rollluiken
- (Selectief hoekafhankelijk) gestructureerd glas

Bestaande energieopwekking systemen:

- Zonneboiler (niet transparant)

In ontwikkeling zijnde energieopwekking systemen:

- Zonnecel (transparant)
- Waterfilm in combinatie met warmtepomp
- Geconcentreerde zonnecel (niet transparant)
- Vlakke plaat concentrator

De mate van zonwering is voor gecoat en gestructureerd glas in kleine mate afhankelijk van de invalshoek van het zonlicht. In het hoofdstuk 4 Resultaten en discussie worden een aantal recente ontwikkelingen op het gebied van gestructureerd glas besproken die een hoekafhankelijke (seizoenselectieve) werking bezitten.

De transparantie van bovenstaande venstersystemen is in alle gevallen lager dan normaal dubbel glas. De transparantie van gecoat glas is afhankelijk van de aard van de coating.

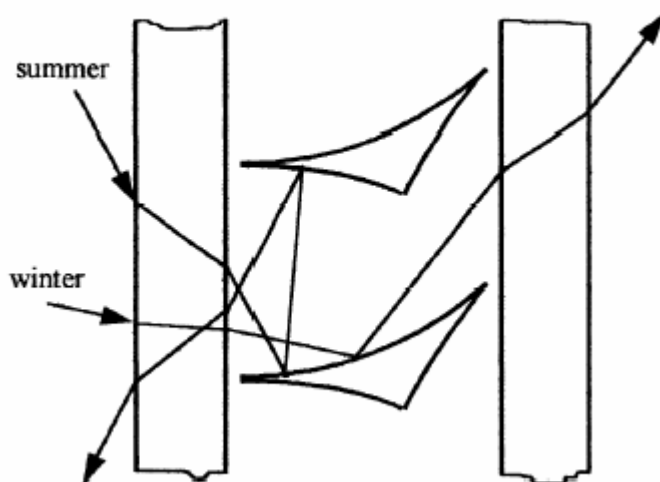
Een waterfilm is transparant, echter de film is continu in beweging. Een ander nadeel van de waterfilm is dat het systeem gevoelig is voor vervuilingen en dat het in combinatie met een acquafier en warmtepomp moet gaan. De aanschaffkosten zijn derhalve hoog en zijn alleen rendabel wanneer het om systemen gaat met een zeer groot oppervlak. Tevens zijn acquafiers niet overal in Nederland aan te leggen. Energetisch gezien levert het bij

omvangrijke systemen een verminderd energieverbruik op. Deze systemen zijn echter nog in de ontwikkelingsfase.

De zonneboiler en zonnecel zijn systemen die niet transparant zijn. Onderzoek richt zich op de ontwikkeling van een transparante zonnecel, de proof-of-principle is hierbij aangetoond. Er zijn echter nog veel technische en economische obstakels voor commercialisering van een transparante zonnecel.

Onderzoek naar zonneboilers en geconcentreerde zonnecellen richt zich niet op het transparant maken van deze systemen en lijken derhalve niet geschikt voor toepassing in venstersystemen.

In een aantal recente patenten worden systemen beschreven die hoekafhankelijk (seizoenafhankelijk) al dan niet zonlicht reflecteren. In onderstaande figuur wordt een van de voorgestelde systemen (US-patent 6311437) schematisch weergegeven. Tevens wordt de hoekafhankelijkheid (seizoenafhankelijkheid) getoond. Dit systeem maakt echter gebruik van zonwering in de zomer zonder energieopwekking.



2.2 Wensen en eisen

Uit de wensen en eisen komt een systeem naar voren dat moet voldoen aan de volgende criteria:

Wanneer de wensen en eisen uit de bovenstaande paragrafen worden samengevat en gecombineerd worden met bestaande zonwering- en zonne-energiesystemen ontstaat onderstaande tabel. In deze tabel is getracht te beoordelen in hoeverre het systeem voldoet aan de wens of eis. Een beoordeling met het cijfer 1 betekent dat het systeem goed voldoet en een 5 houdt in dat het systeem niet voldoet aan de wens of eis.

- Hoge transparantie
- Gebruiksgemak

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| - Variabele U-waarde | - Lange levensduur |
| - Energieopwekking | - Variabele afmetingen leverbaar |
| - Geen verblinding | - Hoge impactsterkte |
| - Makkelijke installatie | - Laag gewicht |
| - Lage kosten | - Hoge sterkte |
| - Geen onderhoud | - Krasvast |
| - | - Brandwerend |

De beoordeelde zonwering- en zonne-energiesystemen zijn:

- | | |
|---------------|-----------------|
| - Enkel glas | - Zonnecel |
| - Dubbel glas | - Zonneboiler |
| - Gecoat glas | - Waterfilm |
| - Zonwering | - Verwarmd glas |

Uit de tabel kan het volgende geconcludeerd worden:

- De huidige systemen die energie opwekken zijn veelal niet transparant (zonneboiler en zonnecel) of hebben weer vele andere nadelen. Een waterfilm over een kasdek bijvoorbeeld is een zeer kostbaar systeem aangezien het gebruik maakt van aquafiers, diepe opslagruimtes onder de grond waarin het warme water in de zomer wordt opgeslagen en in de winter uit wordt gepompt. De aanleg van een dussdanig systeem is kostbaar en pas rendabel bij grote oppervlakten, bij een kasdek bijvoorbeeld. Verder is het systeem niet onderhoudsvrij.
- De huidige systemen die een hoge U-waarde nastreven hebben als groot nadeel dat ze geen energie opwekken en dat ze zomers in de winter geen variabele U-waarde hebben. Hierdoor vindt in de zomer ongewenste opwarming van deze ruimtes plaats en is extra koeling noodzakelijk. Verwarmd glas heeft een variabele U-waarde en kan dus aangepast worden aan de omstandigheden om een minimaal energieverbruik te realiseren.
- Een extern zonweringsysteem heeft als nadelen dat het onderhoud vergt en dat het gebruiksgemak laag is. Verder zijn de systemen niet transparant. Voordelen van het systeem zijn dat het aangepast kan worden aan de seizoenen, in deze systemen is de zonnefactor variabel.

	Enkel glas	Dubbel glas	Gecoat glas	Zonwering	Zonne-boiler	Zonnecel	Waterfilm	Verwarmd glas
Transparantie	1	1-2	2-4	4-5	5	5	4	2
Zontoetredinsfactor	1	1-2	2-4	4-5	5	5	4	2
U-waarde	3	1-2	1-2	-	3	2	3	1
Energieopwekking	5	5	5	5	2	1-2	2	5
Afhankelijk zonnehoek	3	3	3	2	3	3	2	2
Verblinding	4	3-4	2	2	-	-	4	3
Installatie	1	1	1	2-3	2-3	2-3	5	4
Kosten	1-2	2-3	2-3	3	4	5	5	4
Onderhoud	1	1	2	5	3	3	5	4
Gebruiksgemak	1	1	1	5	2	2	5	4
Levensduur	2	2	4	5	4	3	5	3
Comfort	3	2	2	4	5	5	4-5	1
Chemicaliënresistent	2	2	4	5	4	4	5	2
Variabele afmetingen	1	1	1-2	3	4	4	3	3
Impactsterkte	2	1-2	2	5	4-5	4-5	-	1-2
Gewicht	1	2	2	3	4	3	5	2
Sterkte	3	1	2	5	3	3	4-5	1
Krasvastheid	2	2	4	-	2	3	-	2
Brandwerend	1	1	1	5	1	3	1	3

- De mechanische eigenschappen: sterkte, krasvastheid, stabiliteit in tijd, etc., lijken voor ieder systeem uit de bovenstaande tabel voldoende.

Het voorgestelde systeem is een zonweringsysteem dat bij een overschot aan zonneinstraling in werking komt en in staat is om energie op te wekken. Tevens moet het systeem transparant zijn en heeft een hoge (lieft variabele) U-waarde bezitten, zodat er een optimale balans is tussen de zonnefactor, U-waarde en lichttransmissie.

Het voorgestelde systeem heeft dus een hoge transparantie, hoge U-waarde en een variabele zonnefactor. Het wekt afhankelijk van de invalshoek van de zon energie op en gaat verblinding tegen.

De installatie, kosten, onderhoud, gebruiksgemak en levensduur zijn nader te onderzoeken facetten.

Bovenstaand beschreven eigenschappen zijn sterk afhankelijk van het uiteindelijke ontwerp van het voorgestelde systeem. Een belangrijk aandachtspunt hierbij zal het energieconversie systeem zijn.

Het voorgestelde systeem zal zoveel mogelijk moeten voldoen aan de wensen en eisen zoals samengevat in paragraaf 2.2. Het grote verschil tussen de bestaande systemen en het hier voorgestelde systeem is de combinatie tussen een transparant systeem en energieopwekking.

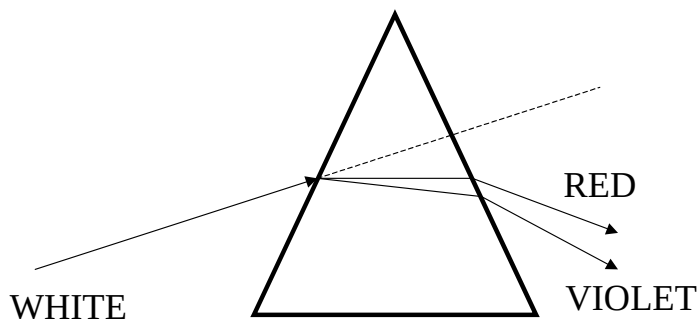
2.3 Theorie breking en interne reflectie

Het systeem gaat uit van 2 principes uit de klassieke optica:
De *refractie* en *dispersie* van licht.

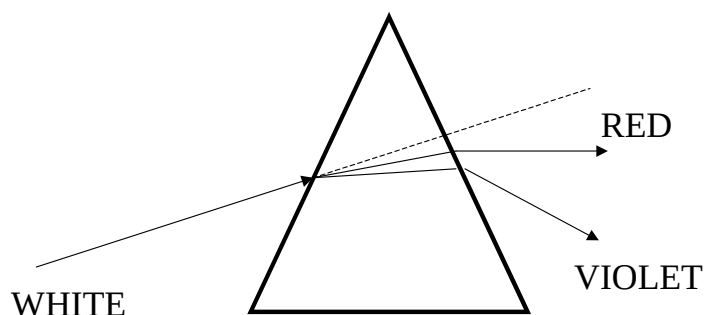
Simplistisch gezegd is:

- Refractie is de breking van licht wanneer het van een optisch dik naar een optisch dun materiaal gaat of visa versa.
- Dispersie is de afhankelijkheid van de golflengte van licht bij refractie.

In onderstaand figuur wordt het verschil tussen refractie en dispersie verder toegelicht.

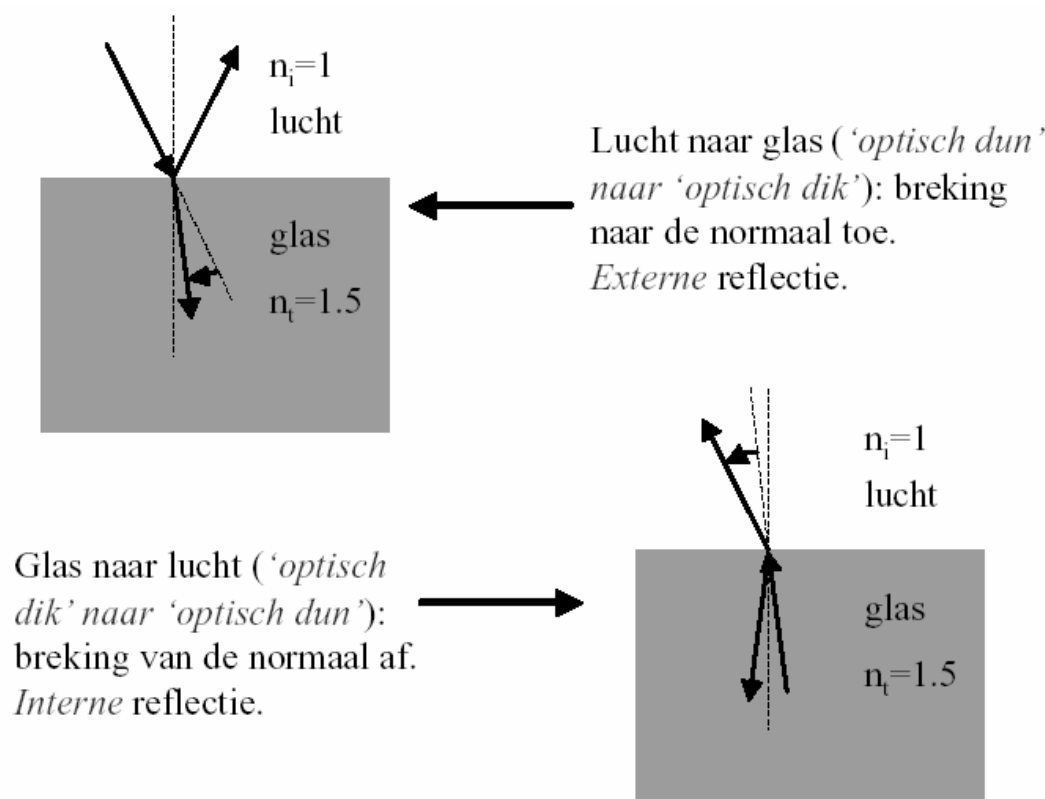


Hoge refractie (grote afbuiging), lage dispersie (kleine kleurscheiding)



Lage refractie (kleine afbuiging), hoge dispersie (grote kleurscheiding)

Refractie is afhankelijk van de overgang van licht en de media waar vanuit dit gebeurt. Bij de overgang van een optisch dun naar een optisch dik materiaal is de breking van licht naar de normaal toe. Bij de overgang van een optisch dik naar een optisch dun materiaal is de breking van de normaal af. In onderstaande figuur wordt dit toegelicht.



Verder maakt het systeem gebruik van het verschijnsel dat totale interne reflectie genoemd wordt. Dit verschijnsel kan alleen optreden wanneer licht van een optisch dik naar een optisch dun materiaal gaat. In onderstaande figuur wordt dit verschijnsel nader toegelicht.

Totale interne reflectie

Treedt op wanneer de invalshoek groter is dan de *kritische hoek*:

$$\sin \theta_t = \frac{n_t}{n_i} \sin \theta_i$$

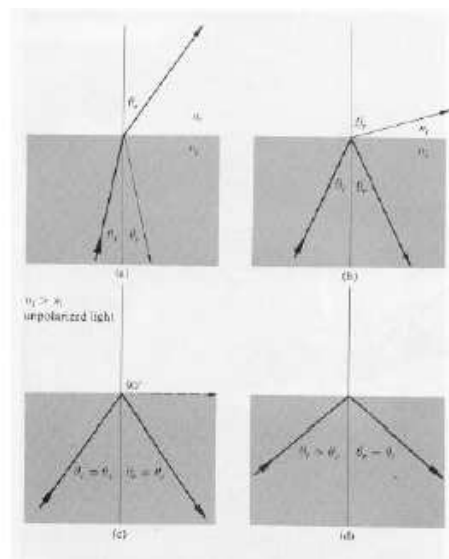
$$\frac{n_t}{n_i} < 1 \quad \sin \theta_c = \frac{n_t}{n_i} \quad \theta_t = 90^\circ$$

Bijvoorbeeld glas-lucht overgang:

$$\frac{n_t}{n_i} = \frac{1}{1.5} = 0.67$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_t}{n_i}\right) = 41.8^\circ$$

Interne reflectie →

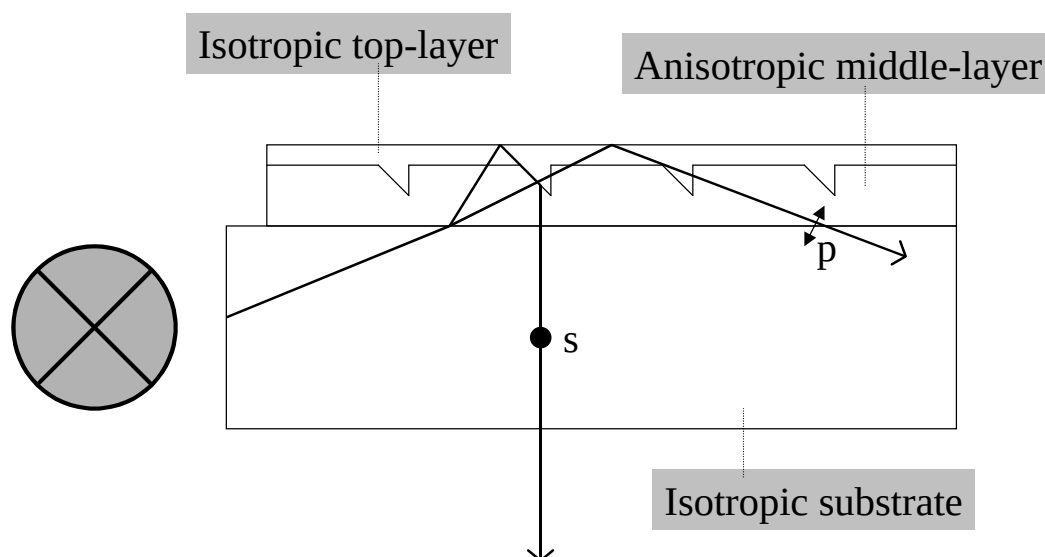


Totale interne reflectie →

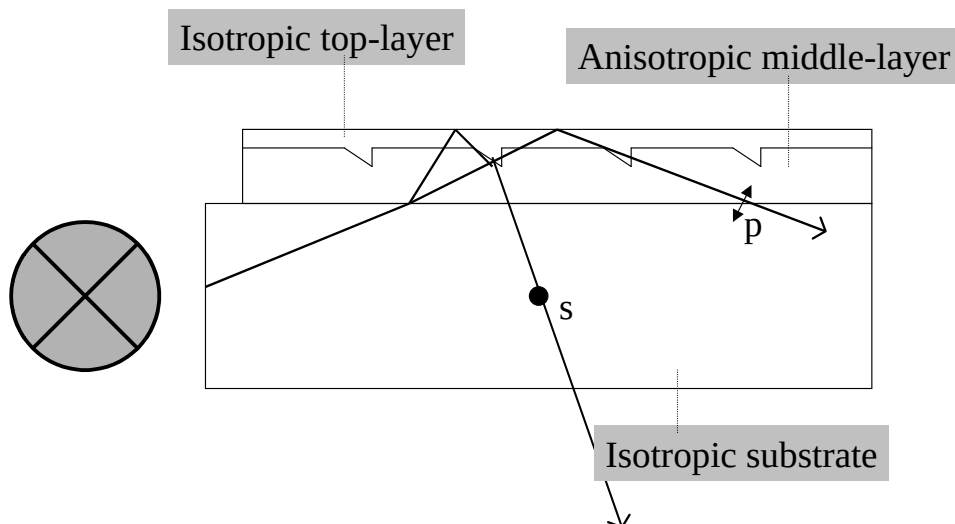
Dispersie van licht en UV- en IR-straling in een ruit heeft een lage invloed. De kleurscheiding treedt slechts in geringe mate op en lijkt niet te benutten in het voorgestelde systeem.

2.4 GratingSysteem

Het voorgestelde systeem kan volgens een omgekeerd principe werken als beschreven in patent W002/48607. Dit systeem wordt ook beschreven in het proefschrift van H.J.B. Jagt. Het doel van het hierboven genoemde systeem is om gepolariseerd licht te produceren zonder gebruik te maken van absorptie. In de figuur hieronder wordt dit systeem schematisch van de zijkant weergegeven. Zie voor een uitgebreide beschrijving en uitleg van deze systemen de dissertatie van H.B. Jagt.



In de “anisotropic middle-layer” is een grating aangebracht die er voor zorgt dat het ingekoppelde licht uit het systeem geleid wordt. De hoek waaronder het licht wordt uitgekoppeld is afhankelijk van de invalshoek van het licht, de hoek van de grating en de brekingsindex. De hoek van uitkoppeling van licht is afhankelijk van de hoek van de grating, zoals schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Het hierboven beschreven systeem bestaat uit de volgende componenten:

- Een isotroop substraat, d.w.z. met een uniforme brekingsindex, van bijvoorbeeld polycarbonaat (PC). De brekingsindex van het substraat ligt tussen de 2 brekingsindici van de anisotrope tussenlaag in.
- Een anisotrope tussenlaag, bijvoorbeeld een georiënteerde polyethylenetheraftalaat (PET) film. De brekingsindex in de oriëntatierichting is hoger dan de brekingsindex van het substraat, de brekingsindex loodrecht op de oriëntatierichting is lager dan die van het substraat.
- Een isotrope toplaag, dit is meestal een coating die vloeibaar aan te brengen is zodat alle gratings gevuld worden. De brekingsindex van de toplaag is gelijk aan de brekingsindex in de oriëntatierichting van de tussenlaag.
- De grating is aangebracht d.m.v. graveren, etching, laserschrijven of andere technieken.
- Het substraat en de anisotrope tussenlaag zijn gelijmd m.b.v. een lijm die dezelfde brekingsindex als het substraat heeft.
- s en p staat voor s- en p-gepolariseerd licht.

3 Resultaten en discussie

3.1 Modelberekeningen

De berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd met Raypro, een door A&F ontwikkeld ray-tracing programma, dat lichtstralen volgt door een object in een 3D omgeving. Raypro berekent de directe en diffuse transmissie van een transparant object en houdt daarbij rekening met de optische eigenschappen zoals breking, (diffuse) reflectie en absorptie van het materiaal.

Raypro is gevalideerd op basis van metingen uitgevoerd op diverse meetapparatuur van A&F en derden. In Fig 3-1 is een voorbeeld gegeven van de gesimuleerde stralengang door een prisma.

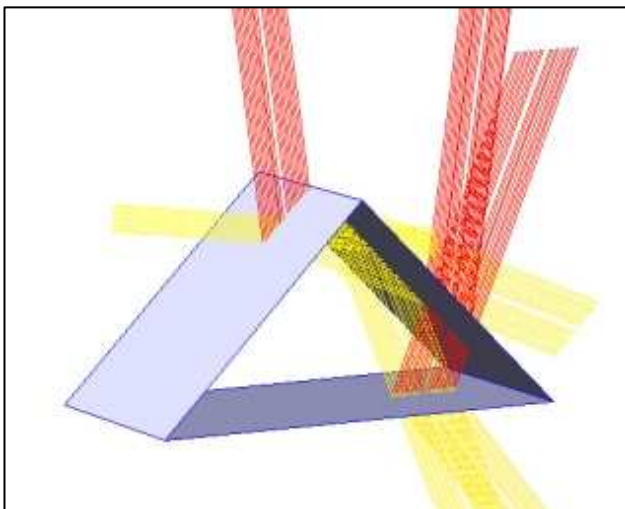


Fig. 3-1 Voorbeeld van ray-tracing berekeningen

Uitgangspunten van de simulaties in dit onderzoek

In de volgende paragrafen zijn de resultaten gepresenteerd van een aantal mogelijke varianten van het innovatief venster. Voor alle varianten geldt dat het venster homogeen van vorm is in tenminste één richting. Deze richting wordt in de rest van dit rapport de “lengte” (richting) genoemd en is de richting waarin de zonnecollector stroken geplaatst zijn. Voor de werking van het venster is de lengte van het venster niet belangrijk, mits aan de uiteinden in de lengterichting reflectors geplaatst worden. De richting waarin het licht naar de collector getransporteerd wordt, wordt aangeduid met de “breedte” (richting). De totale dikte van het (meerlaagse) venster wordt met “dikte” aangeduid.

3.2 Gesimuleerde varianten

3.2.1 *Micro-grating systemen*

Basisprincipe voor toepassing in LCD-schermen

In LCD schermen is een gratingstructuur aangebracht om licht uit te koppelen en door het scherm te laten gaan. Het voorgestelde systeem kan volgens een omgekeerd principe werken als beschreven in patent W002/48607. Dit systeem wordt ook beschreven in het proefschrift van H.J.B. Jagt (2001). Het doel van het hierboven genoemde systeem is om gepolariseerd licht te produceren zonder gebruik te maken van absorptie. In figuur 3-2 wordt dit systeem schematisch in doorsnede weergegeven.

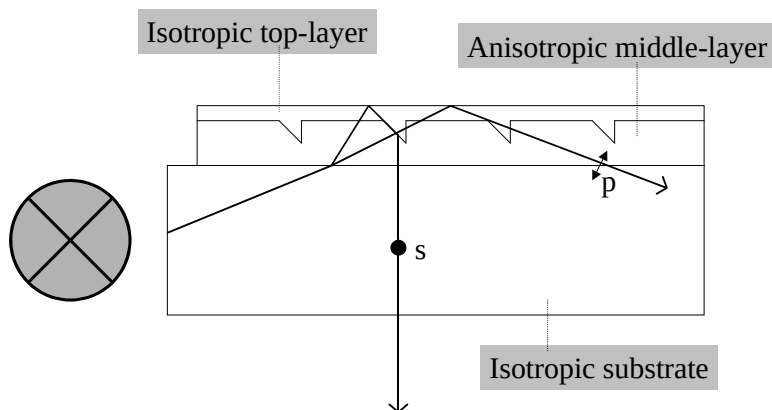


Fig. 3-2 Voorbeeld van de stralinggang van een structuur met zaagrand grating

Het hierboven beschreven systeem bestaat uit de volgende componenten:

- Een isotroop substraat, d.w.z. met een uniforme brekingsindex, van bijvoorbeeld polycarbonaat (PC). De brekingsindex van het substraat ligt tussen de 2 brekingsindici van de anisotrope tussenlaag in.
- Een anisotrope tussenlaag, bijvoorbeeld een georiënteerde polyethylenetheraftalaat (PET) film. De brekingsindex in de oriëntatierichting is hoger dan de brekingsindex loodrecht op de oriëntatierichting is lager dan die van het substraat. In de “anisotropic middle-layer” is een grating aangebracht, die er voor zorgt dat het ingekoppelde licht uit het systeem geleidt wordt. De hoek waaronder het licht wordt uitgekoppeld is afhankelijk van de invalshoek van het licht, de hoek van de grating en de brekingsindex. De hoek van uitkoppeling van licht is afhankelijk van de hoek van de grating, zoals schematisch weergegeven in figuur 3-2.
- Een isotrope toplaag, dit is meestal een coating die vloeibaar aan te brengen is zodat alle gratings gevuld worden. De brekingsindex van de toplaag is gelijk aan de brekingsindex in de oriëntatierichting van de tussenlaag.
- De grating is aangebracht d.m.v. graveren, etching, laserschrijven of andere technieken.
- Het substraat en de anisotrope tussenlaag zijn gelijmd m.b.v. een lijm die dezelfde brekingsindex als het substraat heeft.
- s en p staan voor s- en p-gepolariseerd licht.

Voor een uitgebreide beschrijving en uitleg van dit type systemen wordt verwezen naar de dissertatie van H.B. Jagt (2001).

Toepassing als innovatief venster

Wanneer het licht nu niet van de zijkant (d.m.v. een lamp) maar van de voor- of achterkant ingekoppeld wordt (d.m.v. de zon) is het mogelijk om selectief een polarisatierichting van het licht naar de zijkant van het systeem te leiden en de andere polarisatierichting gewoon recht door het systeem te leiden (zie figuur 3-3). Het is echter niet zonder meer waar dat dit omgekeerde principe met het zelfde rendement functioneert als bij de LCD toepassing. De stralengang van één lichtstraal is weliswaar omkeerbaar, maar het licht dat bij de CLD-toepassing uit het systeem gekoppeld wordt richting de LCD cellen, bestaat uit een specifieke mix van uitvalshoeken. In het geval van een omgekeerde werking (als innovatief venster) bestaat dit licht echter uit één invalshoek, namelijk de invalshoek van het directe zonlicht.

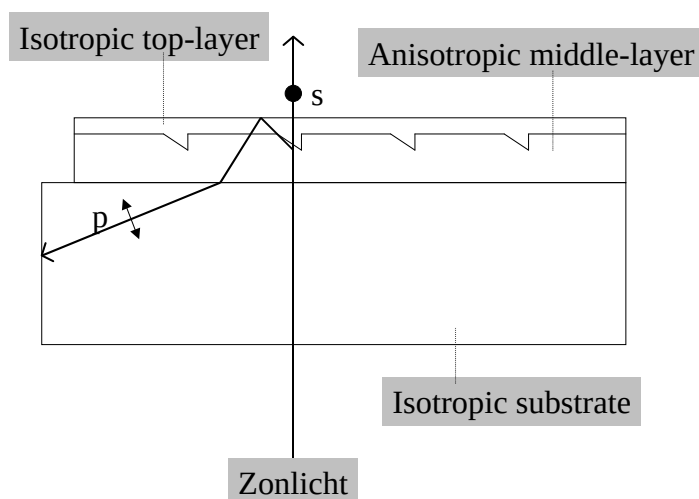


Fig. 3-3 Voorbeeld van de stralingsgang van een structuur met anisotrope middenlaag en zaagtand grating bij belichting aan de voor-of achterzijde

Het maximale percentage licht dat een dergelijk systeem, dat gepolariseerd licht produceert, kan afvangen is 50%. IR-straling behelst ongeveer 55% en zichtbaar licht 42% van de invallende zonne-energie. Dit systeem vangt zowel IR-straling als zichtbaar licht af. Selectief IR-straling afvangen is met het hier voorgestelde systeem niet mogelijk. De dispersie die optreedt in het systeem is daarvoor te gering.

Variant

Wanneer gebruik gemaakt wordt van een NIR-selectieve coating van de grating, zonder gebruik te maken van (splitsing in) gepolariseerd licht, dient onderzocht te worden of op basis van dit systeem het NIR-gedeelte van het direct invallend licht naar de zijkant(en) van het venster getransporteerd kan worden. Op deze zijkant(en) kunnen dan zonnecellen geplaatst worden, die het opgevangen NIR omzetten in elektriciteit.

Het feit dat het basisprincipe van de LCD toepassing, namelijk het gelijkmatig uitkoppelen van het ingekoppelde licht, niet zonder meer in omgekeerde vorm toegepast kan worden blijft echter van kracht. In hoeverre dit mogelijk is onderzocht met behulp van 3D computersimulaties van 4 varianten op het systeem, te weten:

- Naar binnen gerichte zaagtand-grating
- Naar buiten gerichte zaagtand-grating
- Naar binnen gerichte V-grating
- Naar buiten gerichte V-grating

Doordat geen gebruik gemaakt wordt van gepolariseerd licht is het principe van een active laag en een geleidend substraat niet stikt noodzakelijk. Toch is uit simulaties gebleken dat dit een gering voordeel oplevert ten opzichte van één laag.

Alle doorgerekende varianten hebben een breedte van 1 m, een dikte van 2 cm en eigenschappen zoals vermeld in Tabel 3-1. Het totale percentage van het oppervlak van het venster dat door de grating ingenomen is voor alle varianten gesteld op 25%.

Tabel 3-1 Eigenschappen van de gratingsystemen

	Actieve laag	Substraat
Dikte [mm]	10	10
Breukingsindex	1.680	1.585

Absorptie	Geen	Geen
-----------	------	------

3.2.2 Naar binnen gerichte zaagtand-grating

Een dwarsdoorsnede in de breedterichting van het systeem met een naar binnen gerichte zaagtand grating is weergegeven in figuur 3-4.

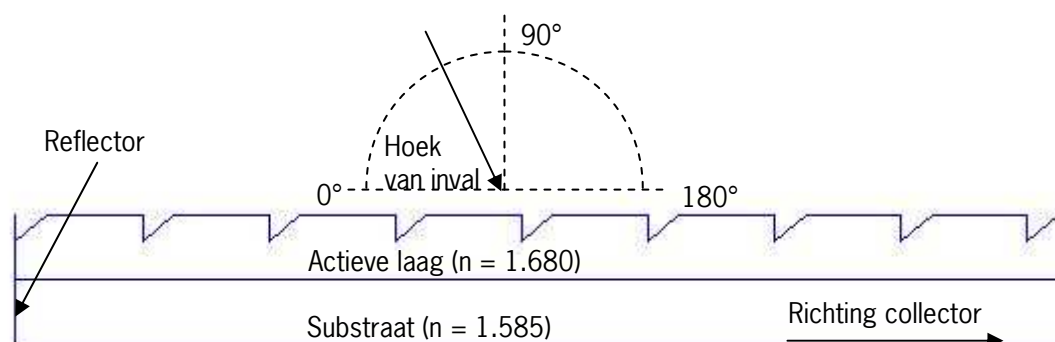


Fig. 3-4 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van de variant met naar binnen gerichte zaagtand grating.

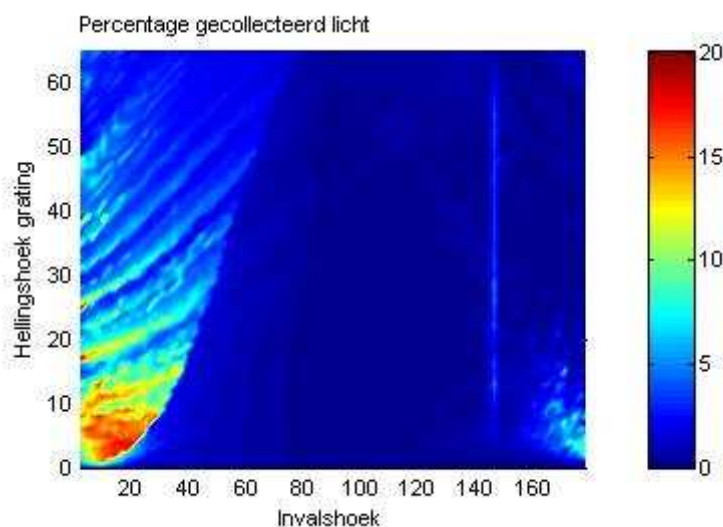


Fig. 3-5 Percentage gecollecteerd licht als functie van de invalshoek en hoek van de grating.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en de hoek van de grating weergegeven in Fig. 3-5. Uit deze resultaten blijkt dat de opbrengsten alleen bij lage invalshoeken tot 30° redelijk zijn (maximaal 20%) en voor een groot bereik van invalshoeken lager dan 10% liggen zijn.

3.2.3 Naar buiten gerichte zaagtand-grating

Een dwarsdoorsnede in de breedterichting van het systeem met een naar buiten gerichte zaagtand grating is weergegeven in figuur 3-6.

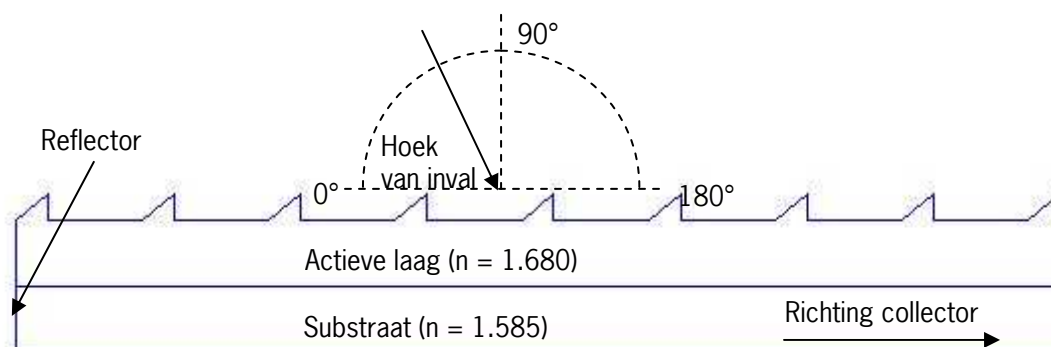


Fig. 3-6 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van de variant met naar buiten gerichte zaagtand grating.

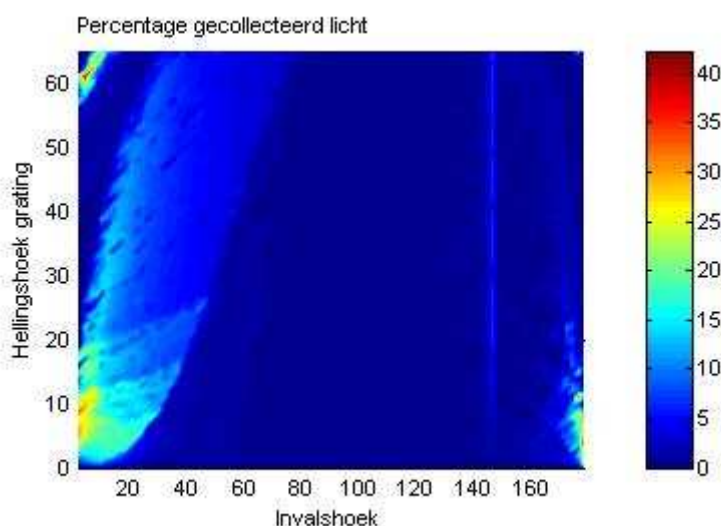


Fig. 3-7 Percentage gecollecteerd licht als functie van de invalshoek en hoek van de grating.

In Fig. 3-7 zijn de resultaten van de Raypro berekeningen weergegeven als functie van de invalshoek en gratinghoek. Uit deze resultaten blijkt dat de opbrengst alleen redelijk hoog is bij zeer kleine invalshoeken. In dit geval is de opbrengst maximaal 40% bij invalshoeken kleiner dan 5°. Voor invalshoeken tot ca. 30° is de opbrengst ca. 20%

3.2.4 Naar binnen gerichte V-grating

Bij een V-grating, zoals weergegeven in Fig. 3-8, wordt het licht naar beide zijanten verspreid, waardoor aan beide zijanten een collector geplaatst moet worden. Omdat gemiddeld het licht een kleinere afstand aflegt, kan een hogere opbrengst verwacht worden.

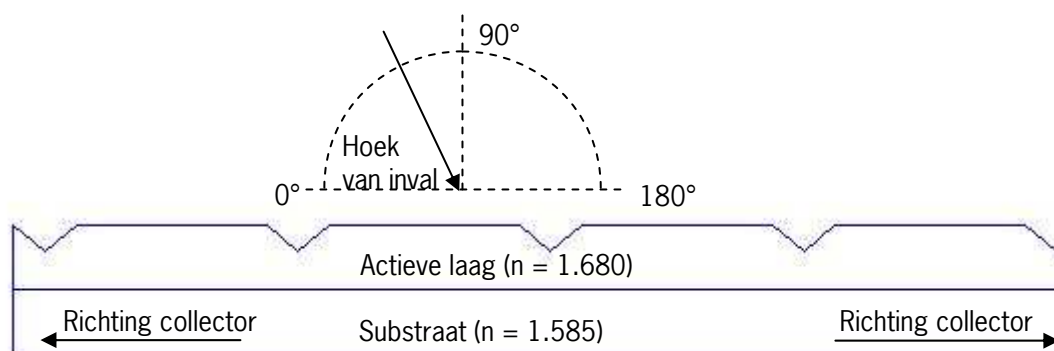


Fig. 3-8 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van de variant met een naar binnen gerichte V-Grating.

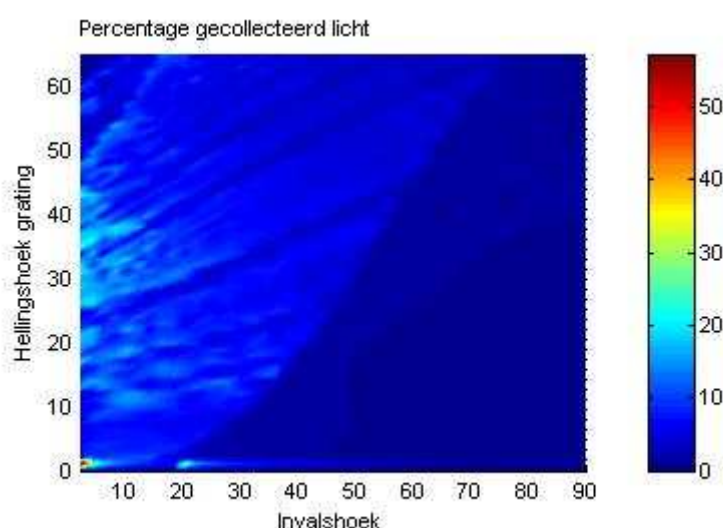


Fig. 3-9 Percentage gecollecteerd licht als functie van de invalshoek en hoek van de grating.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en groefhoek weergegeven in Fig. 3-9. In deze figuur is de maximale hoek 90° omdat de structuur symmetrisch is. Uit de figuur blijkt dat alleen bij zeer kleine invalshoeken tot ca. 4° een hoge opbrengst tot 55% gehaald kan worden. Bij grotere hoeken tot 35° daalt de opbrengst tot ca. 15%.

3.2.5 Naar buiten gerichte V-grating

Bij een V-grating, zoals weergegeven in Fig. 3-10, wordt het licht naar beide zijanten verspreid, waardoor aan beide zijanten een collector geplaatst moet worden. Omdat gemiddeld het licht een kleinere afstand aflegt, kan een hogere opbrengst verwacht worden.

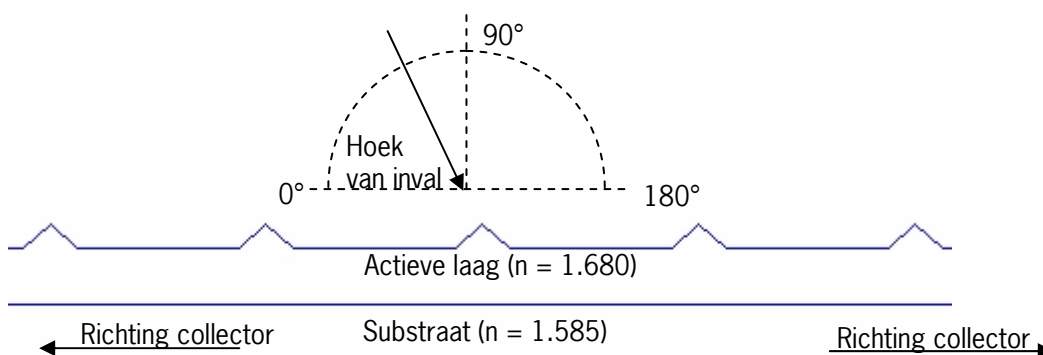


Fig. 3-10 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van de variant met een naar buiten gerichte V-Grating.

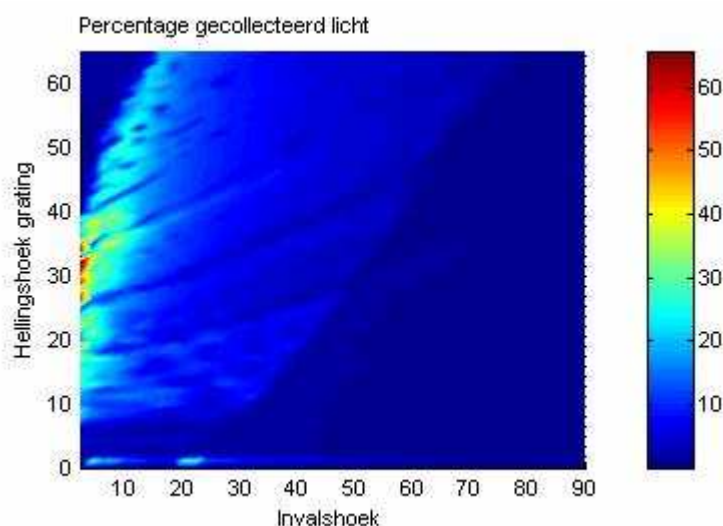


Fig. 3-11 Percentage gecollecteerd licht als functie van de invalshoek en hoek van de grating.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en groefhoek weergegeven in Fig. 3-11. In deze figuur is de maximale hoek 90° omdat de structuur symmetrisch is. Uit de figuur blijkt dat alleen bij kleine invalshoeken tot ca. 10° (bij een hellingshoek van ca. 35°) een hoge opbrengst tot 65% gehaald kan worden. Bij grotere hoeken tot 50° daalt de opbrengst tot ca. 15%.

3.2.6 Repeterende uitvoeringen Micro-grating

Door aan één zijde van een homogeen transparant materiaal een V-grating aan te brengen wordt invallend licht in het materiaal verstrooid en naar de zijanten getransporteerd. Dit effect is optimaal als de hoek, waaronder het licht verstrooid wordt, groter is dan de grenshoek. De zijanten van het materiaal worden voorzien van zonnecellen. Een venster ontstaat door een (groot) aantal afzonderlijke elementen naast elkaar te plaatsen. Hierdoor kan een venster verkregen worden met afmetingen die in principe onbeperkt zijn.

Kritische factoren voor de hoeveelheid gecollecteerd licht zijn:

1. de dikte van het materiaal
2. de breedte van het materiaal
3. het percentage oppervlak dat van de grating voorzien is
4. de hellingshoek van de grating
5. de invalshoek

In de volgende paragrafen zijn 3 varianten doorgerekend:

1. Een aaneengesloten V-grating die 25% van het oppervlak bedekt, gecentreerd in het midden van elk element.
2. Een V-grating die 25% van het oppervlak bedekt homogeen verdeeld over het oppervlak.
3. Een aaneengesloten zaagtand-grating die 50% van het oppervlak bedekt, vanuit één kant aangebracht.

Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

4. De brekingsindex van het materiaal is 1.6.
5. De dikte van het materiaal is 10 mm.
6. De dikte van de grating is 1 mm.

De resultaten worden in de volgende paragrafen gepresenteerd als functie van de breedte van de afzonderlijk elementen, de hellingshoek van de grating en de invalshoek van het licht.

3.2.7 Elementen met gecentreerde V-grating

Een element met een gecentreerde V-Grating op 25 % van het oppervlak is weergegeven in figuur 3-12. De elementen worden samengesteld tot een groter transparant vlak zoals weergegeven in Fig. 3-13.

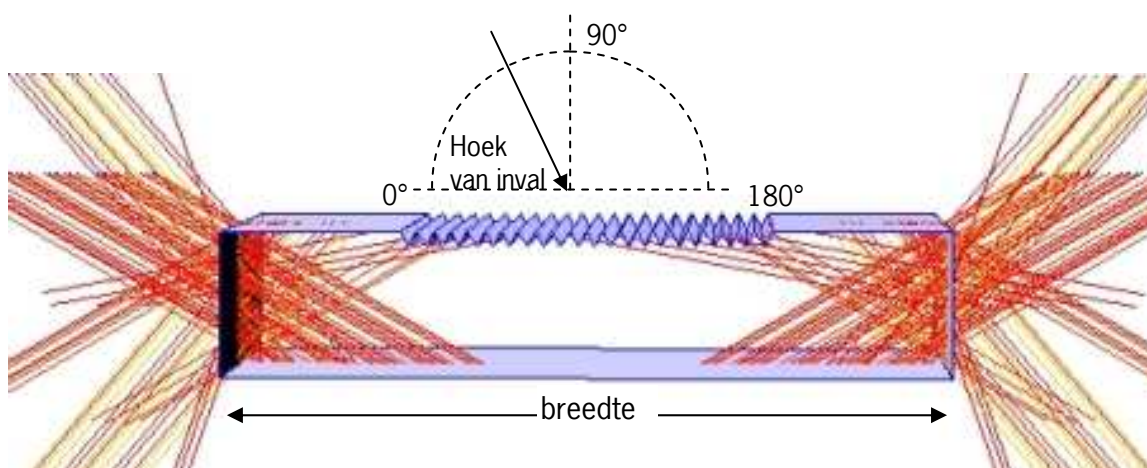


Fig. 3-12. Dwarsdoorsnede in de breedterichting van een element met gecentreerde V-grating en de door zonnecellen gecollecteerde lichtstralen bij een hoek van inval van 90° . De zonnecellen bevinden zich in het linker en rechter zijvlak.

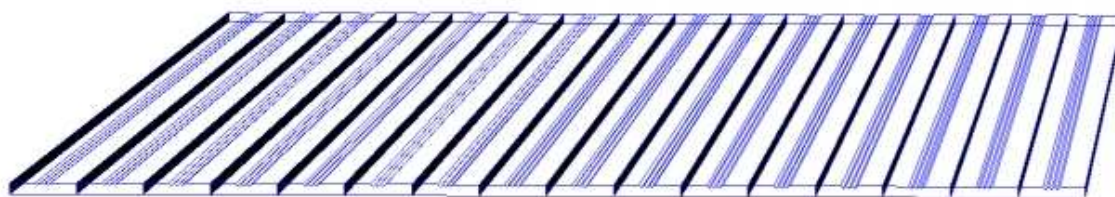


Fig. 3-13 Mogelijke uitvoeringsvorm van het innovatief venster uitgaande van het repeterend element met gecentreerde V-grating.

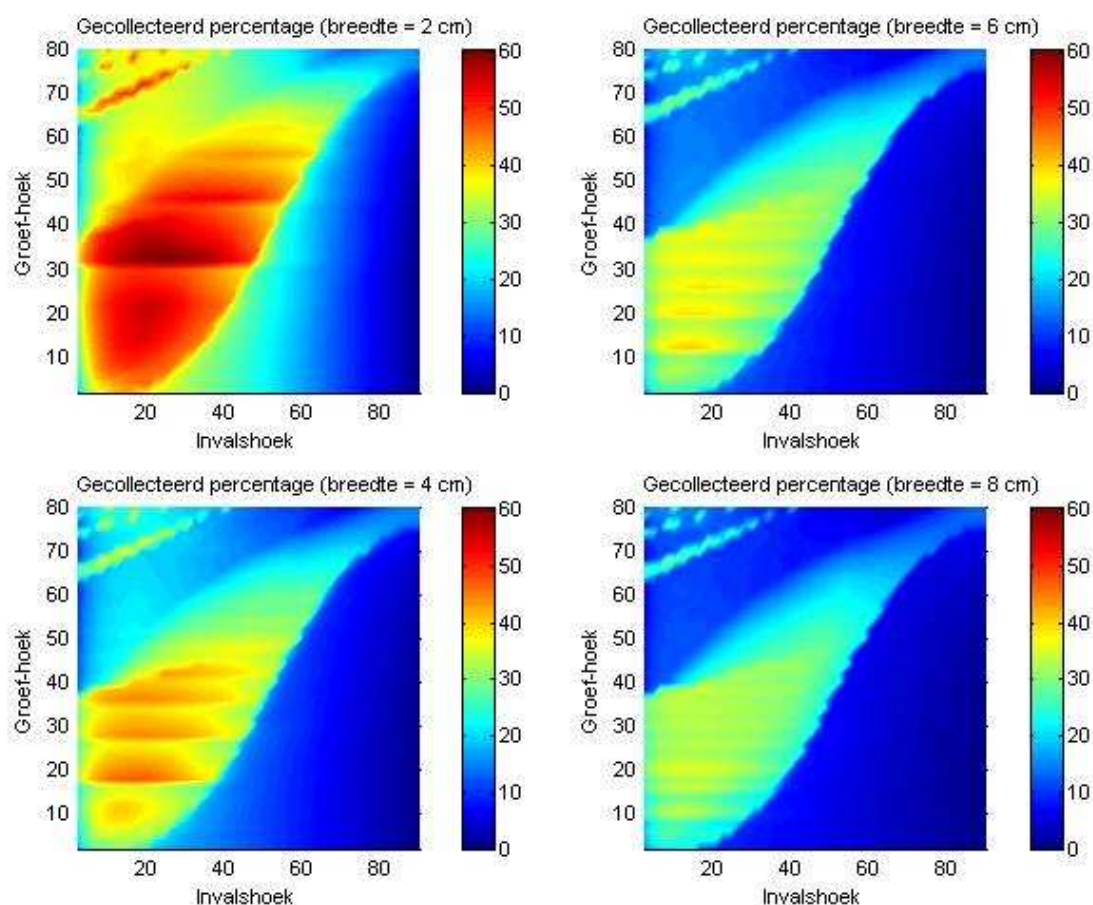


Fig. 3-14 Percentage van het totaal invallend licht dat door de zonnecellen opgevangen wordt, bij verschillende breedtes van het element.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn voor vier verschillende elementbreedtes, als functie van de invalshoek en groefhoek, weergegeven in Fig. 3-14. In deze figuur is de maximale hoek weer 90° omdat de structuur symmetrisch is. De opbrengsten zijn in het algemeen lager (aflopend van 60% via 50% en 40% naar 35%) naarmate de elementen breder zijn (breedte 2, 4, 6, en 8 cm). De invalshoeken, waarbij deze opbrengst bereikt wordt, zijn wat groter, namelijk $20-45^\circ$ (bij constante groefhoek). In tabel 3-2 zijn de voor- en nadelen gegeven voor deze structuur.

Tabel 3-2 Overzicht van de resultaten van de repeterende gecentreerde V-grating

Voor	Tegen
------	-------

Eigendom van Agrotechnology and Food Innovations B.V. Niets uit dit document mag worden gebruikt, vermeerderd of gedistribueerd zonder schriftelijke toestemming van Agrotechnology and Food Innovations B.V.

1. Redelijk rendement onder groot bereik van invalshoeken. 2. Door repeterende vorm is in principe een onbeperkte breedte mogelijk 3. Eenvoudige productie mogelijk	4. Collector is in stroken verspreid over het venster, waardoor het venster alleen in loodrechte richting volledig transparant is (lamelleneffect) 5. De strook met de groeven vervormt het beeld ernstig
---	--

3.2.8 Elementen met naar buiten gerichte V-grating

Een element met een naar buiten gerichte V-Grating op 25 % van het oppervlak is weergegeven in figuur 3-15. De elementen worden weer samengesteld tot een groter transparant vlak, zoals weergegeven in Fig. 3-13.

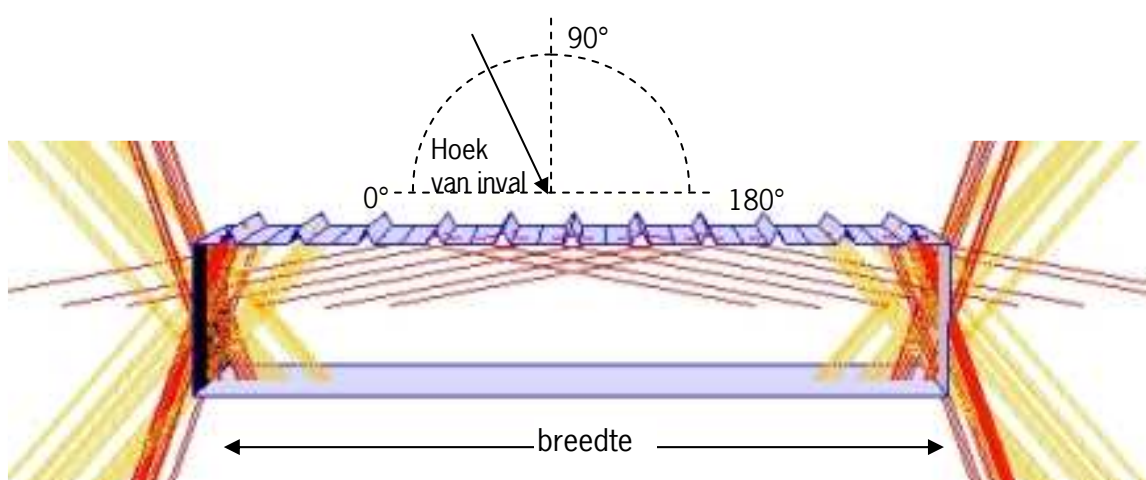


Fig. 3-15 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van een element met de naar buiten gerichte V-grating en de door zonnecellen gecollecteerde lichtstralen bij een hoek van inval van 90°. De zonnecellen bevinden zich in het linker en rechter zijvlak.

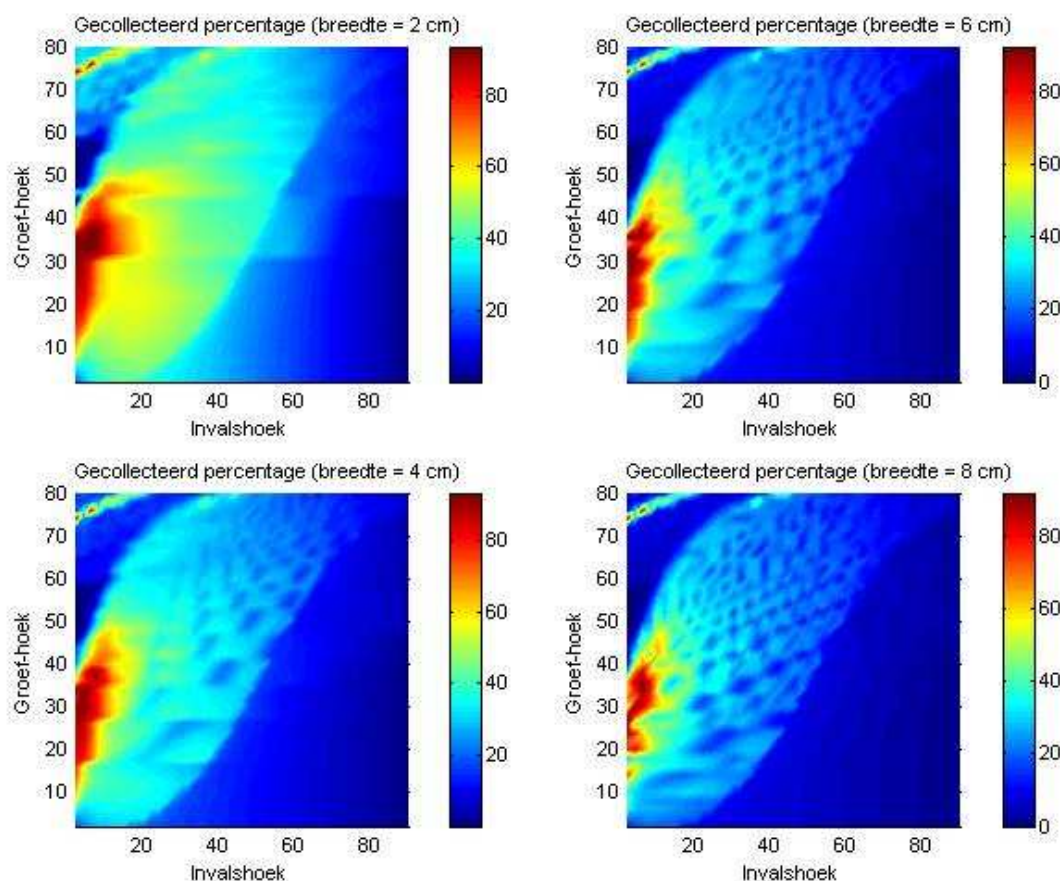


Fig. 3-16 Percentage van het totaal invallend licht dat door de zonnecellen opgevangen wordt, bij verschillende breedtes van het element.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn voor vier verschillende elementbreedtes als functie van de invalshoek en groefhoek weergegeven in Fig. 3-16. In deze figuur is de maximale hoek weer 90° omdat de structuur symmetrisch is. De opbrengsten (maximaal 90%) zijn niet hoger bij smallere elementen (breedte 2, 4, 6, en 8 cm). De invalshoeken, waarbij deze opbrengst bereikt wordt, zijn klein. Het gebied is iets groter bij smallere elementen, namelijk $0-10^\circ$ bij het 2 cm element en $0-4^\circ$ bij het 4 cm element. In tabel 3-3 zijn de voor- en nadelen gegeven van deze structuur.

Tabel 3-3 Overzicht van de resultaten van de repeterend naar buiten gerichte V-grating

Voor	Tegen
1. Beeldvorming blijft beperkt 2. Door repeterende vorm is in principe een onbeperkte breedte mogelijk 3. Eenvoudige productie mogelijk	4. Collector is in stroken verspreid over het venster waardoor het venster alleen in loodrechte richting volledig transparant is (lamelleneffect) 5. Hoog rendement slechts voor een klein bereik van invalshoeken

3.2.9 Elementen met buiten gerichte zaagtand

Een element met een naar buiten gerichte zaagtand op 25 % van het uiteinde van het oppervlak is weergegeven in figuur 3-17. De elementen worden weer samengesteld tot een groter transparant vlak zoals weergegeven in Fig. 3-13.

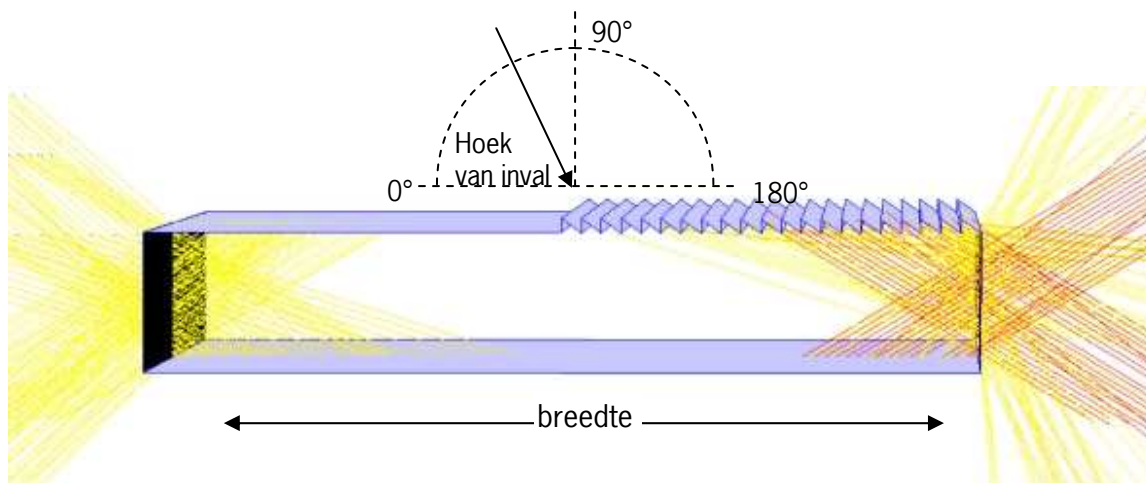


Fig. 3-17 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van een element van de verkorte naar buiten gerichte zaagtand met de door zonnecellen gecollecteerde lichtstralen bij een hoek van inval van 90° . De zonnecellen bevinden zich in het linker en rechter zijvlak.

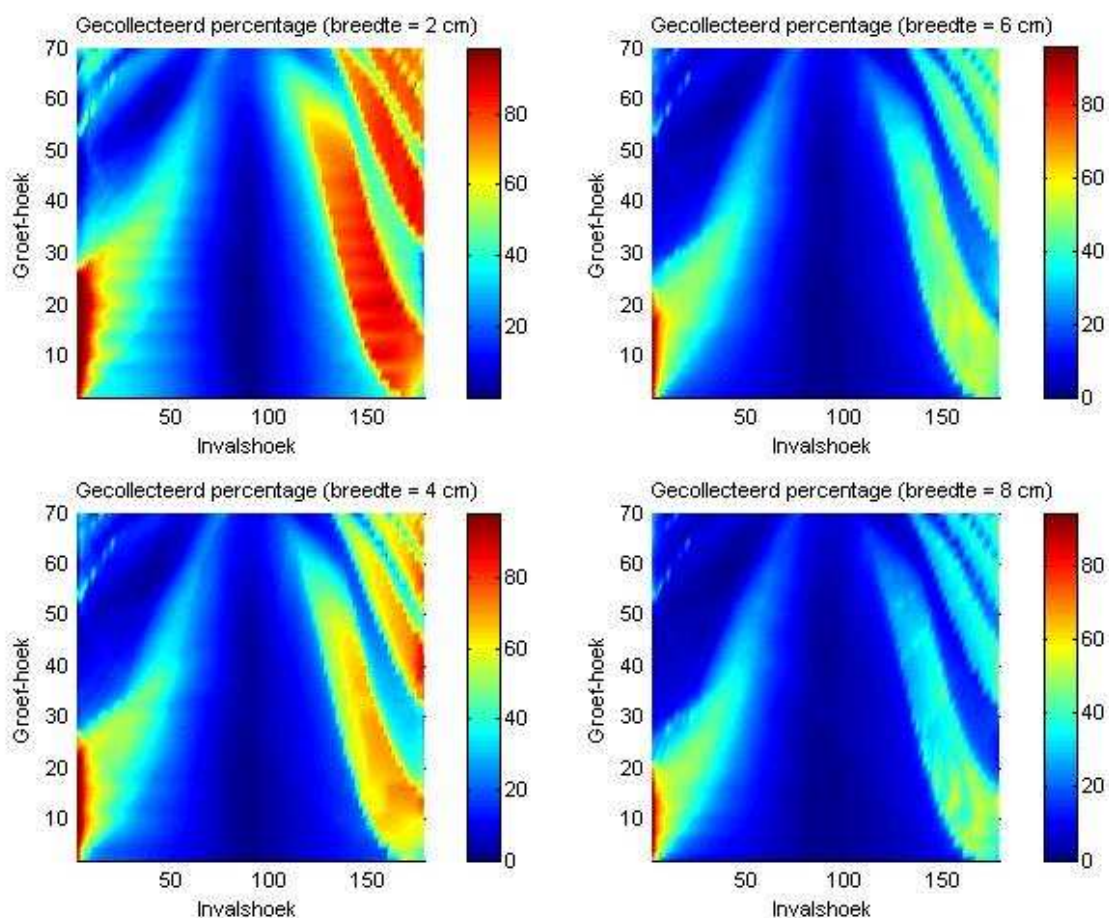


Fig. 3-18 Percentage van het totaal invallend licht dat door de zonnecellen opgevangen wordt, bij verschillende breedtes van het element.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn voor vier verschillende elementbreedtes, als functie van de invalshoek en groefhoek, weergegeven in Fig. 3-18. De opbrengsten zijn in het algemeen lager (aflopend van 90% via 60% en 60% naar 40%) naarmate de elementen breder zijn (breedte 2, 4, 6, en 8 cm). De invalshoeken, waarbij deze opbrengst bereikt wordt, zijn $0-5^\circ$ en $120-180^\circ$ (bij constante groefhoek). In tabel 3-4 is een samenvatting gegeven van deze structuur.

Tabel 3-4 Overzicht van de resultaten van de repeterende verkorte naar buiten gerichte zaagtand

Voor	Tegen
1. Door repeterende vorm is in principe een onbeperkte breedte mogelijk 2. Eenvoudige productie mogelijk	3. Collector is in stroken verspreidt over het venster waardoor het venster alleen in loodrechte richting volledig transparant is (lamelleneffect) 4. Hoog rendement slechts voor een klein bereik van invalshoeken

3.2.10 Taps toelopend materiaal

Materiaal met een hoge brekingsindex kan worden gebruikt als lichtgeleider. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de totale reflectie in het materiaal. Deze reflectie treedt op als de hoek met de normaal groter is dan de grenshoek. Een voorbeeld hiervan is een glasvezelkabel. Licht dat bij een glasvezelkabel aan het ene uiteinde ingebracht wordt, reflecteert een vrijwel onbeperkt aantal keer tegen de glasvezelwand onder de grenshoek. Bij totale reflectie treedt geen lichtverlies op, er is alleen demping door de absorptie van het geleidende materiaal. Deze demping is bij de huidige materialen echter zeer laag.

Bij een glasvezel wordt het licht aan een uiteinde ingekoppeld. Inkoppeling dwars op de lengterichting is niet mogelijk door de omkeerbaarheid van de stralengang. Dit is geïllustreerd in figuur 3-19.

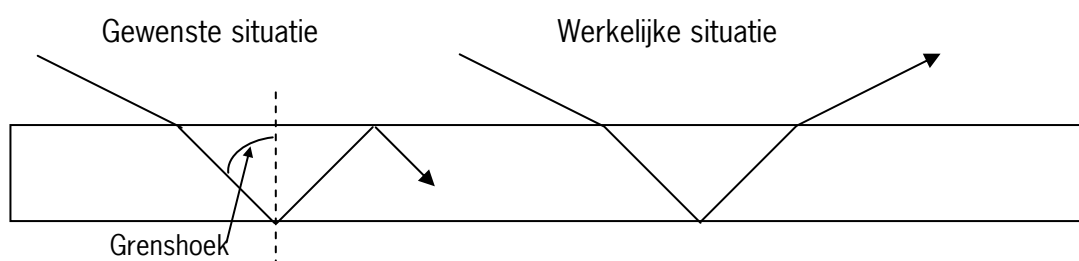


Fig. 3-19 Links de gewenste situatie: licht wordt ingekoppeld en reflecteert verder t.g.v. totale reflectie. Rechts de werkelijke situatie: licht dat ingekoppeld wordt zal onder dezelfde brekingsindex uitkoppelen.

Om ingekoppeld licht te behouden kan het materiaal taps toelopend worden uitgevoerd. Licht dat zodanig ingekoppeld wordt, dat de eerste interne reflectie onder de grenshoek plaatsvindt zal t.g.v. de tapse vorm verder totaal reflecteren onder een steeds groter wordende hoek. De hoek waaronder ingekoppeld wordt kan worden bereikt door òf aan de buitenkant van het venster (bovenkant in de figuren) òf aan de binnenkant van het venster (onderzijde in de figuren) een prismavorm respectievelijk reflector te plaatsen. Deze laatste optie heeft het voordeel, dat het percentage van het licht dat bij inkoppeling gereflecteerd wordt, zich al aan de binnenkant van het venster bevindt en dus als transmissie geldt. Hierdoor zal het transmissiegetal van het venster hoger liggen dan in het eerste geval.

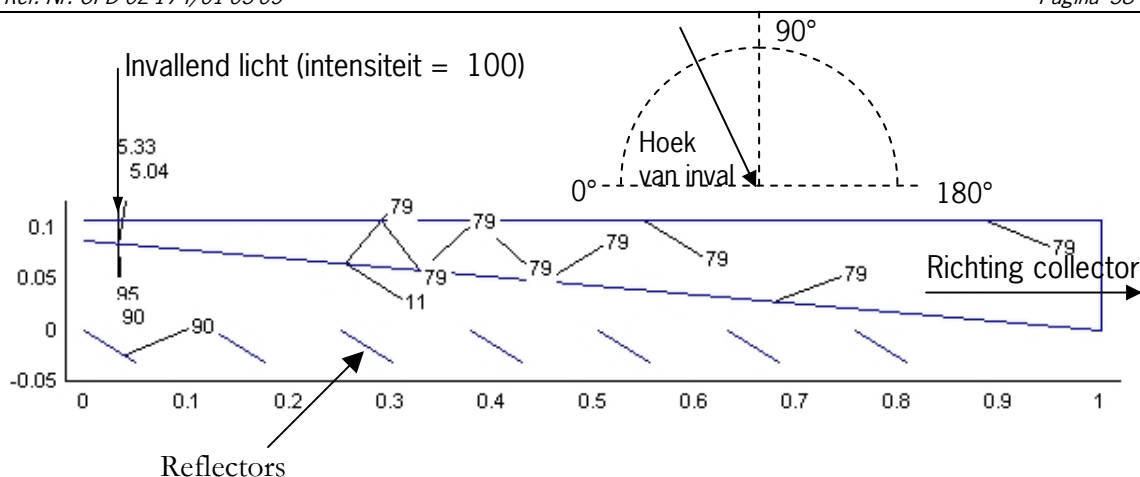


Fig. 3-20 Dwarsdoorsnede in de breedterichting van een taps toelopend systeem waarbij het ray-tracing proces gevisualiseerd is. Licht dat zodanig ingekoppeld wordt dat de eerste interne reflectie onder de grenshoek plaatsvindt, zal t.g.v. de tapse vorm in theorie tot in het oneindige verder (totaal) reflecteren onder een steeds groter wordende hoek. In de figuur is de stralengang weergegeven van één invallende lichtstraal onder een hoek van 90° (loodrecht) met het venster. De getallen bij de lichtstralen geven de resterende intensiteiten aan in percentage van de invallende intensiteit van 100%.

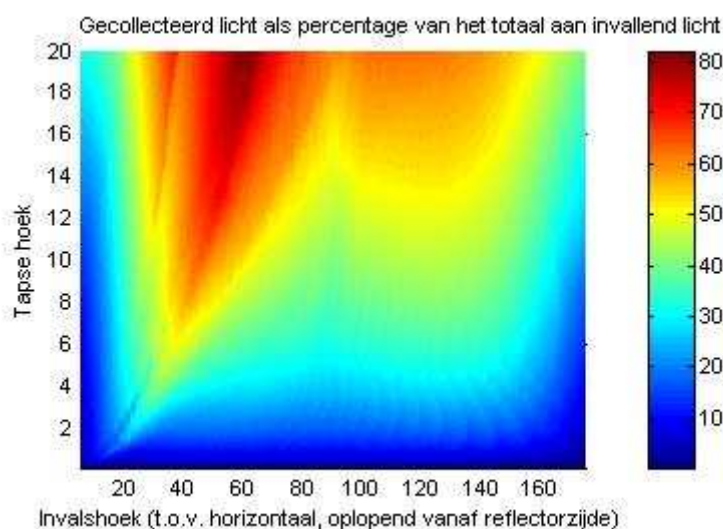


Fig. 3-21 Gecollecteerd licht als percentage van het totaal aan invallend licht als functie van de tapse hoek. De inkoppelings reflectoren zijn voor elke hoek van inval onder de optimale hoek gebracht.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en tapse hoek weergegeven in Fig. 3-21. De opbrengsten (maximaal 80%) zijn hoger bij grotere tapse hoek. De invalshoeken waarbij een redelijke opbrengst bereikt wordt zijn groot, namelijk 24-140° bij een constante tapse hoek van het venster. In tabel 3-5 zijn de voor- en nadelen gegeven van deze structuur. Deze structuren geven een grote opbrengst maar hebben als nadeel dat het beeld sterk vervormd wordt door de tapse structuur en dat de reflectoren geregeld moeten worden.

Tabel 3-5 Overzicht van de resultaten van het taps toelopen materiaal

Voor	Tegen
1. Hoog rendement mogelijk voor een grote range aanvalshoeken	2. Hoog rendement wordt pas bereikt bij tapse hoeken van $> 10^\circ$. Bij een venster van 1 m breedte betekent dit een minimale dikte van 18 cm. 3. Hoek van de reflectoren moeten "online" geregeld worden. 4. Het beeld wordt ernstig vervormd door de tapse vorm en door de reflectoren.

3.2.11 Repeterend taps toelopen materiaal

In de vorige paragraaf is er van uit gegaan dat het materiaal over de gehele vensterbreedte taps toeloopt. Bij toenemende hoek neemt de opbrengst toe maar ook de dikte van het venster. Om de dikte en het gewicht van het venster beperkt te houden, kan het venster repeterend worden toegepast (zie figuur 3-22). Nadeel hiervan is dat de collector nu over het venster verspreid moet worden en niet in de rand van het venster geplaatst is.

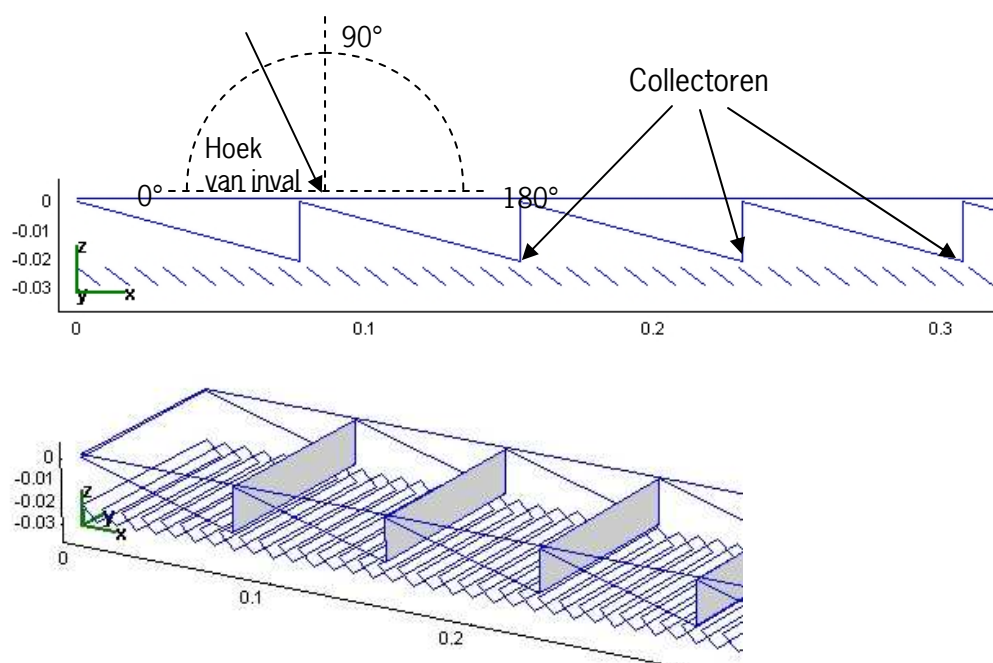


Fig. 3-22 Bovenste figuur: dwars doordnede in de breedterichting van repeterend taps toelopen materiaal. Dwars op het venster zijn de stroken PV geplaatst, onderaan de regelbare reflector die het NIR-gedeelte van het doorgelaten licht reflecteert en onder de optimale hoek inkoppelt in het taps toelopende materiaal. Onderste figuur: het systeem (met beperkte afmeting in lengterichting) weergegeven in 3D.

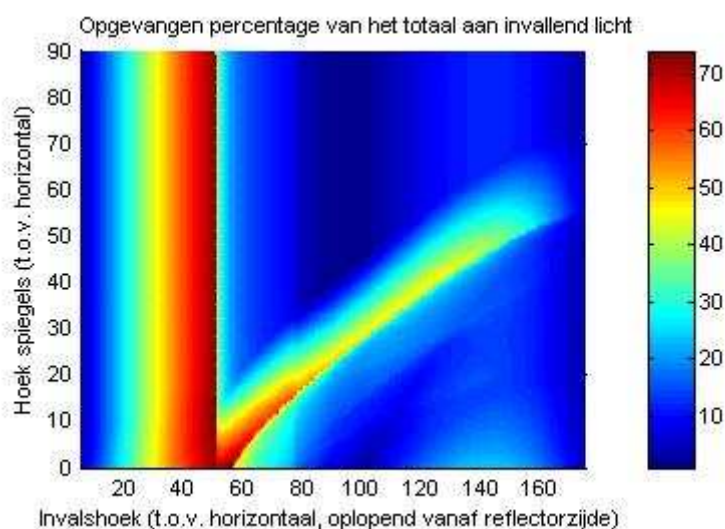


Fig. 3-23 Gecollecteerd licht als percentage van het totaal aan invallend licht als functie van de inkoppel-reflectors. De tapse hoek van het materiaal is 15° . Door de regelbare reflectoren kan voor vrijwel elke invalshoek een percentage van > 50 gehaald worden.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en hoek van de spiegels weergegeven in Fig. 3-23. De opbrengst (maximaal 90%) kan door regeling van de hoek van de spiegels optimaal geregeld worden. In het schuin weglappende optimum in fig. 3-23 is deze regeling een feit en is het bereik van de invalshoek groot. De invalshoeken, waarbij een redelijke opbrengst bereikt wordt, zijn dan $30-90^\circ$. In tabel 3-6 is een samenvatting gegeven van deze structuur. Deze structuren geven een grote opbrengst maar hebben als nadeel dat het beeld sterk vervormd wordt door de tapse structuur en dat de reflectoren geregeld moeten worden.

Tabel 3-6 Overzicht van de resultaten van het repeterend taps toelappend materiaal

Voor	Tegen
1. Hoog rendement mogelijk onder vrijwel alle invalshoeken 2. Door repeterende vorm is in principe een onbeperkte breedte mogelijk	3. Hoek van de reflectoren moeten "online" geregeld worden. 4. Het beeld wordt ernstig vervormd door de tapse vorm en door de reflectoren. Door extra tapse structuren kan dit nadeel echter vermeden worden. 5. Collector is in stroken verspreidt over het venster waardoor het venster alleen in loodrechte richting volledig transparant is (lamelleneffect)

3.2.12 Paraboolreflector

Een paraboolvorm kan loodrecht invallend licht gefocusseerd worden tot een brandpunt. Bij inval onder andere hoeken zal dit brandpunt zich verplaatsen, verbreden of verdwijnen. In de simulatieomgeving zijn verschillende typen parabolische reflectors gemodelleerd van de vorm $y = f x^2$. In onderstaande figuren is invloed van de factor f op de vorm weergegeven.

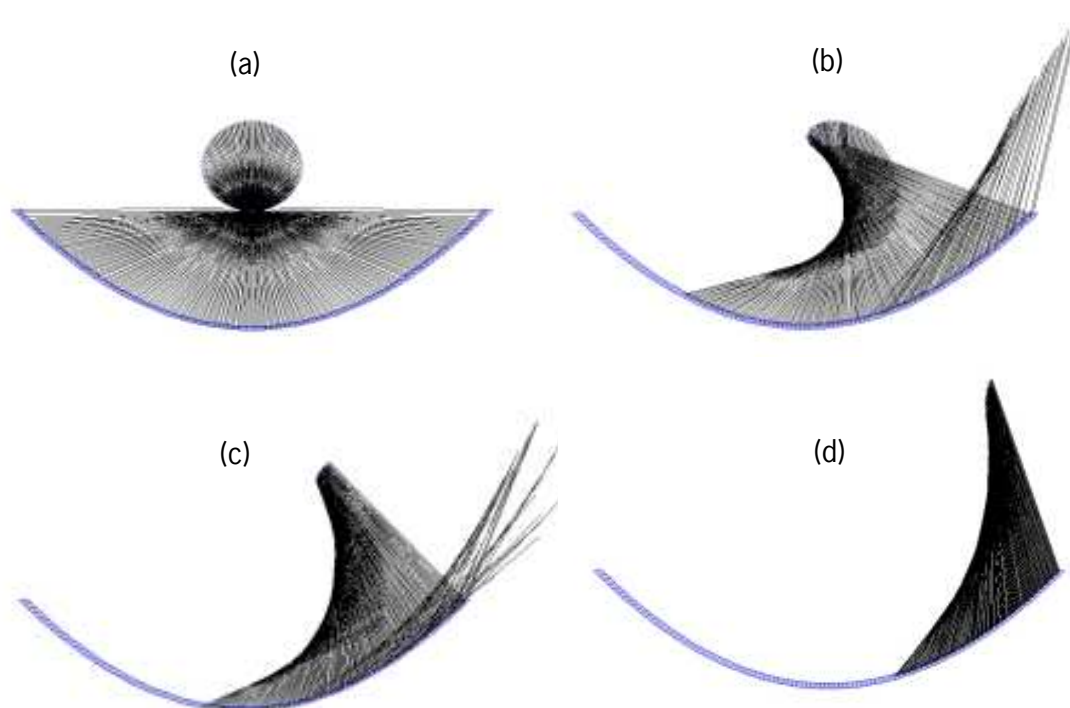


Fig. 3-24 De invloed van de factor f op de parabolische reflector volgens de formule $y = f x^2$.

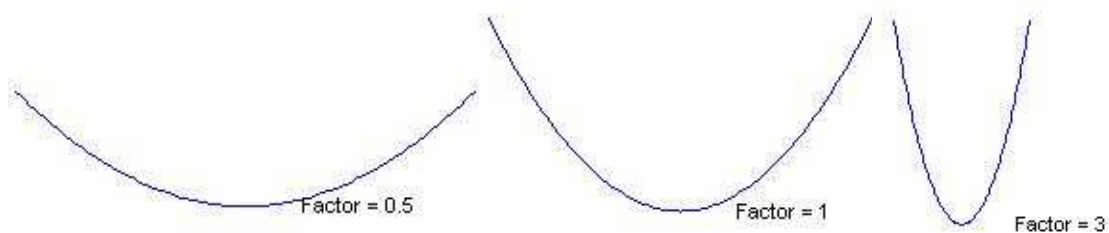


Fig. 3-25 Hoekafhankelijk inval op een parabolische reflector waarbij het brandpunt zich verbreedt. De hoek van inval t.o.v. verticaal is 0° (a), 20° (b), 45° (c) en 70° (d).

In Fig. 3-25 is de het brandpunt weergegeven bij verschillende invalshoeken. Uit deze figuren blijkt dat het brandpunt zich verbreed bij grotere invalshoeken.

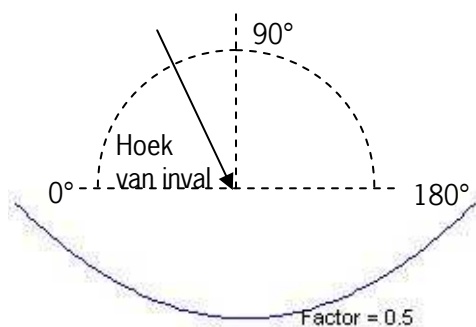


Fig. 3-26 Invalshoek ten opzicht van de parabolische reflector.

In het geval van het innovatief venster zal in het midden van deze parabolische reflector een stook met zonnecellen geplaatst worden en zal het geheel een x aantal keren naast elkaar geplaatst worden om de gewenste breedte van het venster te realiseren (zie figuur 3-27).

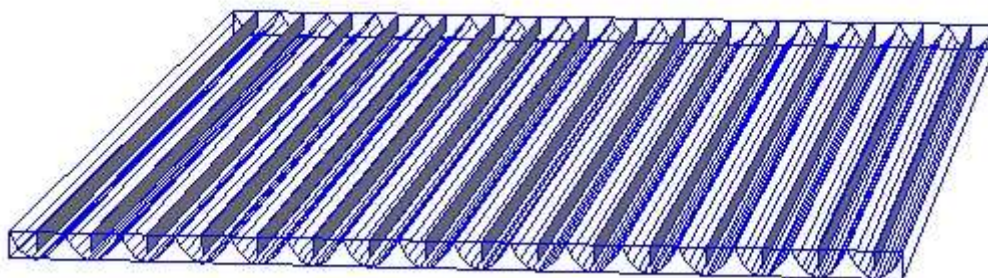


Fig. 3-27 Mogelijke uitvoeringsvorm van het innovatief venster uitgaande van de paraboolreflector.

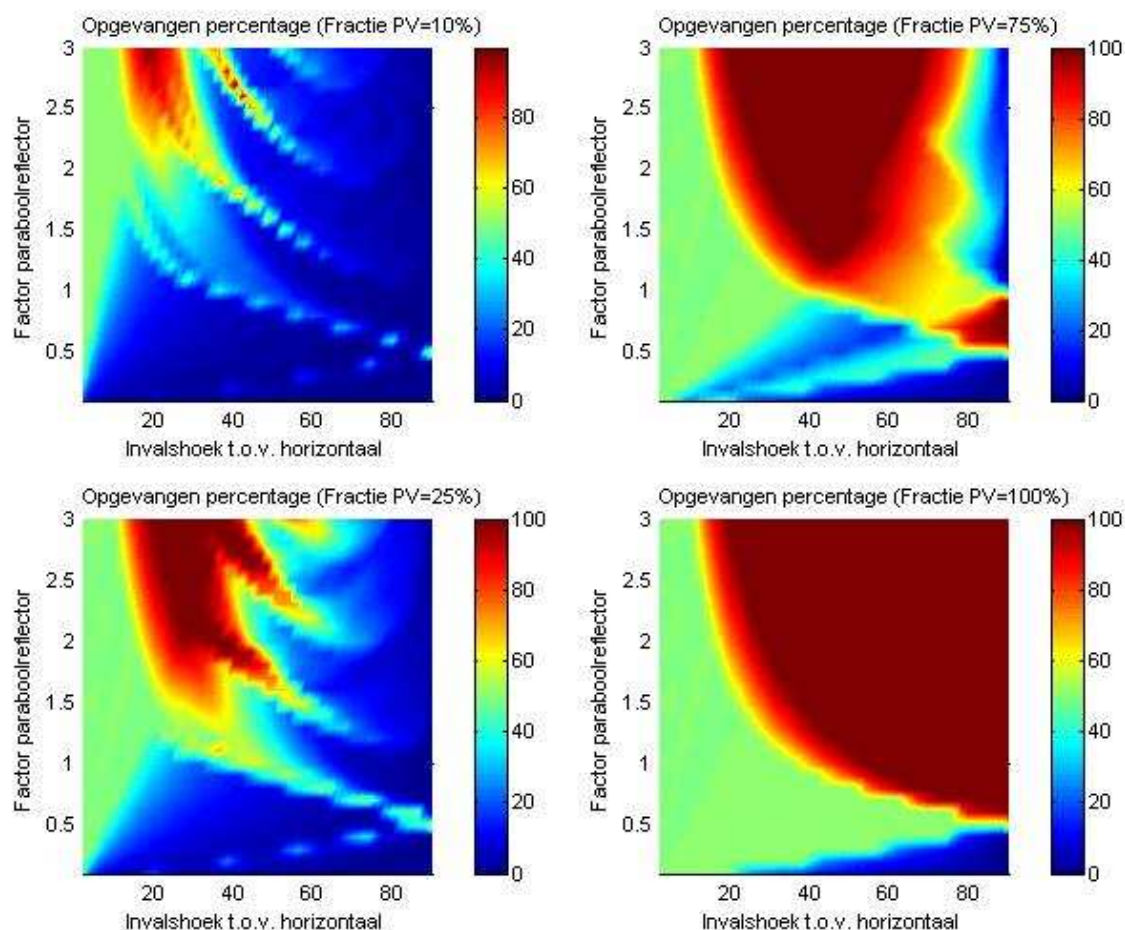


Fig. 3-28 Opgevangen licht als percentage van het totaal invallend licht in relatie tot de invalshoek en de factor f in de paraboolvergelijking $y = fx^2$ voor 4 verschillende PV-fracties.

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en f-parameter van de parabool weergegeven in Fig. 3-28 voor vier verschillende opvangpercentages van het collector oppervlak. De opbrengst is zeer hoog (maximaal 100%). De invalshoeken waarbij een maximale opbrengst bereikt wordt zijn 10-90°. In tabel 3-7 is een samenvatting gegeven van deze structuur.

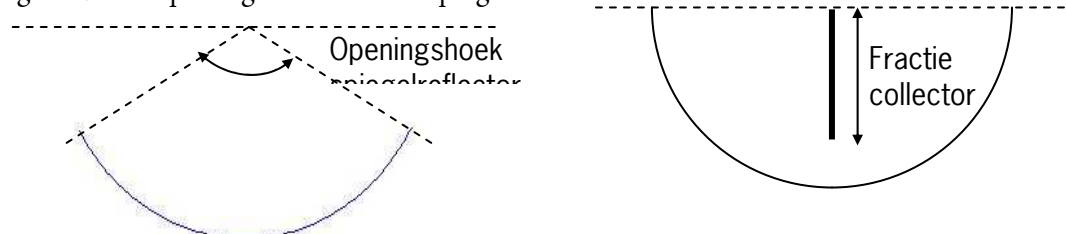
Tabel 3-7 Overzicht van de resultaten van paraboolvormige reflector

Voor	Tegen
- Zeer hoog rendement mogelijk onder groot bereik van invalshoeken. - Door repeterende vorm is in principe een onbeperkte breedte mogelijk	- Focusering van de bundel lukt alleen bij direct invallend licht, de collector-stroken moeten dus over vrijwel de volle dikte van het venster worden uitgevoerd. - Collector is in stroken verspreidt over het venster waardoor het venster alleen in loodrechte richting volledig transparant is (lamelleneffect)

3.2.13 Cirkelreflector

In plaats van een parabool kan ook een cirkel gebruikt worden om evenwijdig invallend licht te centreren. Waar bij de parabool de factor f in de formule $y = f \times x^2$ de vorm van de parabool bepaalt is bij de cirkel de openingshoek belangrijk (zie onderstaande figuur).

Fig. 3-29 De openingshoek van de spiegelreflector en de dikte-fractie van de collector



Met een cirkelvorm kan evenwijdig invallend licht gecentreerd worden. De mate van centrering is echter sterk afhankelijk van de openingshoek en de hoek van inval. In onderstaande figuur is voor vier hoeken van inval weergegeven in hoeverre het licht gecentreerd wordt.

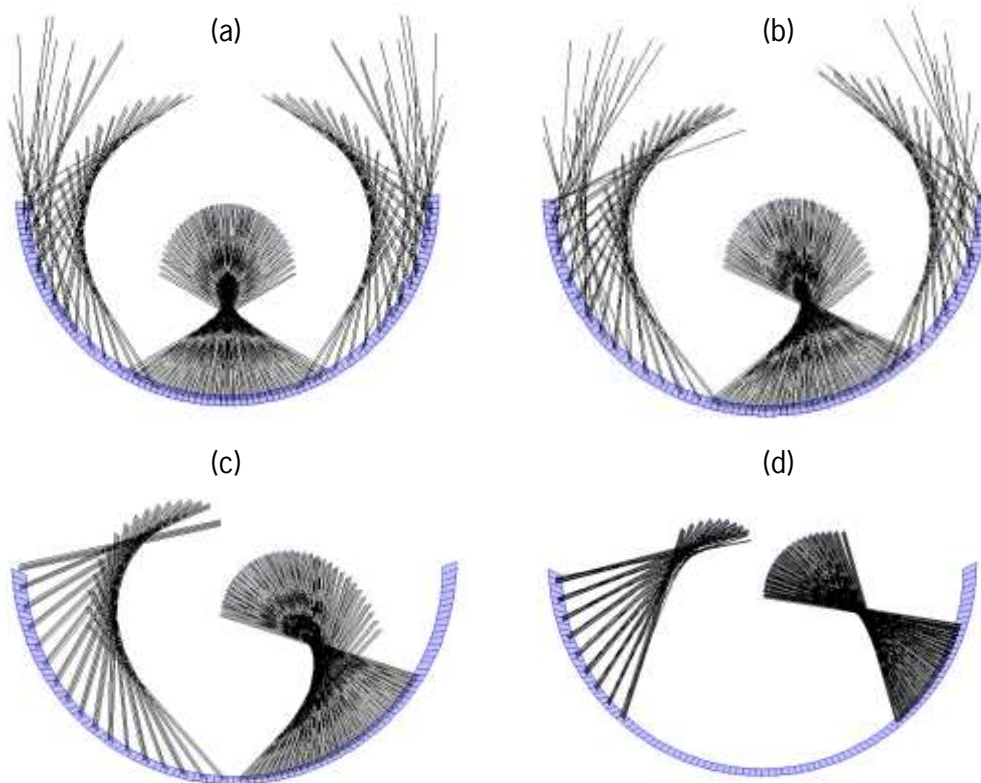


Fig. 3-30 Hoekafhankelijk inval op een cirkelvormige reflector waarbij het brandpunt zich verbreedt. De hoek van inval t.o.v. verticaal is 0° (a), 20° (b), 45° (c) en 70° (d).

In Fig. 3-30 is de het brandpunt weergegeven bij verschillende invalshoeken. Uit deze figuren blijkt dat het brandpunt zich minder verbreed bij grotere invalshoeken dan bij een parabolisch oppervlak.

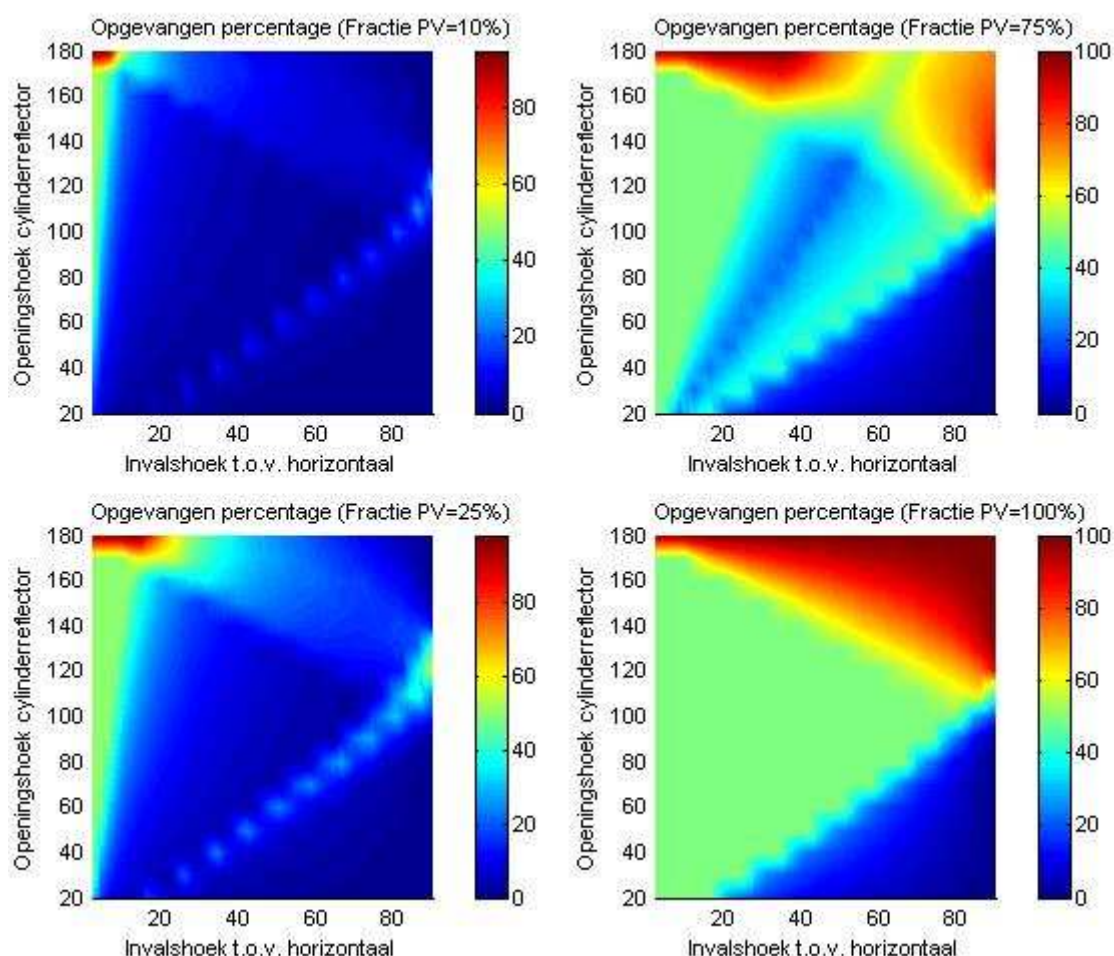


Fig. 3-31 Opgevangen licht als percentage van het totaal invallend licht in relatie tot de invalshoek van het licht en de openingshoek van de reflector voor 4 verschillende collector-fracties (PV-fracties).

De resultaten van de Raypro berekeningen zijn als functie van de invalshoek en openingshoek van de cirkelvormige reflector weergegeven in Fig. 3-31 voor vier verschillende opvangpercentages van het collector oppervlak. De opbrengst is zeer hoog (maximaal 100%). De invalshoeken waarbij een maximale opbrengst bereikt wordt zijn in het gunstigste geval (fractie PV=100% en een openingshoek van 180°) 0-90°. In tabel 3-8 is een samenvatting gegeven van deze structuur.

Tabel 3-8 Overzicht van de resultaten van cirkelvormige reflector

Voor	Tegen
- Zeer hoog rendement mogelijk onder groot bereik van invalshoeken. - Door repeterende vorm is in principe een onbeperkte breedte mogelijk - De cirkelvorm is eenvoudiger te produceren dan de paraboolvorm.	- Focusering van de bundel lukt slecht, de collectorstroken moeten dus over vrijwel de volle dikte van het venster worden uitgevoerd. - Collector is in stroken verspreidt over het venster waardoor het venster alleen in loodrechte richting volledig transparant is (lamelleneffect)

3.2.14 Geregelde paraboolreflector

In plaats van een vaste paraboolreflector kan de hoek van de reflectoren zodanig worden geregeld dat deze loodrecht op het directe zonlicht worden gericht. Dit kan door het on-line meten en maximaliseren van het afgegeven vermogen.

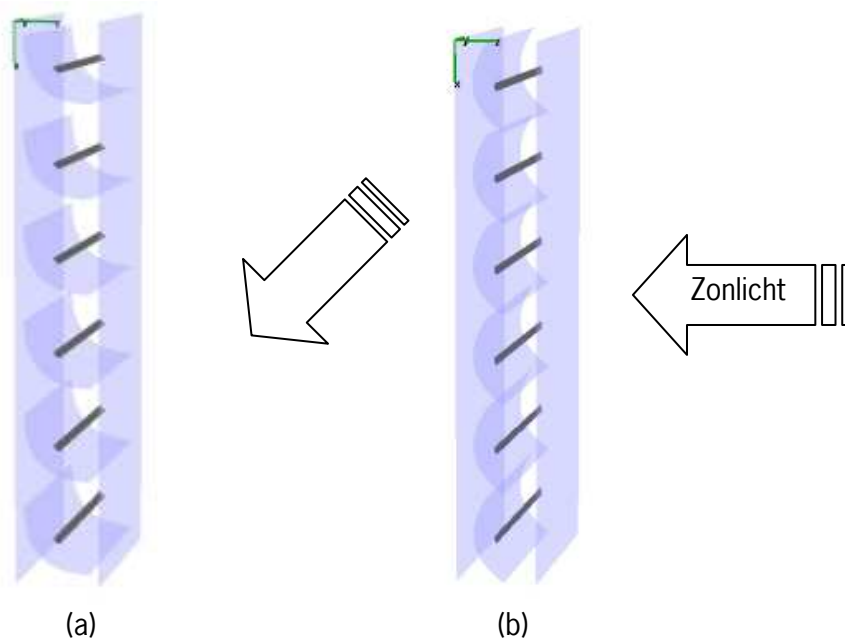


Fig. 3-31 Zijaanzicht van een innovatief venster met geregelde paraboolreflectoren waarbij de zon hoog (a) en laag staat (b).

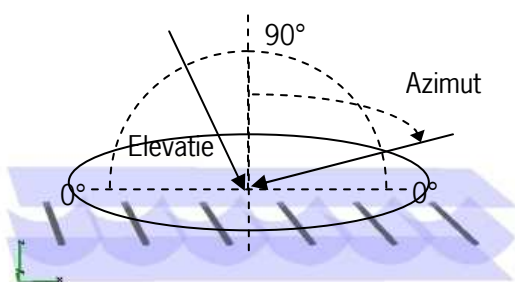


Fig. 3-32 Definitie van azimuth en elevatie horende bij onderstaande figuur

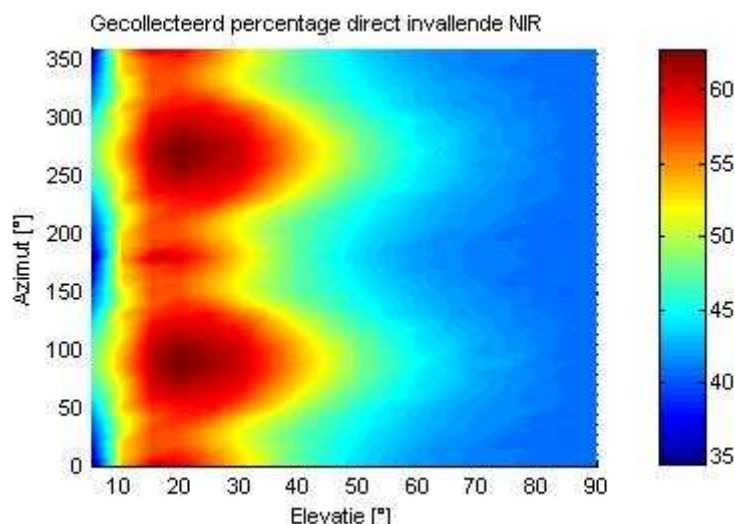


Fig. 3-33 Gecollecteerd percentage direct invallende NIR van een geregelde paraboolreflector bij alle azimuths en elevaties (t.o.v. een horizontaal liggend venster). De reflector heeft een loodrechte reflectiewaarde van 50% voor NIR en 8% voor VIS. In verticale positie op het zuiden ligt de azimuth van invallend zonlicht tussen de 180 en 360° en de elevatie tussen de 30 en 90°.

3.2.15 Geregelde kwart-cirkelreflector

Een cirkelvorm heeft een vergelijkbare focuserende werking als een paraboolvorm met het verschil dat bij een cirkelvorm het brandpunt (of brandlijn) breder is. Een groot voordeel van de cirkelvorm is echter dat bij het veranderen van de invalshoek er nog steeds een behoorlijke focusering optreedt in tegenstelling tot de parabool (zie de beschrijving bij de vaste halve-cirkelreflector). Door het meedraaien van de collector met het brandpunt, bij veranderende invalshoek, kan de afmeting van de collector veel kleiner blijven dan bij de halve-cirkelcollector. Door de collectoren steeds horizontaal te houden kan een maximale doorkijk verkregen worden.

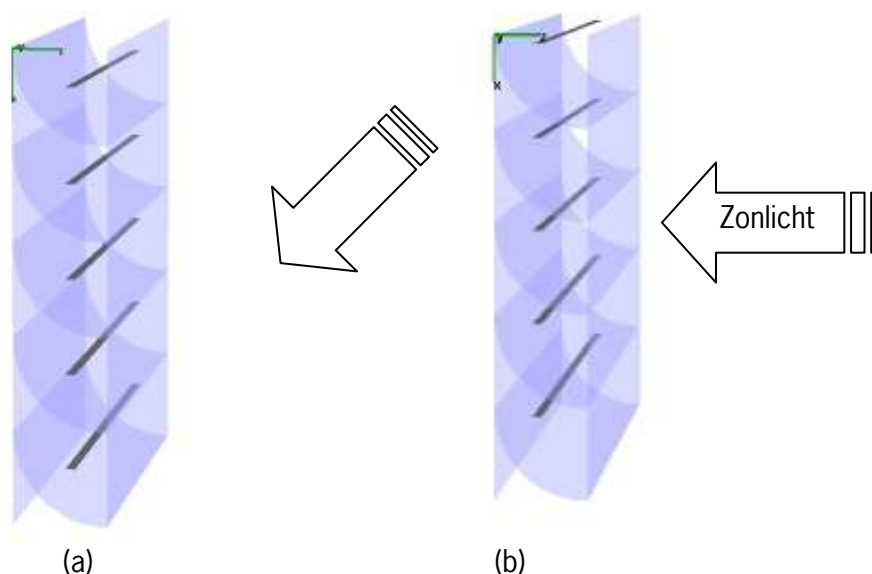


Fig. 3-34 Zijaanzicht van een innovatief venster met geregelde kwart-cirkelreflectoren waarbij het zonlicht onder een hoge (a) en lage (b) hoek invalt. In plaats van de hoek van de reflectoren te regelen zoals bij de paraboolreflector wordt de collector met het brandpunt meegedraaid.

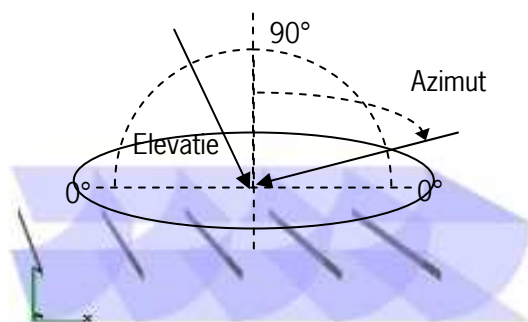


Fig. 3-35 Definitie van azimuth en elevatie horende bij onderstaande figuur

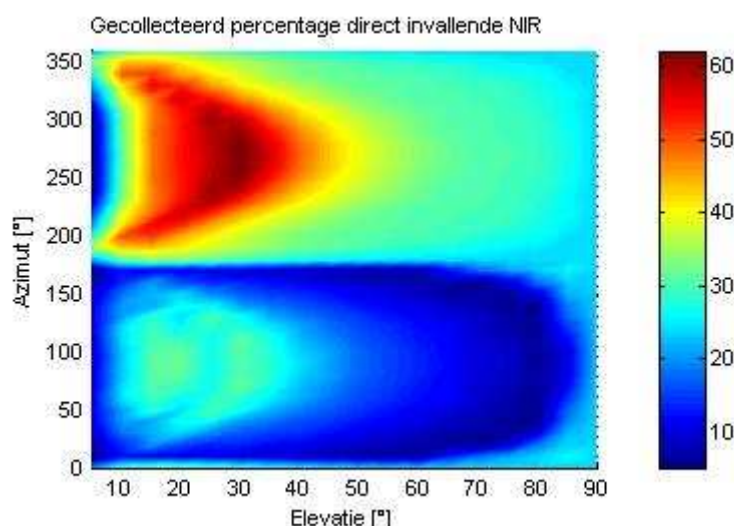


Fig. 3-36 Gecollecteerd percentage direct invallende NIR van een geregelde kwart-cirkelreflector bij alle azimuths en elevaties (t.o.v. een horizontaal liggend venster). De reflector heeft een loodrechte reflectiewaarde van 50% voor NIR en 8% voor VIS. In verticale positie op het zuiden ligt de azimuth van invallend zonlicht tussen de 180 en 360° en de elevatie tussen de 30 en 90°.

3.2.16 Samenvatting

In Tabel 3-9 zijn de belangrijkste parameters voor transparante venster systemen samengevat. Deze parameters zijn: de zichtbaar licht transmissie, eventuele beeldvervorming, de collectiefactor, de acceptatiehoek waaronder het systeem goed werkt en de mogelijkheid voor spectraal selectieve collectie (NIR-warmtestraling) van de opvallende zonnestraling. Voor de collectie factor is volgens de wet van Lambert een correctiefactor $\cos \theta$ nodig met θ de op pagina 24 aangegeven invalshoek. Omdat in de

figuren 3-23 de invalhoek α genomen is waarbij nul graden de horizontaal is wordt de correctie: $\cos(\frac{\pi}{2} - \alpha)$. Door de ongunstige invalshoeken voor de micrograting systemen

Tabel 3-9 Samenvatting van de raytracing berekeningen

Systeem	Details	Transmissie	Beeld	Acceptatiehoek α ¹ [°]	Collectiefactor [%]	gecorrigeerde collectiefactor [%]	NIR spec
Micrograting	Zaagtand naar binnen	hoog	goed	0-30	20	5,2	nee
Micrograting	Zaagtand naar buiten	hoog	goed	0-5 0-30	40 20	1,7 5,1	nee
Micrograting	V-grating naar binnen	hoog	goed	0-4 0-35	55 15	1,9 2,0	nee
Micrograting	V-grating naar buiten	hoog	goed	0-10 0-25	65 15	5,7 3,2	nee
Micrograting repeterend	Gecentreerde V-grating	hoog	slecht	5-55	60 (20mm) ³	49	nee
				5-55	50 (40mm) ³	41	
				5-55	40 (60mm) ³	33	
				5-55	35 (80mm) ³	29	
Micrograting repeterend	V-grating naar buiten	middel	matig	0-10	80	13,9	nee
Micrograting repeterend	Verkorte zaag-tand naar buiten	middel	slecht	0-5/120-180	90 (20mm) ³	7,8/45	nee
				0-5/120-180	60 (40mm) ³	5,2/30	
				0-5/120-180	60 (60mm) ³	5,2/30	
				0-5/120-180	30 (80mm) ³	2,6/15	
Tapsmateriaal ²	Enkel met regelbare refl.	laag	slecht	30-140	60-80	35-45	ja
Tapsmateriaal ² repeterend	met regelbare reflector	laag	slecht	30-90	60-70	52-61	ja
Reflector	Parabool	Laag-hoog	goed	10-90 ³	90 ³	63 ³	ja
Reflector	Cirkel	Laag-hoog	goed	0-90 ³	90 ³	63 ³	ja

¹⁾ Bij een vaste hoek van de grating structuur

²⁾ Bij deze systemen is een actieve regeling noodzakelijk van de reflecterende spiegels

³⁾ Afhankelijk van de breedte van de structuur (tussen haakjes aangegeven)

wordt het collectiefactor aanzienlijk verlaagd. Wanneer we als eis stellen dat de opbrengst redelijk groot moet zijn en het beeld van het systeem niet mag vervormen blijken de reflector systemen het beste te voldoen.

Tabel 3-10 Samenvatting van de berekende jaarlijkse energieopbrengst en transmissie

Opbrengst [kWh per m ² venster] (PV rendement is 15 %)	PV			Zonne- collector	Energiedichtheid per m ² zonnecel
	VIS	NIR	Totaal		
Dubbel glas	-	-	-	-	-
Standaard collector	42	42	84	476	-
Halve-cirkelcollector (vast)	21	45	46	261	84
Kwart-cirkelcollector (regelbaar)	3	13	17	96	46
Paraboolcollector (regelbaar)	3	15	19	108	168
Transmissie [MJ per m ² venster]	VIS	NIR	Totaal		
Dubbel glas	874	874	1747		
Standaard collector	-	-	-		
Halve-cirkelcollector (vast)	460	385	846		
Kwart-cirkelcollector (regelbaar)	744	467	1211		
Paraboolcollector (regelbaar)	716	460	1175		

Tabel 3-11 Voor-en nadelen van een verticaal systeem

Voordelen verticaal systeem	Nadeel
- Minder doorbuiging - Meester minder parabolen nodig dus minder onderdelen	- Visueel toont horizontaal iets beter

3.3 Prototype

3.3.1 Constructie

Om de berekeningen te kunnen verifiëren is een prototype van het venster ontwikkeld waarmee metingen uitgevoerd zijn.

In eerste instantie is getracht rekening te houden met standaardafmetingen van ramen en kozijnen maar dit bleek voor een prototype niet haalbaar. Om de hoeveelheid zonnecellen te beperken moet namelijk een hoge concentratiefactor bereikt worden. Gezien de minimaal verkrijgbare afmeting van zowel de VIS als NIR zonnecellen van 10 mm is voor een concentratiefactor van 10 een concentrator (lamel) van 100 mm breed nodig is. Voor het prototype is gesteld dat de concentratiefactor minimaal 10 moet zijn wat resulteert in een dikte van het venster van minimaal 100 mm (exclusief de afdekplaten).

In onderstaande figuur 3-37 is een constructietekening van het prototype weergegeven.

Tussen draaibare cirkelsegmentvormige aluminium schotels, bevestigd tegen de onder- en bovenkant van een vierkant aluminium frame, zijn optisch heldere kunststof (PET-G) lamellen ingeklemd. De lamellen met een breedte van 10 cm hebben een kromtestraal van 10 cm. De binnenafmetingen van het frame zijn 70 × 70 cm en bevat 7 lamellen. Tussen de schotels en in de focus zijn aluminium profielen geplaatst (10 × 5 mm) die aan de lamelzijde bekleed zijn met zonnecellen. Door de holeruimten stroomt een vloeistof ten behoeve van de koeling. De opgevangen warmte wordt in de koelvloeistof opgenomen en

d.m.v. een elektrisch pompje naar een radiator met ventilator afgevoerd. Aan de bovenkant van het venster bevindt zich een reservoir met koelvloeistof inclusief ontluchtingsmechanisme. Het instellen van de juiste hoek van de lamellen gebeurt met een stappenmotor die volgens een voor deze toepassing ontwikkelde regeling de lamellen continu onder de juiste hoek houdt. Het venster is aan voor- en achterzijde afgedicht met transparante 4-mm acrylaatplaten.

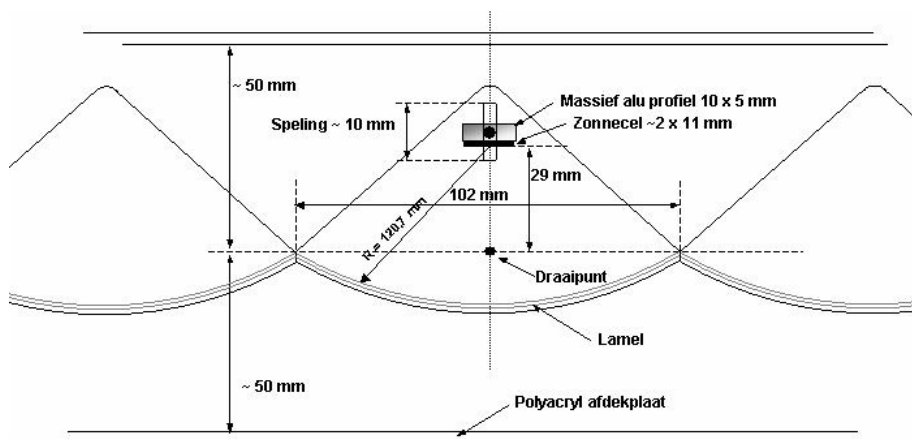


Fig. 3-37 Constructietekening van prototype innovatief venstersysteem (bovenaanzicht).



Figuur 3-38 Prototype innovatief venster op de testlocatie.



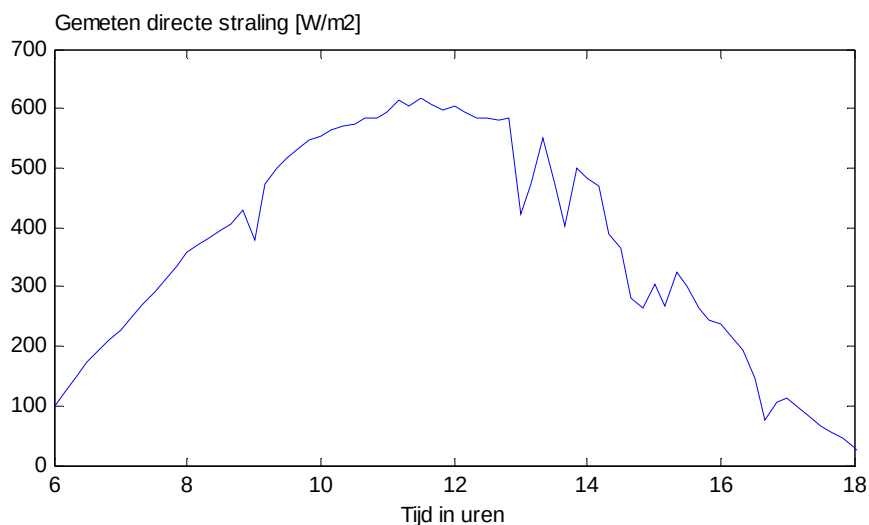
Figuur 3-39. Close-up van het prototype innovatief venster

In Figuur 3-38 en 3-39 zijn enige foto's van het systeem weergegeven. De lammelen zijn beplakt met een spectraal selectieve folie type LE35 AMARL waardoor overwegend infrarode straling gereflecteerd wordt. In Figuur 3-40 is de lichttransmissie en de reflectie van deze folie weergegeven.

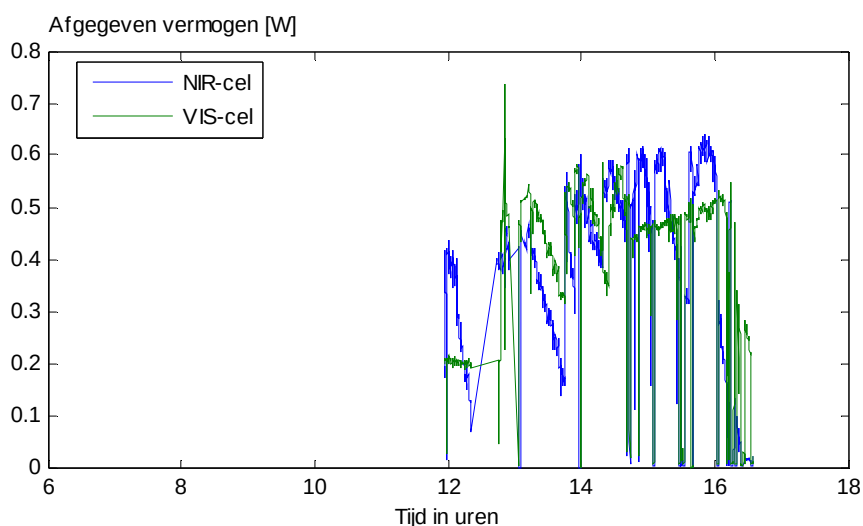
Figuur 3-40 Transmissie- en reflectie curve van de LE35 AMARL zonwerende folie..

3.3.2 Metingen

De metingen zijn uitgevoerd op een vrijwel heldere dag in mei in een raam aan de zuidkant van het PRI hoofgebouw. Gedurende de dag is het opgewekte vermogen continu geregistreerd waarbij de regelunit het venster in-focus hield. De bijbehorende directe straling is geregistreerd door het meteorostation van de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van Wageningen Universiteit en Research Centrum dat zich op enkele kilometers van het PRI hoofgebouw bevindt (Fig. 3-40).

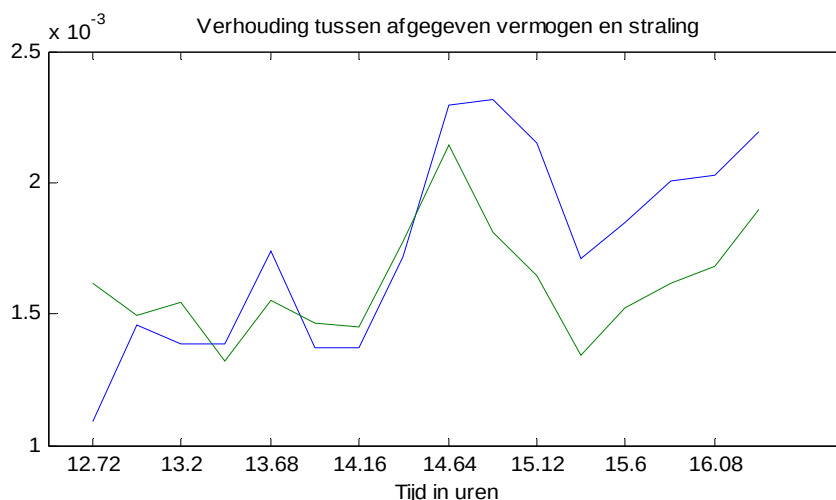


Figuur 3-41 Gemeten directe straling op locatie.



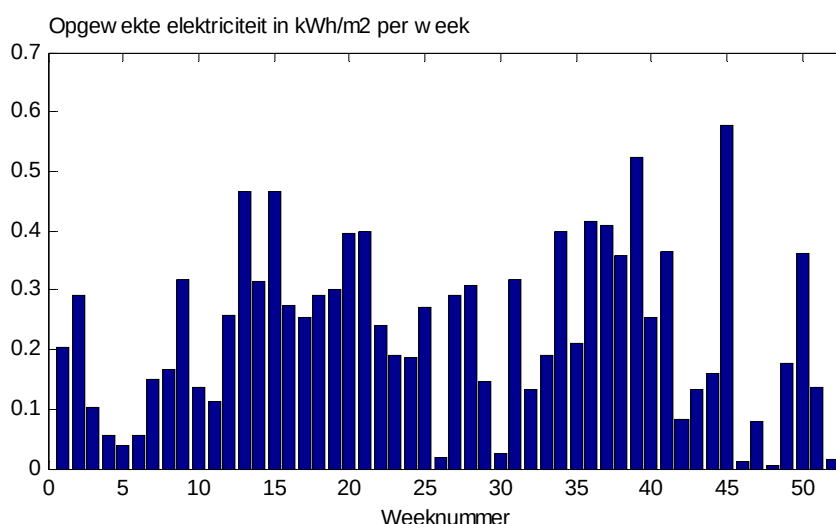
Figuur 3-42 Het gemeten afgegeven vermogen van de 2 typen zonnecellen.

Voor het berekenen van de jaarrond opbrengst zijn de momentane metingen vertaald naar het afgegeven vermogen als factor van de directe straling in het verticale vlak. Dit houdt in dat de gemeten stralingsintensiteiten, die gelden per horizontale m², omgerekend zijn naar verticale m². Bij zonnestanden lager dan 45° zal de intensiteit in het verticale vlak namelijk hoger liggen dan in het horizontale vlak.



Figuur 3-43 De gemeten verhouding tussen het afgegeven vermogen en de gemeten directe straling in het verticale vlak voor de NIR (blauw) en VIS zonnecellen. De gemiddelde waarde komt uit op 1.8E-3 voor beide typen zonnecellen.

Door de voor het verticale vlak gecorrigeerde directe straling uit het SEL-jaar op uurbasis te vermenigvuldigen met bovenstaande factor kan de jaaropbrengst in kWh per m² venster bepaald worden. Dit komt neer op ± 12 kWh/m² voor beide typen zonnecellen.



Figuur 3-44 De opgewekte elektriciteit in kWh/m² per week. Hoewel 's zomers meer direct licht beschikbaar is, is de opgewekte elektriciteit vrij vlak verdeel over het jaar. Dit komt door de lage zonnestanden in de winter die gunstig uitpakken voor een vertikaal venster.

3.4 Economische haalbaarheid

De economische haalbaarheid kan bepaald worden aan de hand van de opbrengst en de verminderde noodzaak tot koeling (airconditioning). De kosten van het systeem zijn op dit moment nog niet nauwkeurig te bepalen gezien de fase waarin het project zich nu bevindt en kosten van aanbrengen van zonnecellen nog niet precies bekend zijn. Een overzicht van de kosten is in Tabel 3-12 weergegeven.

Tabel 3-12 Extra investeringen en opbrengsten van reflector systemen als innovatief venster systeem.

Item	Bedragen in € m ² j ⁻¹			
Systeem:	PV-systeem	Collector	Innov venster	
Celtype:	pc-Si		GaSb*	pc-Si
Extra investering				
Semi-transparante folie			20	20
Zonnecel/collector	450	250	13.500	50
Aansluitingen	20	20	20	20
Regeling/koeling	10	50	50	50
Montage	20	20	20	20
Totale Investering	500	340	13.610	160
Rente en afschrijving				
Rente (5%)	16,50	8,50	340,25	4
Afschrijving (20j)	25,00	17,00	680,50	8
Totale kosten	41,50	25,50	1020,75	12
Baten				
Energie opbrengst KWh/€	84/5,88	576/17,28	19/1,33	19/0,6
Besparing Airconditioning (rente+afschrijving)			31,25	31,25
Besparing Airconditioning (energie)			6,5	6,5
Totale opbrengst €	5,88	17,28	41,25	38,35
Netto Kosten effect €	-35,60	-8,22	-979,50	30,35

*) Gebaseerd op de huidige prijzen

Voor een eerste schatting van de opbrengst is onderstaand rekenvoorbeeld gebruikt. Een venster oppervlak van 1m² wordt als voorbeeld gekozen. De jaarlijks opvallende hoeveelheid energie is ca. 3.200MJ m²j⁻¹. Dit genereert een elektrische energie hoeveelheid van 200 MJ (7.22 KWh) per jaar (rendement collectief 50 % en zonnecel rendement is 12,5%, totaalrendement 8 %). Bij een KWh prijs van 7 €ct is dit een bedrag van: 3,5 Euro. Voor warmte van de zonnecollector is een KWh prijs van 3 €ct genomen.

Warmte opbrengst

Verder kan de gebruiker een energiebesparing verwachten door vermindering van airco. De verminderde warmtebelasting is ca. 2.000 MJ m²j⁻¹ (556 KWh). De meeste warmte komt in de zomer binnen als er 1/2 deel weggekoeld moet worden met een warmtepomp met een COP van 3 is er voor de koeling 92 KWh nodig. Bij een KWh prijs van 7 € is dit een bedrag van: 6,5 Euro. Wanneer door toepassing van het innovatieve venster systeem de investering van een airconditioning vermeden kan worden is de investering interessant (terugverdientijd ca. 5 jaar). Zonder deze besparing zijn de kosten 5,5 €. Omdat voor zonne-energie tevens subsidies verstrekt worden kan er van een rendabele investering sprake zijn. Naast de energielevering bespaart het systeem op energie door een verminderde noodzaak tot koeling.

4 Conclusies en aanbevelingen

Door ongunstige invalshoeken voor de microstructuur systemen is de opbrengst van deze systemen laag. Verder zal na een bepaalde lengte de opgevangen energie weer uitgekoppeld worden. De repeterende systemen vertonen meestal evens dit nadeel. Bovendien ontstaat veelal geen helder beeld door het ventersysteem. De beste resultaten ontstaan bij reflectorsystemen. De opbrengsten zijn hoog terwijl een redelijk goed beeld ontstaat. Door de zonnecellen ontstaat het beeld zoals ontstaat bij open jaloezieën. Het gebruik van zgn. TPV cellen die NIR straling omzetten is economisch niet rendabel. De kosten van deze cellen zijn erg hoog, terwijl het gebruik van Silicium cellen een vergelijkbaar rendement heeft door de veel hogere celspanning.

Naar aanleiding van deze inleidende inventarisatie kan geconcludeerd worden dat het voorgestelde systeem een toegevoegde waarde biedt t.o.v. de huidige beschikbare systemen omdat overtollige energie omgezet wordt in bruikbare elektrische energie en de noodzaak tot airconditioning en koelen in de zomer afneemt. Het systeem is zonder subsidies net niet economisch rendabel maar resulteert in een bepaalde comfort verhoging. Wanneer door toepassing van deze venstersystemen de investering van een air vermeden kan worden is het systeem economisch interessant. Uit deze eerste fase kan voorts geconcludeerd worden dat het mogelijk is om selectief NIR-straling te absorberen. Selectief NIR-straling afvangen heeft het voordeel dat de licht optimaal kan zijn terwijl de warmtetoetreding beperkt is zodat hogere (ongewenst) binnentemperaturen bij een overschot aan zoninstraling minder zullen optreden.

5 Referenties

Hecht, E. *Optics*, Addison-Wesley, Reading, 2nd ed., **1987**, 281.

Pedrotti, S.J., Pedrotti, L.S. *Introduction to Optics*, Prentice Hall, London, 2nd ed., **1993**, 300.

P.J. Sonneveld, J.C. Bakker, Vooronderzoek innovatieve kas- en teeltconcepten, nota V99-08 IMAG Wageningen **1999**.

D.J. Broer, J. Lub, G.N. Mol, *Nature*, **1995**, 378, 467.

H.J.B. Jagt, *Polymeric polarisation optics for energy efficient LCD illumination*, ISBN 90-386-2613-4, **2001**.

Stichting opleiding en ontwikkelingsfonds voor de vlakglasbranche, Basiskennis Glas, september 2003.

B. Temelkuran, S.D. Hart, G. Benoit, J.D. Joannopoulos and Y. Fink, *Nature*, **2002**, 420, 650-652.

Y. Fink, J.N. Winn, S. Fan, C. Chen, J. Michel, J.D. Joannopoulos and E.L. Thomas, *Science*, **1998**, 282, 1679-1682.

Memento 2001, Saint-Gobain Glass.