

Zoals eerder aangekondigd is het de bedoeling de lezingen gehouden in het Mikrocentrum tijdens de tentoonstelling en symposia 'Energie Technologieën '79' van oktober 1979 in Mikroniek te publiceren.

De openingstoespraak van Dr J. W. H. Geerlings plaatsten wij reeds in het vorige nummer. In dit januarinumnummer hebben wij de verslagen opgenomen van een Duitse en een Nederlandse deskundige op het gebied van alternatieve energie.

ZONNECOLLECTOREN

Prof. Dr. Ir. J. C. Francken

Universiteit Groningen, voorzitter vereniging van Zonne-energie ISES, Nederland

Het directe gebruik van zonne-energie voor de warmwatervoorziening en voor ruimteverwarming is al ver gevorderd in landen als Australië, Israël en de USA. Ook in Europa is al veel werk verricht. Deze toepassingen van zonne-energie zijn reeds ver ontwikkeld en, men zou kunnen zeggen 'rijp voor exploitatie', ook in Nederland.

Dit artikel is een verslag van een lezing gehouden op 9 okt. '79 in het Mikrocentrum te Eindhoven.

Inleiding

Als we spreken over energieverbruik bedoelen we eigenlijk energiegebruik, want wat we doen is energie reduceren tot een onbruikbare vorm, n.l. tot thermische energie van ongeveer omgevingstemperatuur.

De belangrijkste vormen van nuttige, d.w.z. door de samenleving gevraagde en gebruikte energie, zijn schematisch weergegeven in fig. 1.

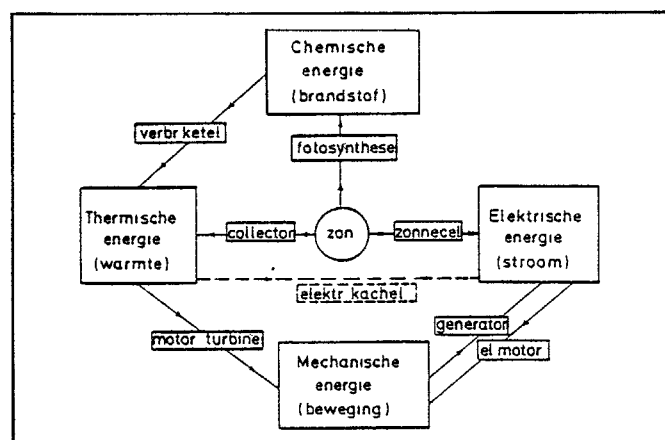


Fig. 1. Energiebronnen en gebruik voor menselijke activiteiten.

Gewoonlijk gebruiken we de energie van de zon niet rechtstreeks, maar door de chemische energie van brandstoffen om te zetten in thermische energie (warmte) en daaruit, desgewenst, in andere vormen (elektrische, mechanische).

Het is natuurlijk ook mogelijk zonnestraling *direct* in thermische energie om te zetten m.b.v. een *collector*. Dit idee is zeer oud en er zijn reeds collectoren van vrij geavanceerde vorm vertoond op de wereldtentoonstelling van Parijs in 1878.

De meest gebruikte energievorm is de warmte zelf en het grootste deel hiervan is laagcalorische warmte, d.w.z. warmte met een temperatuur van minder dan 100 °C voor de verwarming van onze huizen en gebouwen en voor warmwatervoorziening. Warmte op dit niveau kan worden opgewekt met een vlakkeplaat zonnecollector zoals getoond in fig. 2.

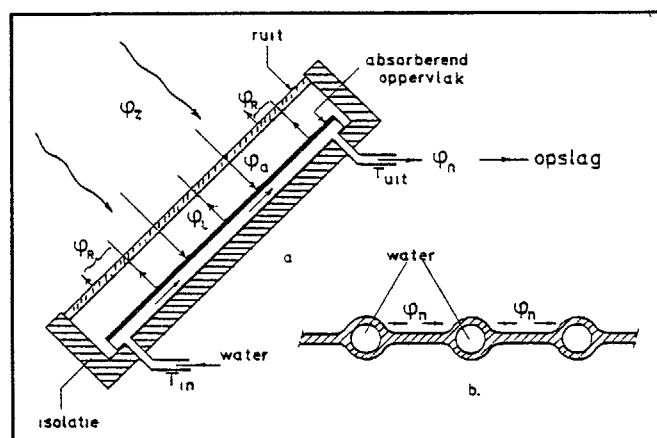


Fig. 2. Principe van de vlakke-plaatcollector.

Dit collector type kan warm water (eventueel warme lucht) tot ca. 100 °C produceren.

(a) ϕ_z = invallende zonnestraling; ϕ_R gereflecteerde straling; $\phi_a = \phi_z - \phi_R$ geabsorbeerde straling; ϕ_L warmteverliezen; $\phi_n = \phi_a - \phi_L$ nuttige warmte.

(b) Dwarsdoorsnede van de absorberende plaat met koelbuizen.

De vlakke-plaat collector bestaat uit een goed tegen warmteverlies geïsoleerde doos, waarin zich een zwarte plaat bevindt. Via een afdekruijt wordt deze door de zon verwarmd. Het geheel vormt een soort broeikas: de ruit laat de zonnestraling grotendeels door, houdt de warmtestraling van de plaat bijna geheel tegen en geeft bescherming tegen wind en regen.

Van de invallende energiestroom ϕ_z gaat een gedeelte ϕ_R verloren door reflectie; de rest ϕ_a wordt geabsorbeerd door het zwarte oppervlak. Van ϕ_a gaat nog een gedeelte verloren als straling, convection en geleiding, waarbij een nuttige warmtestroom ϕ_n overblijft, die via een koelmiddel (water, lucht, b.v.) kan worden afgevoerd.

Het onderzoek aan zonnecollectoren spitst zich voornamelijk toe op het verkleinen van de verliezen, natuurlijk met de randvoorwaarde: tegen een economisch verantwoorde prijs.

Van de onderzoeken, die momenteel in Nederland plaatsvinden, zijn er de belangrijkste in Tabel 1 weergegeven.

Tabel 1: Onderzoek vlakke-plaatcollector in Nederland.

Verliezen door	Te verkleinen door	Onderzoek door
Straling	Selectief absorberende oppervlakken	Techn Phys D - Delft T H Delft - Techn Nat R U Groningen - Techn Nat
Convectie	Honingraatstructuur Vacuumisolatie	T H Delft - Techn Nat. Philips, Eindhoven
Inwendige warmte-weerstand	Toepassing principe warmtepijp	Techn Phys. D - Delft R U Groningen - Techn Nat Philips Eindhoven Techn Phys. D. - Delft

Emissie en absorptie van thermische straling

Alvorens in te gaan op verschillende maatregelen ter vermindering van stralingsverliezen, moeten wij even stilstaan bij de eigenschappen van thermische straling.

De totale energie, uitgestraald door een heet lichaam of oppervlak, hangt af van de temperatuur. Voor een zogenaamd zwart oppervlak wordt de hoeveelheid uitgestraalde energie (per eenheid van oppervlakte) gegeven door de wet van Stefan-Boltzmann:

$$M_z = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

T = Stefan-Boltzmann constante = $5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Voor de energie uitgestraald door een zwart lichaam in een bepaald golflengtegebied (de stralingsdichtheid) geldt de wet van Planck: in de kleine golflengteband λ tot $\lambda + d\lambda$ is de specifieke stralingsdichtheid

$$M_{z\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)} = f(\lambda, T)$$

(in SI eenheden)

Deze wat gecompliceerde formule geeft een energieverdeling, afhankelijk van de temperatuur, zoals in fig. 3 is geschetst. Een veel eenvoudiger, uit de wet van Planck af te leiden formule. De verschuivingswet van Wien, geeft de verschuiving aan van de piek naar langere golflengtes naargelang de temperatuur van het uitstralend lichaam lager is:

$$\lambda_{max} = 0.29/T \text{ cm.}$$

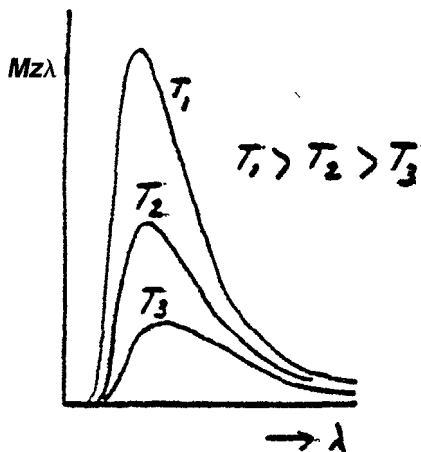


Fig. 3. Spectrale verdeling van stralingsenergie uitgestraald door een zwart lichaam bij temperaturen $T_1 > T_2 > T_3$. Let op de verschuiving van de energie naar langere golflengtes naarmate de temperatuur lager is.

Deze verschuiving van de dominante golflengtes met de temperatuur, is een belangrijk feit in verband met het verminderen van de stralingsverliezen van een collector, zoals we straks zullen zien.

[Fig. 4 toont de verdeling van de straling voor het geval van de zon ($T = \text{ca. } 6000^\circ \text{ K}$) en voor het geval van een zwart oppervlak bij 90° C ($T = 363 \text{ K}$)]

Zoals gezegd, gelden de bovenvermelde formules voor emissie van *zwarte* oppervlakken, d.w.z. oppervlakken die alle straling die erop valt absorberen. Voor minder perfecte zwart oppervlakken is de emissie kleiner. De verdeling van de stralingsenergie voor een willekeurig oppervlak is dan verkleind met een factor ϵ_λ , de emissie coëfficiënt ϵ_λ , die ook een functie van de golflengte is:

$$M_{z\lambda} = \epsilon_\lambda f(\lambda, T)$$

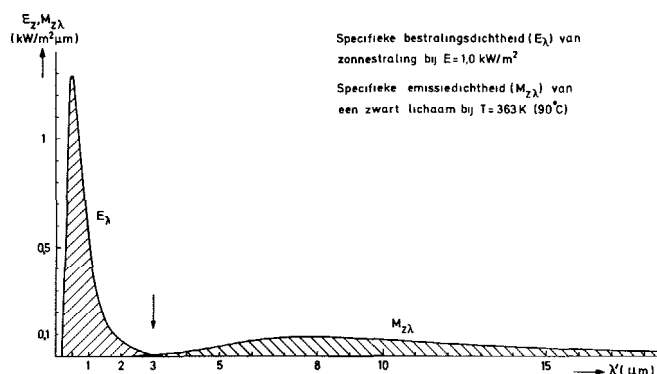


Fig. 4. De spectra van zonnestraling en temperatuurstraling. Spectraal-selectieve oppervlakken dienen voor een golflengte (λ) kleiner dan $3 \mu\text{m}$ (zie pijl) een grote absorptie- (dus een kleine reflectie-)coëfficiënt te hebben en voor infrarode straling groter dan $3 \mu\text{m}$ een kleine emissie- (dus een grote reflectie-)coëfficiënt.

Een zeer belangrijk resultaat van de thermodynamica, bekend als de wet van Kirchhoff, is dat de specifieke emissie coëfficiënt van een lichaam bij een bepaalde golflengte gelijk is aan de specifieke absorptie coëfficiënt bij die golflengte: $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$.

Spectraal selectieve oppervlakken voor het verminderen van de stralingsverliezen van zonnecollectoren maken gebruik van het verschil in het zonnenspectrum en het stralingsspectrum van het lichaam van de collector (fig.4). Hoewel $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$, is het wèl mogelijk een oppervlak te maken, waarvan de gemiddelde absorptie coëfficiënt α groot is bij de meest voorkomende golflengtes van de zonnestraling, terwijl de gemiddelde emissie coëfficiënt ϵ klein is bij de meest voorkomende golflengtes betrokken bij een lichaam met een temperatuur van omstreeks 100° C (zie fig. 4). Een en ander is samengevat in Tabel 2. Het spectraal-selectieve oppervlak combineert dus de eigenschappen van een dof, zwart oppervlak voor zonnestraling met die van een glanzend, wit oppervlak voor infra-rode straling.

Tabel 2

Oppervlak	Zonnestraling (Absorptie Coëfficiënt)		Eigen straling van collector (Emissie Coëfficiënt ϵ_λ)
	Absorptie	Reflectie	Emissie
Zwart, dof	Hoog (> 95%)	Laag (< 5%)	Groot (> 95%)
Wit, glanzend	Laag (< 5%)	Hoog (> 95%)	Klein (< 5%)
Spectraal selectief	Hoog (> 90%)	Laag (< 10%)	Klein (< 15%)

De gemiddelde absorptie coëfficiënt voor zonnestraling kan worden berekend uit

$$\alpha_s = \frac{1}{E_s} \int_0^\infty \alpha_\lambda E_{s\lambda}(\lambda) d\lambda$$

waarin E_s de zonnestralingsdichtheid is, gemiddeld over alle golflengtes, vanuit alle richtingen, en $E_{s\lambda}$ hetzelfde is maar per eenheid van golflengte.

De gemiddelde emissie coëfficiënt van de zonnecollector is gegeven door

$$[\epsilon(T) = \frac{1}{\tau T^4} \int_0^\infty \epsilon_\lambda(\lambda, T) M_{z\lambda}(\lambda, T) d\lambda]$$

waarin σ de Stefan-Boltzmann constante, is T de absolute temperatuur, ϵ_λ de specifieke emissie coëfficiënt bij golflengte λ en $M_{z\lambda}$ de totale stralingsdichtheid uitgestraald door een zwart lichaam bij temperatuur T .

Behalve de eigenschappen van het absorberende lichaam zelf, spelen de eigenschappen van de afdekruij ook een zekere rol. Niet 100% van de inkomende straling komt terecht op de absorptieplaat (fig. 5); een gedeelte gaat verloren door reflectie door de ruit en nog een gedeelte wordt geabsorbeerd in de ruit zelf en gaat grotendeels verloren via geleiding en uitstraling.

Wij zullen nu nader ingaan op de methoden waarmee spectraal selectieve lagen op de absorptieplaat kunnen worden verkregen.

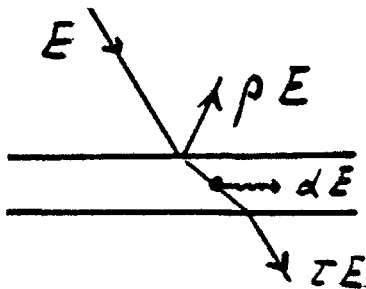


Fig. 5. Reflectie, absorptie en eventueel transmissie van straling in materie. Als E de totale inkomende stralingsenergie voorstelt (Watts/m²) dan wordt er pE gereflecteerd, αE geabsorbeerd en τE gaat door de ruit heen.

Altijd is $\rho + \alpha + \tau = 1$. Vaak is $\tau = 0$.

In het geval van zonnestraling is voor glas $\tau > 90\%$, terwijl ρ en α enkele procenten zijn. Voor de straling afkomstig van lichamen rondom de 300 K echter (golflengtes rond 10 microns), is α bijna 100%.

Spectraal selectieve oppervlakken

Er zijn verschillende methodes om een oppervlak een hoge absorptie in één spectraal gebied te geven en een lage emissie bij een ander gebied:

- Interferentielagen: uitdoving van de straling met bepaalde golflengtes. Deze methode wordt niet verder behandeld; zulke lagen zijn kwetsbaar en diffusie kan aanleiding geven tot verouderingseffecten.
- Dunne lagen met frequentie-afhankelijke eigenschappen. Er zijn in principe twee typen; deze worden toegelicht in figuur 6 en figuur 8.

In fig. 6 a is de dunne laag een halfgeleidend metaaloxijde, dat doorzichtig is voor infrarode straling, doch zichtbaar licht absorbeert. De 'grensgolflengte', λ_c , moet bij 2 à 3 μm liggen. Aangezien de metalen drager alle straling reflecteert, is voor infrarode straling de effectieve emissie coëfficiënt ($\epsilon^1 = 1 - \rho$) van de combinatie zeer klein. In het geval van fig. 6b is de drager absorberend (zwart). De dunne laag is doorzichtig voor zichtbaar licht en reflecterend voor infrarode straling. Het geheel heeft dezelfde absorptie- en emissiekarakteristieken als de vorige combinatie.

Lagen van het type in fig. 6a zijn b.v. zwart nikkeloxyde (van Maxorb Inco), op nikkel en chroomoxyde (b.v. Harshaw procédé) op roestvrijstaal of op nikkel.

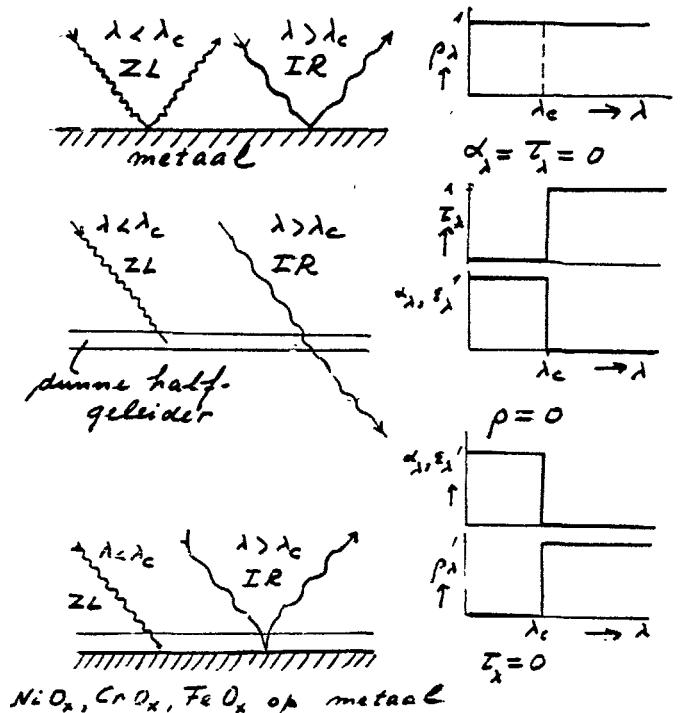
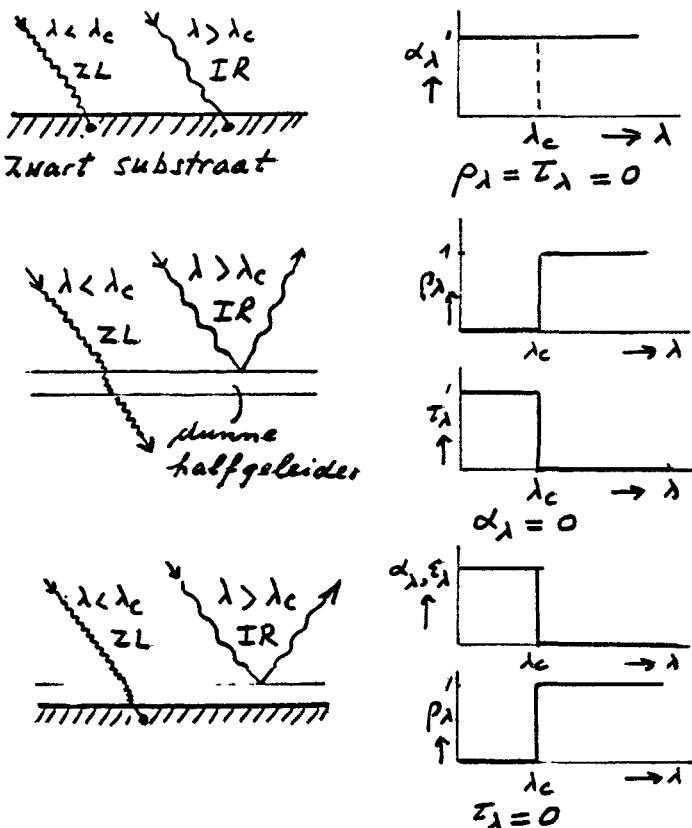


Fig. 6. Principes van spectraal-selectieve oppervlakken. (a) Selectief absorberende dunne laag op infra-rood reflecterende substraat. Voorbeelden: Nikkel-, chroom- en ijzeroxiden op metaal.



(b) Dunne laag met spectraal-selectieve transmissie op absorberend substraat. Voorbeeld: Tinoxijde op zwart glas (email).

Fig. 7 toont de spectrale infra-rood reflectie van ijzeroxide op staal, met en zonder een siliconenharslaag (onderzoek van T.H. Delft).

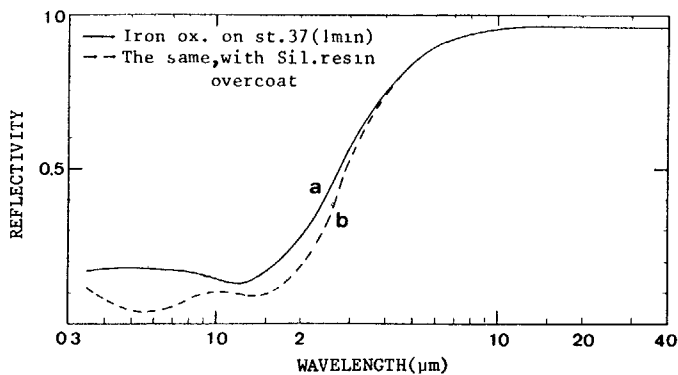


Fig. 7. Gemeten reflectiecoëfficiënt (ρ) als functie van de golflengte (λ):
 (a) voor zwart ijzeroxide (Fe_3O_4) op gepolijst staal;
 (b) idem, bedekt met een dun anti-reflex laagje siliconenhars. (M. v.d. Leij, T.H. Delft.)

Fig. 8 toont gegevens over een spectraal-selectieve laag van het type van fig. 6b, nl. een selectief doorlatende laag op een goed absorberend substraat, in dit geval tinoxide op zwart email.
 Fig. 8(a) toont berekende krommen van de spectrale reflectie van de dunne laag alleen, terwijl (b) toont een gemeten kromme van de spectrale absorptie van zo'n laag op zwart emaille laat zien.

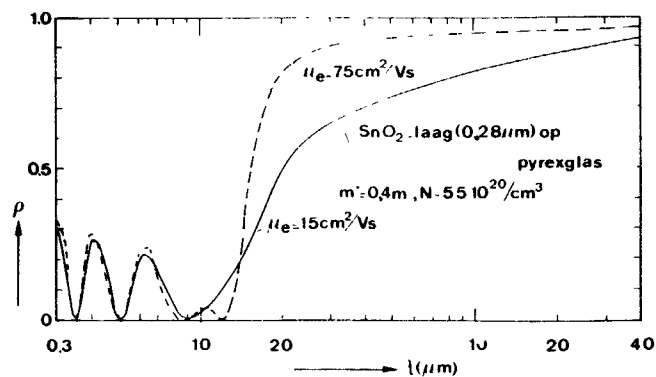
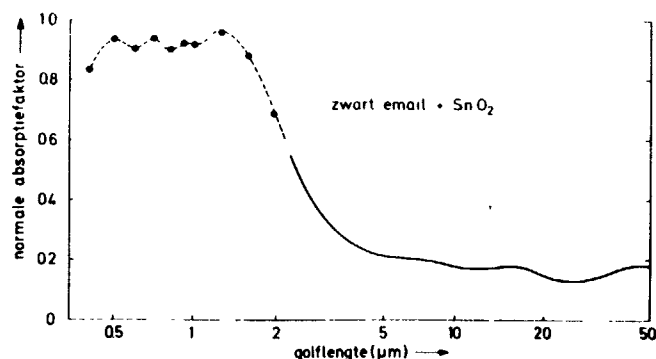


Fig. 8. Spectraal-selectieve laag gevormd door tinoxide op zwart glas (email):
 (a) reflectie (ρ) krommen berekend door M. v.d. Leij, T.H. Delft.



(b) absorptie krommen ($1-\rho$) gemeten in Groningen (Vakgroep Technische Fysica).

Fig. 9 toont de soort verbeteringen, die haalbaar zijn met spectraal selectief lagen.

De getallen hebben betrekking op een vrij normaal voorkomende situatie (voor gegevens zie figuur onderschrift). Door gebruik van een spectraal-selectieve laag wordt de verliesstroom verminderd van 426 tot 224 W/m^2 . Men ziet dat eenzelfde resultaat wordt bereikt door de convectieverliezen te verminderen met behulp van een tweede afdekruijt. Uit de figuur blijkt dat het zinvol is na de stralingsverliezen ook de convectieverliezen te onderdrukken.

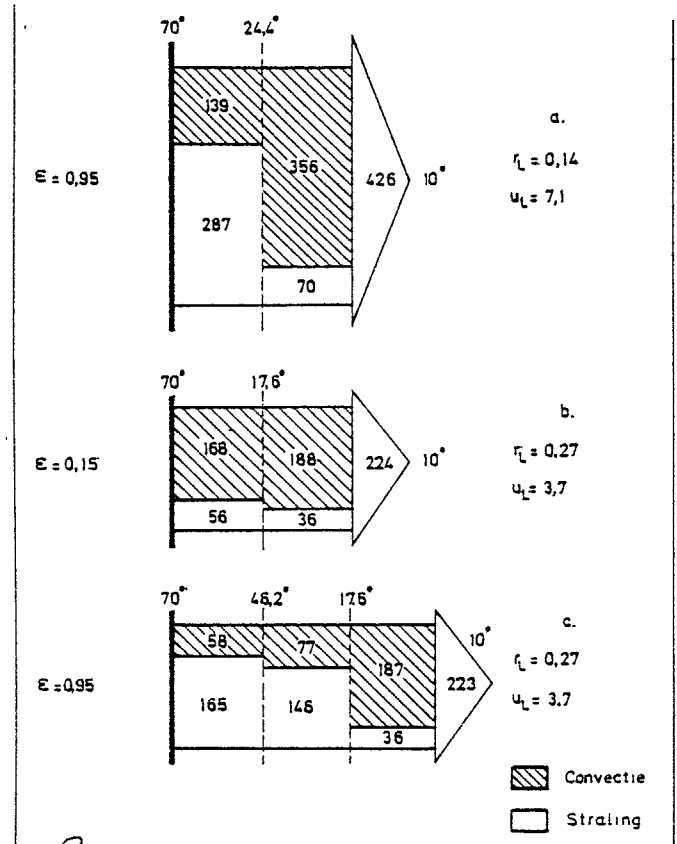


Fig. 9. Schematische voorstelling van de warmteverliezen in W per m^2 door straling en convectie van vlakke-plaatcollectoren, bestaande uit:

- (a) een zwarte plaat en één glasruit.
- (b) een spectraal-selectieve plaat en één glasruit.
- (c) een zwarte plaat en twee glasruiten.

Aangenomen zijn een plaattemperatuur van $70^\circ C$, een omgevingstemperatuur van $10^\circ C$ en een windsnelheid van 5 m per seconde.

r_L = specifieke verliesweerstand (in m^2KW^{-1}); $\mu_L = r_L^{-1}$ = specifieke verliescoëfficiënt (in $W m^{-2} K^{-1}$); ϵ = emissiecoëfficiënt.

Onderdrukken van convectie

Er zijn verschillende manieren om convectieverliezen te verminderen:

- a) Honingraat of een dergelijke structuur; zie fig. 10.
- b) Planaire lage druk collector (ontwikkeld door de Technische Dienst van T.N.O.), waarin de convectie te verwaarlozen is; slechts enige geleiding.
- c) Vacuum-geïsoleerde collectoren (cylindrisch), waarvan enkele typen worden getoond in fig. 11 en 12.

De eerste twee (fig 11a en 11b) zijn in de Verenigde Staten ontwikkeld door resp. Corning en Owens-Illinois. De derde (fig. 11c) is de eerste collector van Philips, ontwikkeld in Aken. Een latere ontwikkeling uit dit laboratorium is geschetst in fig. 12. (Nadere bijzonderheden van deze collectoren zijn in de onderschriften bij die figuren verwerkt.)

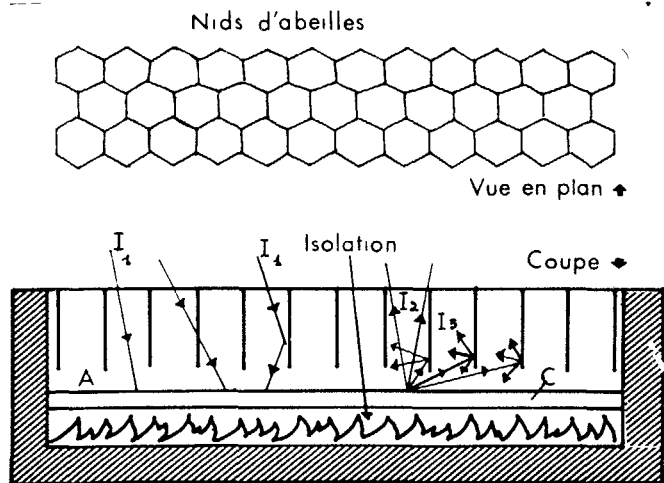


Fig. 10. Honingraat structuur ter vermindering van de convectieverliezen in een vlakke-plaatcollector (ontwerp Giovanni Franca). Andere soortgelijke structuren geven ongeveer hetzelfde resultaat.

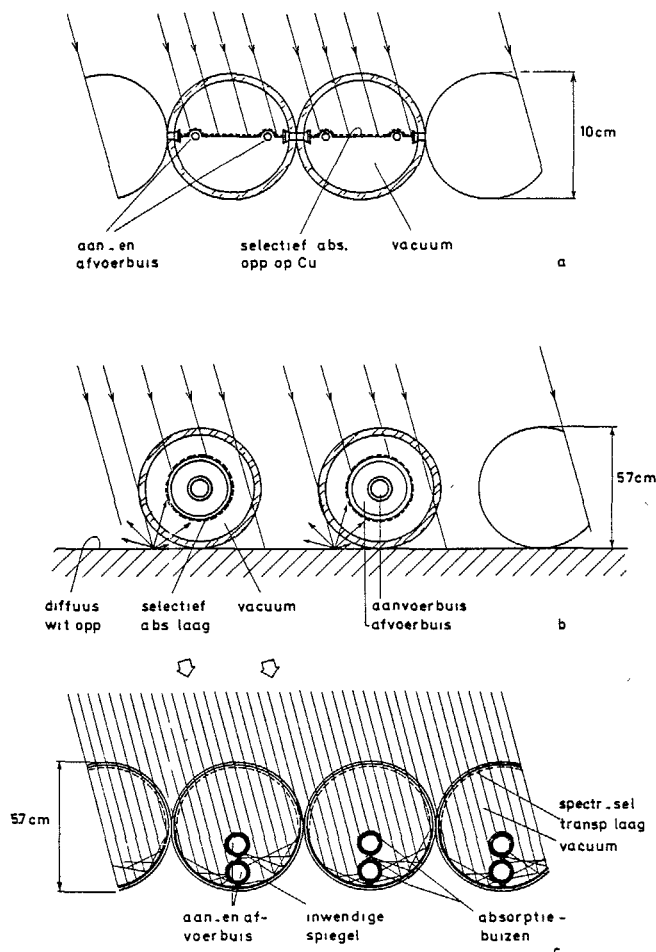


fig. 11. Cylindrisch vacuum-geïsoleerde zonnecollectoren.
(a) Corning.
(b) Owens - Illinois.
(c) Philips Aachen (Mark 1).

De Corning collector is voorzien van een koperen absorptieplaat met een, aan de zonzijde, spectraalselectief absorberend oppervlak. De breedte van deze plaat is vrijwel gelijk aan de middellijn van de glazen omhulling, zodat er weinig straling verloren gaat.

De collector van Owens-Illinois is geheel van glas. De buitenzijde van de afvoerbuis is voorzien van een spectraalselectief absorberende laag. Een diffuus wit oppervlak reflecteert een gedeelte van de tussen de buizen invallende straling naar de absorberende oppervlakken.

De afvoerbuizen van de Philips collector zijn aan de buitenzijde zwart. De glazen omhulling is inwendig aan de zonzijde voorzien van een selectief doorlatend filter en aan de andere zijde van een spiegel.

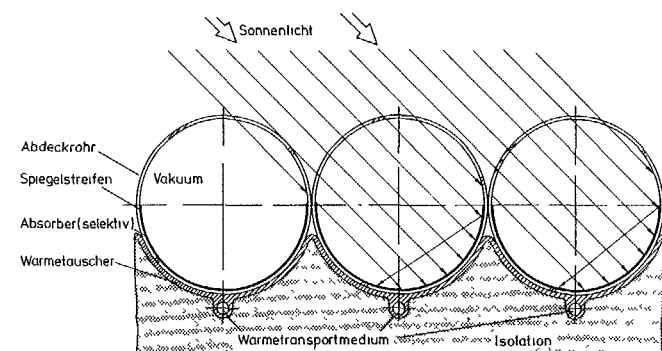


Fig. 12. Eenvoudiger ontwikkeling van de vacuum geïsoleerde zonnecollector. Gebruikt samen met een vlakke ruit heeft dit type een rendement $\eta_0 = 77\%$ en $u_l = 2.3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Een selectieve laag van zwart cobalt sulfide is gebruikt ($\alpha > 0.95$, $\epsilon < 0.07$).

Een verdere ontwikkeling van dergelijke cilindrische typen is het gebruik van de warmtepijp om de warmte, ontwikkeld in de collector, te transporteren naar het circulerende warmteoverdrachtsfluidum. De eerste publicatie omtrent deze ontwikkeling is van Corning, zie fig. 13. Een wat andere uitvoeringsvorm wordt ontwikkeld door Philips in Eindhoven, zie fig. 14.

SCHEMATIC OF THE TUBULAR CUSP COLLECTOR UTILIZING A HEAT PIPE AND ILLUSTRATION OF THE "PLUG IN" CONCEPT

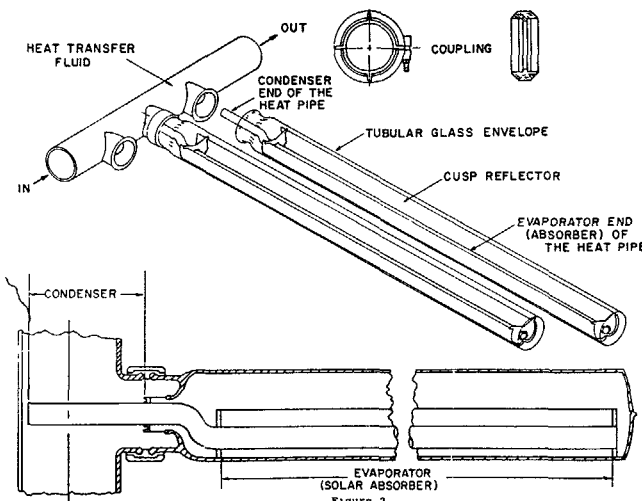
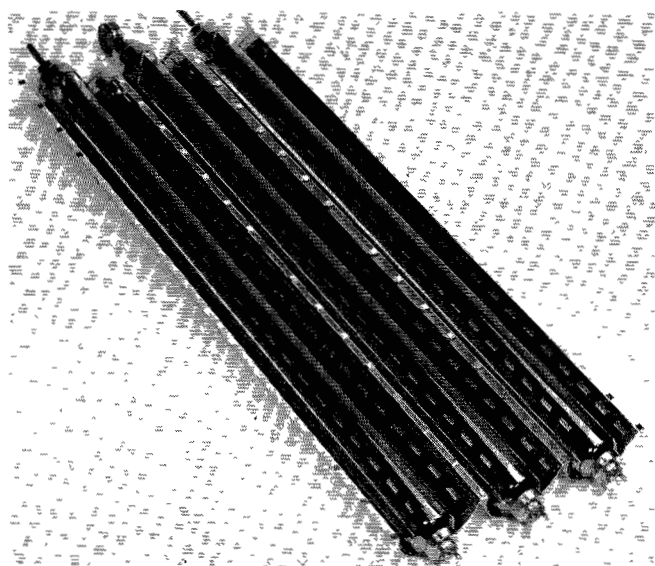


Fig 13. Corning cilindrische collector met warmte transport d.m.v. warmtepijp en met een 'trog' spiegel.



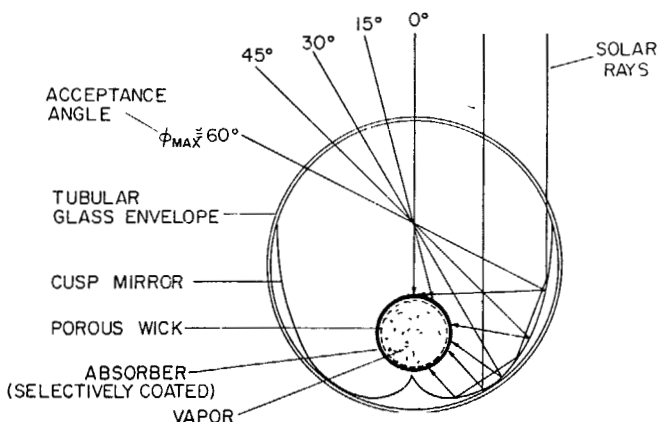
Figuur 14 Vacuüm geïsoleerde warmtepijp collectoren ontwikkeld door Philips Eindhoven, gemonteerd met reflecterende spiegels in een paneel.

In een warmtepijp vindt het warmtetransport plaats doordat het fluïdium in het verdampergedeelte warmte opneemt en verdampt, vervolgens naar het condensordeel stroomt en daar, onder afgifte van warmte, condenseert. Het condensaat stroomt daarna, in dit geval onder invloed van een zwaartekracht, terug naar de verdamper.

Gebruik van concentrerende spiegels

Om het werkzame oppervlak van cilindrische collectoren te vergroten, wordt gebruik gemaakt van reflecterende oppervlakken (fig. 11b) of (inwendige) spiegels (fig. 11c, 12 en 14). In de warmtepijpcollector van Corning (fig. 13) is gebruik gemaakt van een 'ideale' concentrerende spiegel, d.i. een spiegel die alle stralen, die binnen de openingshoek (apertuur) invallen, na een of meer reflecties op de ontvanger concentreert. Dergelijke spiegels kunnen zowel rotatie-symmetrisch als cylinder-symmetrisch zijn en hebben, in het laatste geval, de vorm van een 'trog'. In fig. 15 is een doorsnede gegeven van de Corningbuis met warmtepijp en 'trog'spiegel.

CROSS SECTION OF THE TUBULAR CUSP COLLECTOR WITH HEAT PIPE AS ABSORBER



Figuur 15 Doorsnede van Corning collector met 'trog'spiegel. Deze spiegel heeft een openingshoek van $2 \times 60^\circ$ en (theoretische) concentratie $C = 1,15$.

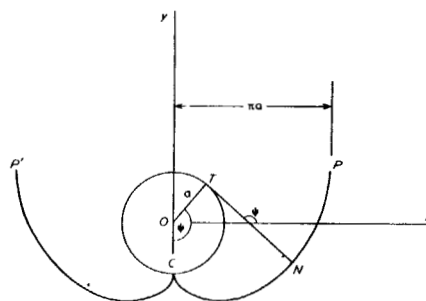
Verdere beschouwingen over hoogrendement collectoren

In fig. 15 is een doorsnede gegeven van de Corningbuis met warmtepijp en 'cusp' spiegel. Wij zullen even stilstaan bij de geometrie achter dit ontwerp.

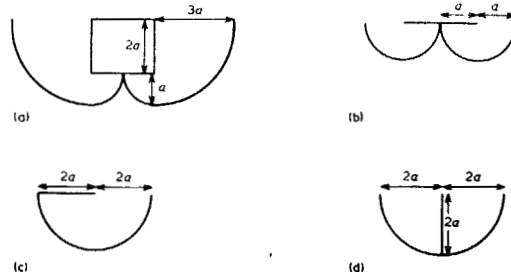
Enige kenmerken van de 'trog' spiegel (fig. 16) zijn:

- De doorsnede van de spiegel is gegeneerd door een draad, die cirkelvormig (rond de collector warmtepijp) gewikkeld is, af te wikkelen; het eind van de draad beschrijft dan de doorsnede van het spiegeloppervlak. (ontwondene)
 - De raaklijnen van het collectoroppervlak staan loodrecht op de spiegel. Alle stralen, die de spiegel treffen moeten dan op de collector vallen.
 - Oppervlak collector = apertuur; dus concentratie $C = 1$.
- De resultaten, die met dit systeem bereikt kunnen worden zijn te zien in fig. 17.

$C = 1$



$x = a(\sin \psi - \psi \cos \psi)$
 $y = -a(\cos \psi + \psi \sin \psi)$
 $-\pi < \psi < \pi$



Figuur 16 Geometriën van cilindrische trogspiegels met concentratie $C = 1$.

De doorsnede van het spiegeloppervlak is de ontwondene van de omtrek van de 'ontvanger' van de straling. In de bovenste figuren is schematisch voorgesteld hoe dit oppervlak verkregen wordt door een langs die omtrek gewonden draad af te wikkelen. Het uiteinde P hiervan beschrijft de ontwondene.

Uit de tweede figuur van boven blijkt, dat elke raaklijn aan het ontvangende oppervlak loodrecht op de spiegel staat, zodat elke lichtstraal die, in het vlak van de doorsnede, de spiegel van de bovenzijde treft, ook de ontvanger treft.

De onderste figuren (a/tm d) tonen de ontwondenen van, resp. een vierkant en van een vlakke plaat. In alle gevallen is de doorsnede van het apertuurvlak gelijk aan de werkzame doorsnede van de ontvangende en dus de concentratie $C = 1$.

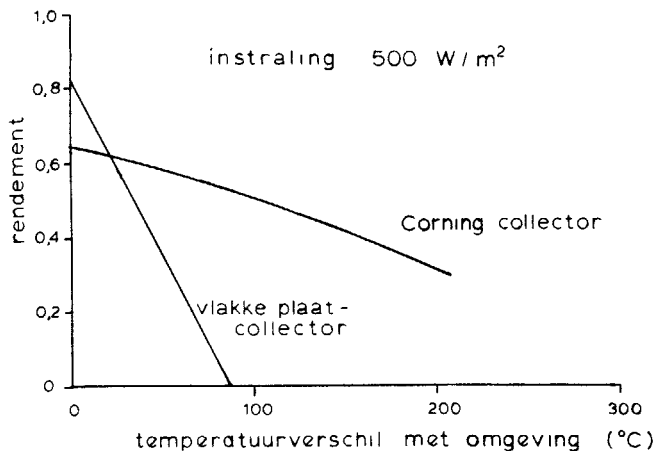


Fig. 17. *Vergelijking rendement van Corning warmtepijp 'cusp' collector met een conventionele vlakke-plaatcollector. $\eta \approx 0,64$ is een vrij lage waarde*

Hogere concentraties zijn te bereiken met een ander 'ideaal' spiegelsysteem b.v. de zogenoemde 'compound parabolic collector' (CPC), zie fig. 18. De doorsneden van de spiegels zijn parabolen. Elke spiegel eindigt in de brandlijn van de andere.

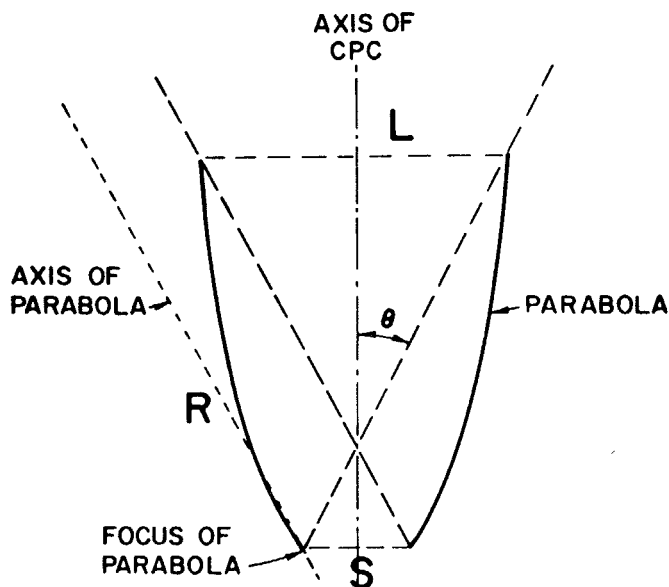
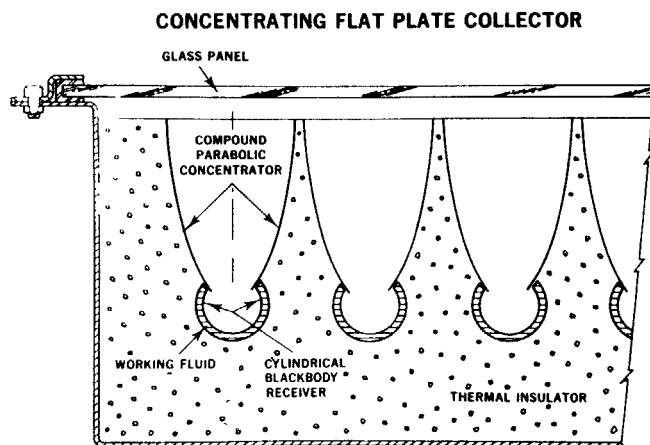


Fig. 18. *Doorsnede van een 'compound parabolic collector' (CPC).*

De uiterste stralen, die geaccepteerd worden zijn parallel aan de beide parabolassen. Hoe groter de concentratie in zo'n collector, des te kleiner de acceptatie-hoek. Voor cilindrische (dus twee-dimensionale) ideale spiegels kan voor het verband tussen de concentratie (C) en de halve apertuurhoek (θ) (figuur 18) het verband worden afgeleid:

$$C_{id, 2 dim} = \frac{1}{\sin \theta} = \frac{A_L}{A_s}$$

(A_L = oppervlakte van apertuur L, A_s = oppervlakte van apertuur S)



Figuur 19 'Planaire' type concentrerende collector. Deze is voorzien van een groot aantal 'Ideale' concentrerende spiegels van het CPC (compound parabolic concentrator)-type. Voor een vaste stand mag de concentratie C niet groter zijn dan circa 1,5.

Nadelen van concentrerende collectoren zijn, dat deze weinig verstrooide zonnestraling opnemen en dat de collector gewoonlijk continue of periodiek bijgesteld (gericht) moet worden. Een eenvoudig concentrerende collector met een geringe concentratie, die niet hoeft te worden bijgesteld, is de z.g. planaire collector, waarvan een uitvoering getoond wordt in fig. 19.