



Bouw
Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 15 276 30 00
F +31 15 276 30 10
info-BenO@tno.nl

TNO-rapport

034-DTM-2009-04659

U-waarde kas met scherm
Meetprotocol voor schermdoeken

Datum 26 november 2009
Auteur(s) Leonard Baart de la Faille (TNO)
Jouke Campen (WUR)
Henk Oversloot (TNO)



Opdrachtgever Produktschap Tuinbouw
Dennis Medema
Postbus 280
2700 AG Zoetermeer



Ministerie van LNV
Leo Oprel
Postbus 482
6710 BL Ede



Projectnummer 034.88625/01.01
Aantal pagina's 53 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

Dit rapport beschrijft het onderzoek van TNO in samenwerking met Wageningen UR Glastuinbouw (WUR) naar de thermische eigenschappen van schermdoek voor tuinbouwkassen. Deze eigenschappen bepalen het energiebesparend vermogen van de schermdoeken.

Tuinders kunnen bij de Stichting MilieuKeur(SMK) een groenlabelkas certificaat aanvragen voor hun kas. Om het certificaat te kunnen halen, moeten voldoende groenlabelpunten verzameld worden. Een belangrijk onderdeel hierin zijn de schermdoeken. De punten worden berekend met de zogenaamde IDT methode, onderdeel U-waarde. De U-waarde is een maat voor het energieverbruik van de kas. De U-waarde van de kas met en zonder scherm ten opzichte van een referentiekas leveren een aantal groenlabelpunten op. De eigenschappen van de schermdoeken gelden als invoer voor de IDT methode en hebben daarom indirect financiële gevolgen voor de tuinder. In totaal moeten er 100 punten behaald worden voor een groenlabelkas. Met het onderdeel U-waarde zijn voor een lichte stookteelt ongeveer 25 punten te behalen.

Dit rapport bevat een aantal verbeterpunten voor de IDT methode. In de huidige IDT methode hebben de luchtdoorlatendheid en de warmteweerstand van schermdoek geen invloed op de U-waarde van de kas. De luchtdoorlatendheid van open en dichte schermdoeken verschilt aanzienlijk en dit heeft aanzienlijke invloed op de energiebesparing. Uit analyse van de IDT methode en eerder onderzoek blijkt dat de invloed van deze parameters relatief eenvoudig in de IDT methode zijn op te nemen. In de IDT methode hebben de emissiecoëfficiënt en transmissiecoëfficiënt de grootste invloed op het aantal te behalen groenlabelpunten.

In het verleden zijn de infrarood eigenschappen van schermdoek op verschillende manieren bepaald, wat onderlinge vergelijking onmogelijk maakt. In het project is door het meten van 8 verschillende schermdoeken volgens de bestaande methoden gebleken dat verschillende manieren van meten voor dezelfde doeken inderdaad een andere uitkomst kan geven. Er zijn verschillende proeven gedaan om deze metingen te controleren. Geen van de eerder gehanteerde methoden was voldoende geschikt om de eigenschappen van schermdoek te bepalen.

In het kader van het onderliggende onderzoek is een nieuwe opstelling gebouwd waarmee de infrarood eigenschappen van schermdoek bepaald kunnen worden. Deze opstelling biedt voldoende houvast om te komen tot een relatief goedkoop en eenvoudig meetapparaat. Dit rapport geeft tevens een meetprotocol voor de bepaling van de eigenschappen van schermdoek. De uitkomsten hiervan kunnen gebruikt worden in de IDT methode, onderdeel U-waarde.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Inleiding.....	4
2	Warmteoverdracht in tuinbouwkassen.....	6
2.1	Kasmodel met scherm.....	6
2.2	Convectie.....	7
2.3	Geleiding.....	8
2.4	Luchtdoorlatendheid.....	9
2.5	Straling.....	13
2.6	Verdamping en condensatie.....	14
3	Uitgangspunten.....	15
3.1	Normen.....	15
3.2	Gevoeligheidsanalyse IDT methode.....	16
4	Huidige meetmethoden voor schermdoek.....	20
4.1	Inleiding.....	20
4.2	Meting met de spectrofotometer (WUR).....	21
4.3	Calorische Emissiemeter (TNO).....	22
5	Metingen aan 8 schermdoeken.....	24
5.1	Inleiding.....	24
5.2	Bestaande methoden.....	25
5.3	Twee platen apparaat.....	26
5.4	Infrarood camera.....	28
5.5	Aluminium doeken.....	32
5.6	Analyse.....	34
6	Nieuwe opstelling.....	35
6.1	Meetprincipe.....	35
6.2	Uitvoering.....	37
6.3	Meetresultaten.....	40
7	Conclusies en aanbevelingen.....	43
8	Referenties.....	44
	Bijlage(n)	
	A Concept Meetprotocol	
	B Meetopstelling	
	C IDT methode onderdeel U-waarde	

1 Inleiding

Tuinbouwkassen gebruiken grote hoeveelheden energie. Gezamenlijk zijn de tuinders verantwoordelijk voor 10% van het jaarlijkse aardgasverbruik. Een belangrijk hulpmiddel bij het terugdringen van dit energiegebruik zijn schermen. De schermen isoleren de kas en zorgen er zo voor dat er minder verwarmd en gekoeld hoeft te worden. Daarnaast worden schermen gebruikt om het gewas te beschermen tegen te veel zonlicht, maar ook om lichthinder boven tuinbouwkassen te voorkomen. Dit project beschouwt de eigenschappen van schermdoek.

Om tuinders te stimuleren om energiezuiniger kassen te bouwen zijn door de overheid verschillende stimuleringsmaatregelen genomen. Om gebruik te kunnen maken van bepaalde regelingen dient een kas te beschikken over een groenlabelkas certificaat. Dit certificatieschema wordt beheerd door de Stichting Milieukeur. Het certificeren geschiedt door verschillende instellingen onder licentie. Op dit moment wordt de groenlabelkas systematiek geëvalueerd door WUR. Om in aanmerking te komen voor een groenlabelkas certificaat moet een kas voldoen aan een aantal harde voorwaarden. Daarnaast moeten zogenaamde groenlabelpunten verzameld worden. Een onderdeel waarmee punten behaald kunnen worden is het onderdeel U-waarde van de kas. De U-waarde is een maat voor de isolatiegraad van de kas. De U-waarde wordt berekend met een rekenmodule die door TNO is ontwikkeld en die bekend is onder de naam IDT methode onderdeel U-waarde, in het vervolg van dit rapport aangeduid als IDT methode.

In de IDT methode worden de eigenschappen van de schermen als invoer gebruikt. De eigenschappen zijn in het verleden door twee instanties bepaald: door TNO en door WUR glastuinbouw. Beide instanties hebben hun eigen manier van meten, waardoor onderlinge vergelijking niet direct mogelijk was. Het vermoeden bestond dat de verschillende meetmethoden voor hetzelfde doek verschillende resultaten oplevert. In dit project zijn een aantal doeken van twee leveranciers volgens de gebruikelijke methoden gemeten door zowel TNO als WUR glastuinbouw. Hierbij is bevestigd dat de methoden verschillende resultaten opleveren. De eigenschappen van schermen die niet standaard in de module U-waarde zijn opgenomen worden door de gebruikers zelf ingevoerd. De gegevens worden verstrekt door de leveranciers. Dit geeft kans op fouten.

Tuinders die een nieuwe kas willen laten bouwen en daarbij een groenlabelkas certificaat willen aanvragen, houden bij de keuze van een nieuw scherm rekening met het aantal groenlabelkas punten dat hiermee te behalen is. Een doek dat volgens de IDT methode goed scoort, heeft dus een concurrentievoordeel. Om de doelstelling van de overheid van energiezuinige kassen te realiseren is het van belang dat de resultaten van de IDT methode overeenkomen met de werkelijke energieprestatie. In ieder geval moet het zo zijn dat een doek dat meer energie bespaart, ook meer punten oplevert. Om dit te waarborgen moeten afspraken gemaakt worden over de manier waarop de eigenschappen van schermdoek bepaald worden. In dit project werken TNO en WUR daarom samen om te komen tot een meetprotocol. SMK kan dit meetprotocol voorschrijven bij het gebruik van de IDT methode en op deze manier zorgen voor een objectieve en betrouwbare U-waarde berekening

Overigens worden niet alle aspecten van het energiegebruik in de kas meegenomen. Op dit moment zijn er veel ontwikkelingen gaande om het energiegebruik verder terug te dringen. Door kassen meer te sluiten wordt het mogelijk om meer energie terug te winnen die voorheen verloren ging. Het levert echter ook een aantal nieuwe problemen op die op hun beurt opgelost dienen te worden. Het vochtgehalte kan in de kas bijvoorbeeld hoog oplopen als gevolg van belichting onder een gesloten scherm. Dit vocht kan niet langer door de luchtramen afgevoerd worden, maar een te hoge relatieve luchtvochtigheid kan leiden tot schade aan het gewas en bovendien zorgt condens op het doek tot slechtere energieprestaties. Ontvochtiging en verticale ventilatie zijn hiervoor instrumenten. De IDT methode zal de ontwikkelingen op dat gebied moeten volgen.

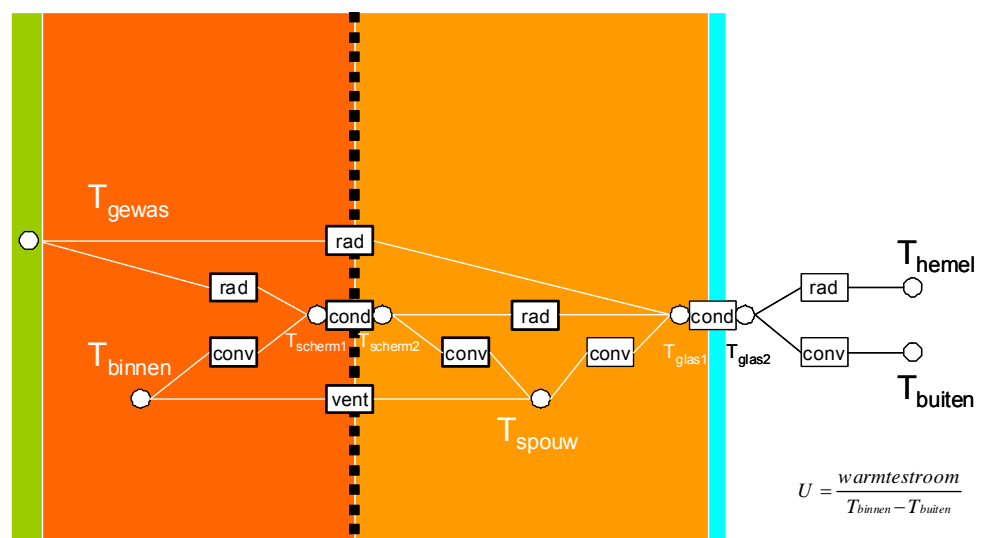
2 Warmteoverdracht in tuinbouwkassen

2.1 Kasmodel met scherm

De overheid stimuleert tuinders om gebruik te maken van energiezuinige kassen. Tuinders kunnen een groenlabelkas certificaat aanvragen en daarmee in aanmerking komen voor subsidie. De stichting Mileukeur (SMK) beheert het groenlabelkas programma. Bij de aanvraag van een certificaat moet een berekening overlegd worden van het energieverbruik met en zonder scherm, uitgedrukt in de U-waarde. De U-waarde geeft het aantal Watt per m² energie die door de kasomhulling stroomt per graad Kelvin temperatuurverschil. Deze berekening wordt gemaakt volgens de IDT methode, onderdeel U-waardereferentie [1],[2]. De U-waarde van de kas, met en zonder scherm, levert een aantal groenlabelkas punten op. Een tuinder moet tenminste 100 punten verzamelen om in aanmerking te komen voor een certificaat

De IDT methode maakt gebruik van een model van de warmtehuishouding in de kas om de U-waarde van de kas met scherm en zonder scherm te berekenen. De verhouding van deze U-waarden ten opzichte van de U-waarde van een referentiekas bepaalt het aantal te behalen groenlabelkas punten.

Omdat de GLK systematiek leidend is in dit rapport wordt vooral de situatie beschouwd waarin de temperatuur in de kas hoger is dan de omgevingstemperatuur. Energie wordt bespaard door de warmtestroom tussen binnen en buiten, uitgedrukt in de U-waarde, te verkleinen. Het scherm zorgt voor een extra barrière tussen kas en glas. Warmteoverdracht van en naar een tuinbouwkas met scherm zoals opgenomen in de IDT methode geschiedt langs een aantal verschillende wegen. Ter Illustratie zijn deze weergegeven in figuur 1.

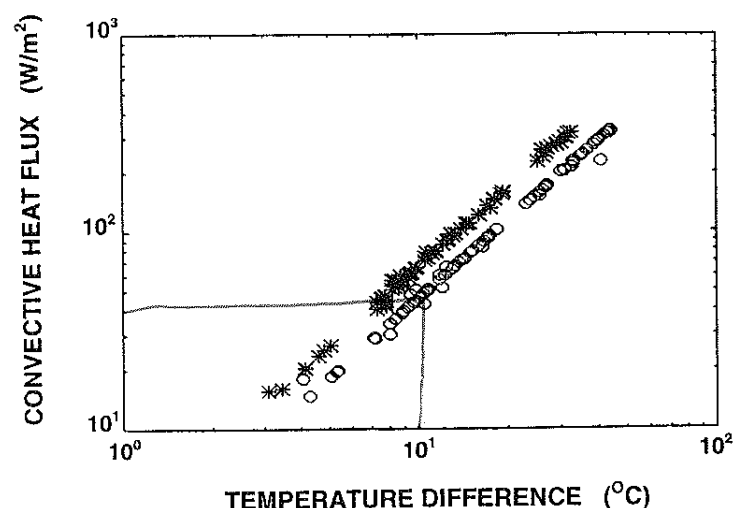


Figuur 1 Warmteoverdracht in een tuinbouwkas

De temperatuur in de kas, de omgevingstemperatuur en de stralingstemperatuur van de hemel worden in de IDT methode als vast verondersteld. De overige temperaturen, dus de temperaturen van het scherm en van de spouw tussen scherm en glas worden bepaald door de optredende warmtebalansen. De in de figuur beschreven overdrachtsfuncties zijn afhankelijk van de temperaturen. Er ontstaan zo 5 vergelijking met 5 onbekenden die dus opgelost kunnen worden. In bijlage bijlage C is het gedeelte uit de IDT methode van het kasdek met scherm opgenomen. In de IDT methode is de warmteweerstand van het schermdoek verwaarloosd. In 2008 is een aangepaste versie geschreven waarin deze weerstand niet verwaarloosd wordt. In dit model is geen warmteoverdracht door verdamping en condensatie opgenomen.

2.2 Convectie

Op een aantal plaatsen wordt warmte overgedragen door convectie: tussen kaslucht en scherm, tussen scherm en spouw, tussen spouw en glas en tussen glas en buitenlucht. Deze convectie is afhankelijk van het temperatuurverschil en van het type optredende convectie: gedwongen convectie in het geval van een geforceerde luchtstroom langs het oppervlak en vrije convectie in het andere geval. Vrije convectie is op te delen in convectie met laminiare stroom en met turbulente stroom. Door WUR is onderzoek gedaan naar de mate van convectieve warmteoverdracht aan schermen [3].



Figuur 2 Convectieve warmteoverdracht tussen scherm en omgeving ten opzichte van het temperatuurverschil voor de bovenzijde(*) en onderzijde (o). bron: [3]

In figuur 2 is de convectie per m2 scherm weergegeven ten opzichte van het temperatuurverschil. Hieruit is te concluderen dat de warmteoverdracht aan het scherm turbulent is. De convectieve warmteoverdracht is dan te schrijven als [4]

$$Q_{\text{convectie.vrij}} = h_{\text{cv}} \cdot \Delta T^{\frac{4}{3}}$$

Waarin

h_{cv} convectiefactor voor vrije convectie

h_{cv} is voor de bovenzijde van het scherm $3.09 \text{ W/m}^2\text{C}^{4/3}$ is en voor de onderzijde $2.09 \text{ W/m}^2\text{C}^{4/3}$ in dit specifieke geval. In de IDT methode wordt $3 \text{ W/m}^2\text{C}^{4/3}$ voor de onderzijde van het scherm gehanteerd.

In de IDT methode wordt uitgegaan van gedwongen convectie tussen scherm en spouw en tussen spouw en glas. Daarbij is de warmteoverdracht [4]:

$$Q_{\text{convectie, gedwongen}} = h_{cg} \cdot \Delta T$$

h_{cg} convectiefactor voor gedwongen convectie

De waarde van h_{cg} is afhankelijk van de lichtsnelheid langs het oppervlak. In de IDT methode wordt uitgegaan van een referentiesituatie met een windsnelheid van 4m/s en wordt een overdrachtsconstante van $2 \text{ W/m}^2\text{C}$ gehanteerd, gebaseerd op NEN2697 referentie [8], niet afhankelijk van het type doek. In de praktijk zullen er misschien zeer kleine verschillen optreden, bijvoorbeeld veroorzaakt door de textuur van het doek, maar de invloed hiervan is gering.

2.3 Geleiding

Door het doek en door het glas wordt de warmte door geleiding overgedragen. De warmteweerstand is afhankelijk van de dikte en de warmtegeleidingcoëfficiënt [4]
Volgens

$$Q_{\text{conductie}} = \frac{\Delta T}{R} \quad \text{In W/m}^2 \text{ met}$$

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Waarin

λ =soortelijke geleidingscoëfficiënt in W/Km

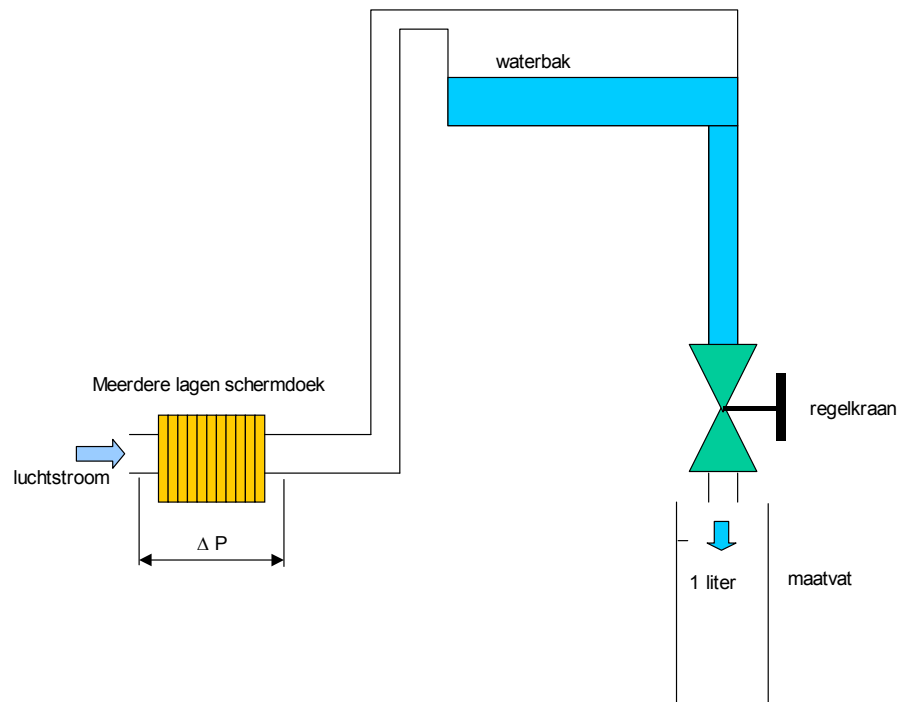
d =dikte van het materiaal in m

Van glas is goed bekend wat de thermische eigenschappen zijn. Schermdoek kan uit allerlei verschillende materialen bestaan en ook nog uit verschillende materialen op één folie. De dikte van het doek is echter gering waardoor de warmteweerstand over het algemeen verwaarloosd kan worden. Voor meerlaagse doeken is deze weerstand groter omdat er zich een isolerende luchtlaag tussen de doeken bevindt. In 2008 is door TNO de warmteweerstand van een dubbellaags doek gemeten door middel van de tweepaten methode (zie ook H5). Hieruit blijkt dat de warmteweerstand van een meerlaags doek niet veel groter is dan de som van de enkele weerstanden, maar het heeft wel degelijk invloed op de U-waarde van de kas met scherm. De huidige generatie meerlaagsdoeken heeft een gelijkende opbouw. Het is daarom niet te verwachten dat de doeken hierin ten opzichte van elkaar zullen verschillen. De bijdrage aan het aantal te behalen GLK punten is dan ook gering (één punt voor een doorsnee kas). Daarom wordt voorgesteld om in de IDT methode de warmteweerstand van het doek een functie te maken van het aantal lagen. De warmteweerstand hoeft dan niet per doek gemeten te worden. Open schermen hebben een zeer kleine warmteweerstand.

2.4 Luchtdoorlatendheid

De huidige generatie schermen is niet luchtdicht. Er kan dus luchtuitwisseling plaatsvinden door het scherm. Bij een gevelschem is sprake van een verticale spouw waardoor deze luchtuitwisseling groter wordt door de optredende koudeval in de spouw. De schermen zijn grofweg op te delen in twee categorieën: gesloten schermen en open schermen. In de open schermen zijn bandjes materiaal weggelaten. De uitwisseling van lucht zal bij open schermen aanmerkelijk groter zijn dan bij gesloten schermen. Een bekend punt van kritiek is dat sommige open schermen volgens de IDT methode beter scoren dan gesloten schermen terwijl de ervaring in de praktijk uitwijzen dat de gesloten schermen meer energie besparen.

De hoeveelheid lucht die door een dicht geweven doek is stroomt, is primair afhankelijk van het drukverschil over het doek. In eerder onderzoek van WUR [3] is deze weerstand bepaald door een drukverschil over een aantal lagen doek aan te brengen en vervolgens het debiet te meten.



Figuur 3 experimentele opstelling voor het bepalen van de luchtdoorlatendheid. bron: [3]

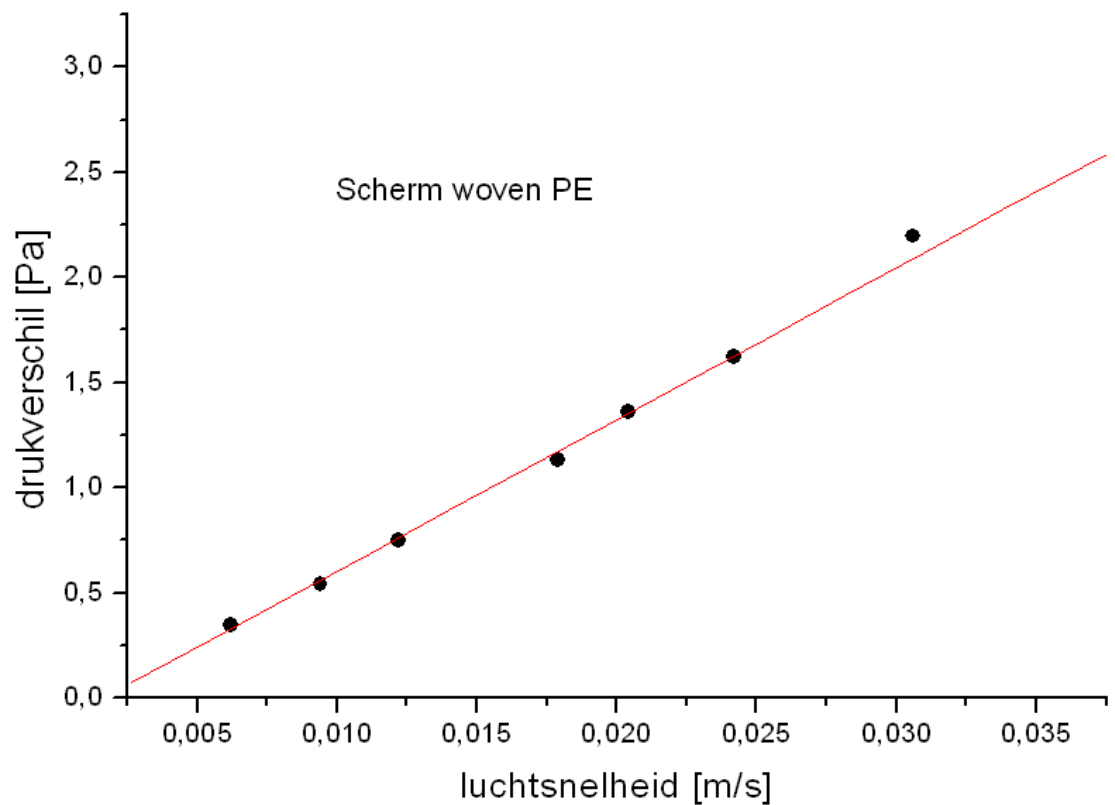
De uitgestroomde hoeveelheid water is gelijk aan de uitgestroomde hoeveelheid lucht. Door het volume debiet te delen door het oppervlakte van het schermdoek is de luchtsnelheid berekend. Bij een scherm diameter van 35 mm is het oppervlak gelijk aan 961,6 mm². Bij elke lengte van 1 meter is het doorstroomde volume 0,9616 liter lucht. Bij een volume van 1 liter in 1 seconde wordt dus 1/0,9616= 1,040 m lucht per seconde verplaatst. Het drukverschil is met onderstaande formule bepaald:

$$\Delta P = \frac{(\rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot 10^{-3})}{(\text{helling} \cdot n)}$$

Onderstaande tabel laat een resultaat van een dergelijke meting zien

Tabel 1 Meetgegevens geweven PE schermdoek. Bron: [3]

Aantal schermen n	Tijd s	Manometer	
		helling	Drukverschil ΔH mm alcohol ($\rho=0,8$)
18	25	1:25	162
	34	1:25	126
	43	1:25	93
	51	1:25	78
	58	1:25	65
	85	1:25	43
	111	1:25	31
	167	1:25	20



Figuur 4 Verband tussen luchtsnelheid en drukverschil: bron: [3]

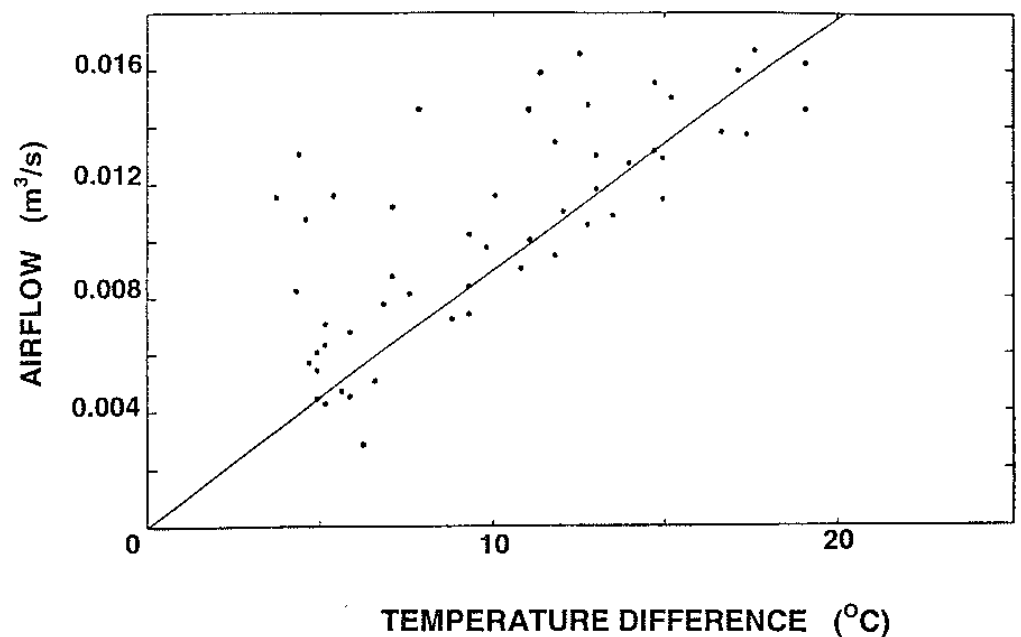
Bovenstaande figuur toont aan dat bij lage luchtsnelheden de weerstand van het doek als een Darcy stroming kan worden beschouwd.

Door een temperatuurverschil tussen de lucht onder en boven het scherm treedt een verschil in luchtdichtheid op. Hierdoor ontstaat een stroming van de warme kaslucht

door het scherm omhoog en van koude buitenlucht door het scherm omlaag. De stroming is afhankelijk van het verschil in temperatuur en van de stromingsweerstand van het scherm. De stromingsweerstand hangt af van de doorlaatbaarheid van het schermmateriaal. De relatie die deze weerstand beschrijft heet de Forchheimer relatie:

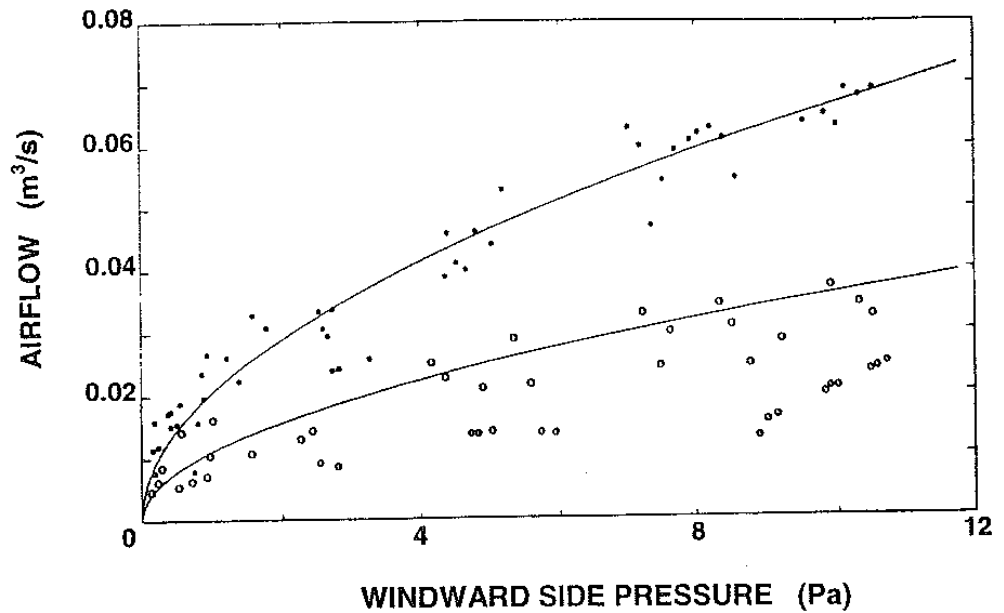
$$\frac{\mu}{K} v + \rho \left(\frac{Y}{K^{1/2}} \right) v^2 = \frac{\partial p}{\partial x}$$

De doorlaatbaarheid van het schermdoek kan bij lage lichtsnelheden worden bepaald uit de verhouding van drukval en lichtsnelheid (wet van Darcy) die alleen bestaat uit de lineaire term van de bovenbeschreven relatie.



Figuur 5 Luchtstroom door een scherm (gemeten * en voorspeld -). bron: [3]

Bovenstaande figuur laat de luchtstroom door een energiescherm zien ten gevolge van het temperatuurverschil boven en onder het doek over een oppervlak van 28 m². De luchtstroom ten gevolge van temperatuurverschillen is klein zoals uit de figuur valt af te leiden. Met de hierboven beschreven meetopstelling is dus goed te voorspellen hoe groot deze stroming zal zijn bij de verschillende schermen.



Figuur 6 Luchtstroom door een scherm ten opzichte van de stuwdruk met de luchtramen 20° open aan de loefzijde (*) of lijzijde (o) met de voorspelling (-). bron: [3]

Indien drukverschillen worden veroorzaakt door wind invloeden is de luchtstroom groter dan bij enkel temperatuurverschillen. Figuur 6 laat hiervan meetresultaten zien. In de IDT methode wordt echter de situatie beschouwd waarin de luchtramen dicht zijn. Bij toenemende energiebesparing zullen de luchtramen steeds meer gesloten zijn.

De hoeveelheid warmte-uitwisseling tussen kas en spouw wordt uitgedrukt als

$$Q_{\text{ventilatie}} = \rho_{\text{lucht}} \cdot c_{\text{lucht}} \cdot \phi_{\text{lucht}} \cdot \Delta T \quad \text{In W/m}^2$$

Waarin

- ρ_{lucht} soortelijk gewicht van lucht
- c_{lucht} soortelijke warmte van lucht
- ϕ_{lucht} luchtvolumestroom per m²

De IDT methode maakt geen verschil tussen open en gesloten schermen. Het voorstel is dan ook om de hoeveelheid luchtstroming afhankelijk te maken van het type doek. Over een open doek is eigenlijk geen temperatuurverschil te handhaven. De luchtstroom mag dus als groot verondersteld worden, waardoor boven en onder het scherm dezelfde luchttemperatuur berekend zal worden. Opgemerkt moet worden dat de luchtuitwisseling tussen boven en onder het scherm in de IDT methode met een luchtvolumestroom van 0.01 m/s relatief groot is. Dit heeft tot gevolg dat de invloed van de warmteweerstand kleiner wordt. Het is dus aan te bevelen om ϕ_{lucht} afhankelijk te maken van de gemeten luchtdoorlatendheid, gemeten met de hierboven beschreven opstelling. Alleen bij doeken die min of meer dicht zijn is de weerstand groot genoeg om een effect te hebben op de warmtebalans. Bij open schermen zal het dus niet lonen om de luchtdichtheid te meten en in dit geval wordt de maximale ϕ_{lucht} in de IDT berekening opgenomen.

2.5 Straling

De warmte-uitwisseling door infraroodstraling tussen twee vlakken is afhankelijk van de temperaturen tot de 4^e macht van de vlakken en van de emissiewaarde van het oppervlak [2]. De warmteoverdracht tussen gewas en scherm is :

$$Q_{\text{gewas_scherm}} = \frac{\varepsilon_{\text{gewas}} \cdot \varepsilon_{\text{scherm}}}{\varepsilon_{\text{gewas}} + \varepsilon_{\text{scherm}} - \varepsilon_{\text{gewas}} \cdot \varepsilon_{\text{scherm}}} \sigma \left(T_{\text{gewas}}^4 - T_{\text{scherm}}^4 \right)$$

In W/m²

Waarin

σ = constante van Stefan Boltzman

T temperaturen van de oppervlakken in K

ε emissiecoëfficiënten van de oppervlakken

Voor de niet evenwijdige vlakken zoals tussen een vlakscherm en een kasdek wordt een vormfactor gehanteerd [2]. Dus:

$$Q_{\text{scherm_dek}} = \frac{\varepsilon_{\text{scherm}} \cdot \varepsilon_{\text{glas}}}{\frac{\varepsilon_{\text{glas}}}{\cos(\text{dekhelling})} + \varepsilon_{\text{scherm}} - \varepsilon_{\text{scherm}} \cdot \varepsilon_{\text{glas}}} \sigma \left(T_{\text{gewas}}^4 - T_{\text{glasoppervlak}}^4 \right)$$

De grootste onderlinge verschillen in bijdrage van de schermen aan de energiebesparing van de kas worden veroorzaakt door de mate van het beperken van warmte-uitwisseling door infraroodstraling tussen kas en glas. Simulaties met KASPRO tonen aan dat een scherm met lage emissiecoëfficiënten tot 4 m³ aardgas kunnen besparen ten opzichte van een scherm met hoge emissie. In een heldere koude nacht ligt de stralingstemperatuur van de hemel ruim onder de luchttemperatuur. Het glas straalt dan veel warmte uit en de temperatuur van het glas daalt tot onder de omgevingstemperatuur. Met een scherm vindt er in plaats van rechtstreekse warmte-uitwisseling tussen glas en kas nu warmte-uitwisseling plaats tussen kas en scherm en tussen scherm en glas. Bij een scherm dat deels transparant is voor infrarood straling vindt echter ook nog warmte-uitwisseling plaats tussen kas en glas, afhankelijk van de transparantie uitgedrukt in τ :

$$Q_{\text{gewas_glas}} = \frac{\tau_{\text{scherm}} \cdot \varepsilon_{\text{gewas}} \cdot \varepsilon_{\text{glas}}}{\frac{\varepsilon_{\text{glas}}}{\cos(\text{dekhelling})} + \varepsilon_{\text{gewas}} - \varepsilon_{\text{gewas}} \cdot \varepsilon_{\text{glas}}} \sigma \left(T_{\text{gewas}}^4 - T_{\text{glasoppervlak}}^4 \right)$$

De totale warmte-uitwisseling tussen twee vlakken met een tussenliggend semitransparant vlak is beschreven door Zeegers []. De warmte-uitwisseling is daarbij niet op te delen in afzonderlijke termen voor transmissie en emissie dat het oplossen van de warmtebalans complexer maakt. Over het algemeen, ook in de IDT methode wordt dit vereenvoudigd tot twee afzonderlijke termen.

De hoeveelheid uitstraling aan het buitenoppervlak van de kas is afhankelijk van de zichthoekfactor die wordt bepaald door de hellingshoek van het dek met [2]

$$Q_{\text{dek_hemel}} = \frac{\pi - 1.5 \cdot \text{dekhelling}}{\pi} \cdot \varepsilon_{\text{glasoppervlak}} \cdot \sigma \left(T_{\text{glasoppervlak}}^4 - T_{\text{hemel}}^4 \right)$$

2.6 Verdamping en condensatie

In een tuinbouwkas wordt door het gewas water verdampt. Om het water om te zetten in gas is verdampingswarmte nodig. Aan de andere kant komt bij condensatie weer warmte vrij. Condensatie vindt plaats tegen het oppervlakken die onder het dauwpunt liggen, welke afhankelijk is van temperatuur en luchtvochtigheid. Veel condensatie vindt plaats tegen kasdek, maar ook het scherm kan, door uitstraling, onder het dauwpunt liggen. Er wordt dan warmte afgegeven aan het scherm en er ontstaan druppeltjes op het scherm. Afhankelijk van het type scherm wordt dit vocht door capillaire werking in het scherm opgenomen of blijft aan het oppervlak hangen. Bij grote hoeveelheden condens zal dit van het scherm afdruppelen. Een bijkomend verschijnsel is dat de emissiecoëfficiënt van een oppervlak sterk beïnvloed wordt door vocht. Water heeft een hoge emissiecoëfficiënt (± 0.95). Onderzoek van TNO [] heeft aangetoond dat de emissiecoëfficiënt van oppervlakken door condensatie reeds sterk kan oplopen, nog voor dat de condens met het oog zichtbaar is. Berekeningen van de WUR met KASPRO referentie [5] (De Zwart, 1996) een simulatiemodel voor tuinbouwkassen blijkt dat het scherm 60% of meer van de tijd dat het scherm gesloten is, nat is. De bijdrage van een lage emissiewaarde van schermdoek aan het energiebesparend potentieel is daarom minder groot dan mag worden geconcludeerd zonder de invloed van vocht. Aan de andere kant treedt condensvorming vooral aan de onderzijde van het scherm op. Zoals beschreven in 3.2 is de bijdrage van de emissiecoëfficiënt van de onderzijde van het scherm aanmerkelijk kleiner dan de bovenzijde. Het verdient aanbeveling om de mate van condensvorming en de bijdrage hiervan op de warmtebalans in vervolgonderzoek (in de praktijk) te nemen.

3 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten beschreven die van belang zijn bij het bepalen van de eigenschappen van schermdoek.

3.1 Normen

Er bestaan geen normen met betrekking tot schermdoek. Er bestaan wel normen voor bouwmaterialen, waarbij glas in de glastuinbouw uiteraard het meest gebruikte materiaal is. Voor tuinbouwglas bestond een specifieke norm waarin de berekening van de U-waarde wordt beschreven: NEN 2697. Deze berekende U-waarde is geldig bij één bepaalde referentiesituatie en wordt vooral gebruikt bij het dimensioneren van de verwarmingsinstallatie. NEN2697 is ingetrokken en vervangen door EN673. Beide normen geven een rekenmethode voor het bepalen van de U-waarde van meerlaags glas. Deze rekenmethode van NEN 2679 is eerder ook gebruikt door WUR om de U-waarde van schermdoek en de U-waarde van de kas met schermdoek te berekenen. Delen van de IDT methode zijn bovendien gebaseerd op NEN2697.

Enerzijds is de U-waarde van schermdoek niet bruikbaar omdat de U-waarde van de kas volgens de IDT methode berekend wordt door het oplossen van de warmtebalans van de kas en niet door het optellen van U-waardes. Het voordeel van een U-waarde is dat het een aansprekende grootheid is die gemakkelijk te begrijpen is. Anderzijds zijn de eigenschappen van schermdoek wezenlijk anders dan van glas. Zowel het berekenen van de U-waarde van schermdoek als het berekenen van de U-waarde van een kas met schermdoek is daarom niet betrouwbaar. Glas is bijvoorbeeld niet transparant voor infrarood, terwijl schermdoek dat wel is. De emissiewaarden van standaard soda-lime glas zijn bekend (0.837). Voor afwijkende oppervlakken dient de emissie gemeten te worden met een spectrofotometer.

Alternatief voor EN673, waarbij de U-waarde berekend wordt uit de losse bekende componenten, zijn EN674 en EN675. In deze gevallen wordt de U-waarde niet berekend, maar gemeten door een temperatuurverschil aan te brengen over het (meerlaags)glas en te meten hoeveel warmte er stroomt. Bij EN674 wordt gebruik gemaakt van de guarded hot plate methode (tweeplaten methode) en bij EN675 van de heat-flowmeter methode. In dit project zijn de schermdoeken gemeten met de tweeplaten methode. ISO 8302 beschrijft het gebruik van het tweeplaten apparaat. De twee platen methode en de heat-flowmeter worden bovendien gebruikt voor het meten van de U-waarde van diverse bouwmaterialen zoals NEN EN12664 en -67. Hetzelfde resultaat maar met een geringere nauwkeurigheid is te bereiken met een hotboxmethode zoals EN-ISO12567 voor ramen en deuren

EN14500 beschrijft een rekenmethode voor de U-waarde van zonneschermen en luiken lamellen. Net als schermdoek zijn deze deels transparant voor infrarood straling en vindt er luchtuitwisseling tussen beide zijden plaats. De transparantie wordt echter veroorzaakt door de fysieke gaten en niet door infrarood transparant materiaal.

Vermeldenswaardig is verder de nationale beoordelingsrichtlijn uit 1994 van Intron certificatie voor schermmaterialen in tuinbouwkassen. De richtlijn werd gebruikt voor het behalen van een KOMO productcertificaat. In de richtlijn is een beproevingsmethode opgenomen voor het bepalen van de warmtedoorgangscoefficiënt. Er wordt gebruikt gemaakt van een kasmodel op schaal. De binnentemperatuur wordt

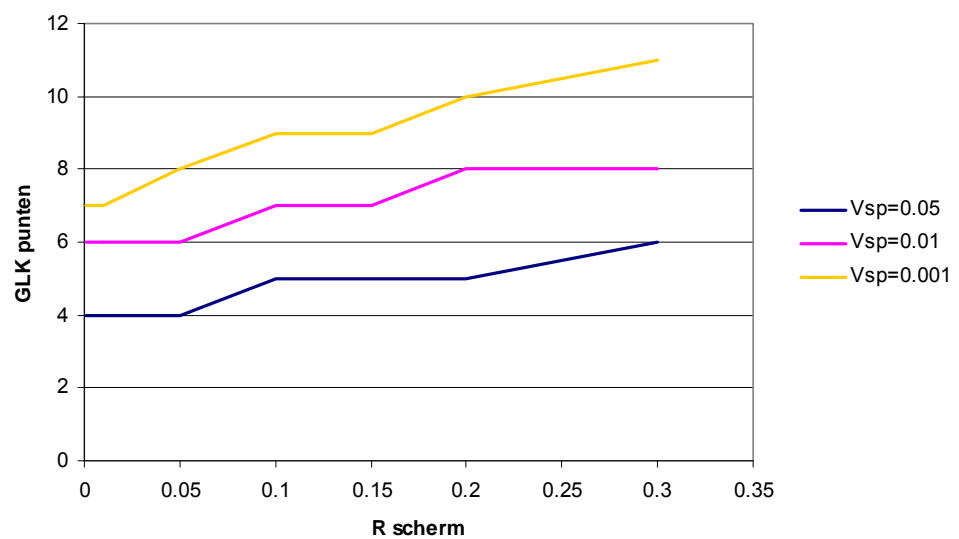
gestookt en te temperatuur van de lucht boven het kasdek werd gekoeld. Daarnaast fungeert een koude plaat als stralingshemel en wordt er water verdampt onder het scherm dat condenseert tegen het kasdek. Op deze manier kan een indruk worden verkregen van de luchtuitwisseling door het doek. Deze methode geeft een aardige indruk van het energiebesparend potentieel van schermdoek, maar is niet bruikbaar voor het bepalen van de individuele eigenschappen ervan. Alle eigenschappen hebben invloed op het resultaat van de meting, maar de individuele bijdragen zijn niet te onderscheiden. Bovendien lijkt het op een kas, maar het is geen kas. De situatie in de praktijk is wezenlijk anders.

Alle bestaande normen en methoden hebben betrekking op de bepaling van de U-waarde van constructiedelen. Echter, de IDT methode, waarvan niet afgeweken zal worden, rekent niet met de U-waarde maar met de individuele eigenschappen van schermdoek. Er zijn geen normen die de bepaling van de infrarood eigenschappen van materialen als schermdoek beschrijven.

3.2 Gevoeligheidsanalyse IDT methode

Met de IDT methode wordt het aantal te behalen GLK punten bepaald. Van de eigenschappen van het doek is bepaald wat de relatie is tussen de eigenschappen en het aantal GLK punten. Op deze manier kan de vereiste nauwkeurigheid van de parameters bepaald worden. Er is uitgegaan van een gemiddelde kas.

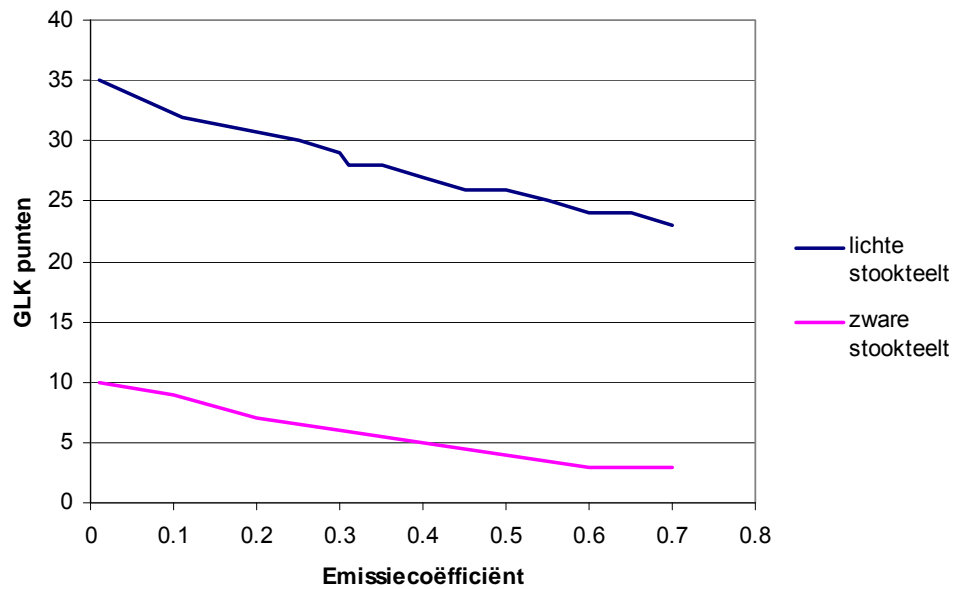
Warmteweerstand van het scherm



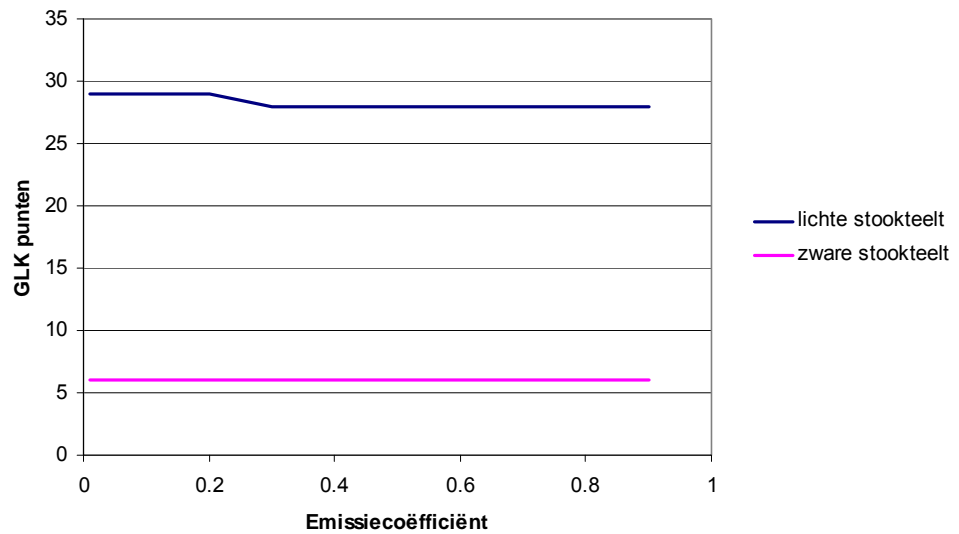
Figuur 7 Relatie tussen GLK punten en de warmteweerstand [m^2K/W] van schermdoek

In figuur 7 is de relatie tussen de warmteweerstand van het doek en het aantal GLK punten weergegeven. In 2.2 is reeds gesteld dat de bijdrage van de warmteweerstand van het scherm aan de reductie van de U-waarde van de kas gering is. Deze wordt vrij sterk beïnvloed door de hoeveelheid luchtuitwisseling tussen de lucht onder en boven het scherm. Ter verduidelijking is daarom met verschillende luchtsnelheden in de spouw gerekend. De huidige aanname is de IDT methode is een luchtsnelheid van 0.05m/s. Een normale waarde voor een enkel doek is kleiner dan 0.05 Km²/W. voor een tweelaags doek 0.15-0.2 Km²/W.

Uit bovenstaande blijkt dat de vereiste nauwkeurigheid bij het bepalen van de warmteweerstand gering is en dat een indeling in categorieën volstaat.

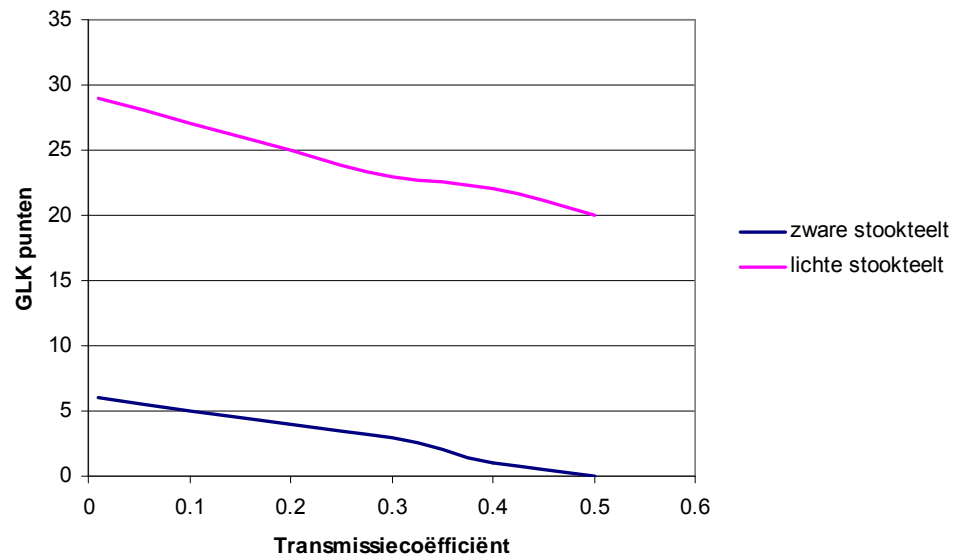


Figuur 8 Relatie tussen de emissiecoëfficiënt [-] van de buitenzijde van het scherm en het aantal GLK punten



Figuur 9 Relatie tussen de emissiecoëfficiënt[-] van de binnenzijde van het scherm en het aantal GLK punten

Het scherm heeft twee emissiecoëfficiënten: een aan de binnenzijde en een aan de buitenzijde. De relatie tussen de emissiecoëfficiënten en het aantal GLK punten is weergegeven in figuur 8 en figuur 9. De invloed van emissiecoëfficiënt van de buitenzijde is aanmerkelijk groter. Het temperatuurverschil tussen scherm en glas is immers groter dan tussen kas en scherm.



Figuur 10 Relatie tussen de transmissiecoëfficiënt van het scherm en het aantal GLK punten

In figuur 5 is de relatie tussen de transmissiecoëfficiënt van het scherm en het aantal GLK punten weergegeven. Het verband is ongeveer gelijk aan dat van de

emissiecoëfficiënt van de buitenzijde. Deze twee coëfficiënten geven immers een maat voor de hoeveelheid warmte-uitwisseling met het koude glas van het dek.

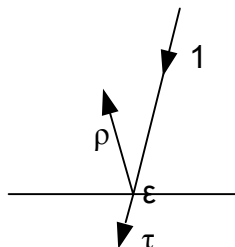
Bij (meet)fouten in de gebruikte emissie of- transmissiecoëfficiënt kunnen meer of minder GKL punten. Wil een meetfout geen invloed hebben op het afgeronde resultaat van de berekening dan moet deze dus in de afronding wegvallen. Dit komt tot uitdrukking in de hellingshoek van de lijnen in de grafiek. Deze is maximaal 1.8 GLK punten/0.1 punt emissie. Uit deze analyse is daarmee op te maken dat onder de huidige aannames van de IDT methode, dat een reproduceerbaarheid van 0.03 punt absoluut volstaat om geen gevolgen te hebben voor het aantal GLK punten.

4 Huidige meetmethoden voor schermdoek

De eigenschappen zijn in het verleden door WUR en door TNO bepaald op verschillende manieren. In dit hoofdstuk worden deze methoden voor het bepalen van de eigenschappen van schermdoek beschreven.

4.1 Inleiding

Infraroodstraling die op een semitransparant scherm valt, wordt deels opgenomen door het oppervlak (uitgedrukt in de emissiecoëfficiënt ϵ) deels gereflecteerd (uitgerukt in ρ) en gaat deels door het oppervlak heen (τ).



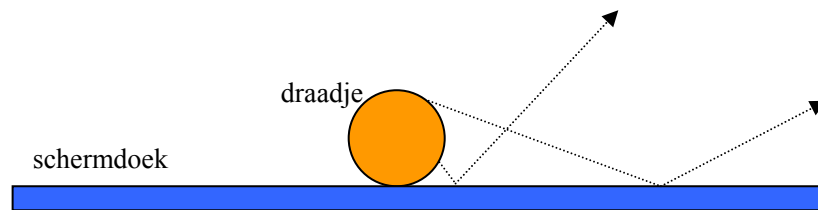
Figuur 11 Emissie, reflectie en transparantie

Uit energiebehoud volgt: $\epsilon + \rho + \tau = 1$. Alle drie de coëfficiënten zijn eenheidsloze getallen tussen 0 en 1. Als alle straling gereflecteerd wordt is ρ dus 1 en zijn ϵ en τ nul.

Er zijn dus 3 grootheden die gezamenlijk de infrarood eigenschappen van schermdoek vormen, maar er hoeven er maar 2 gemeten te worden en de derde volgt uit bovenstaande vergelijking. Bij de meeste meetmethoden voor infrarood eigenschappen worden de transmissie en de reflectie gemeten en wordt de emissie hieruit berekend. N.B. Het oppervlak zendt zelf ook straling uit in de zelfde mate waarin het straling opneemt. De hoeveelheid is afhankelijk van de temperatuur en van ϵ . Dit is niet in de figuur weergegeven.

Reflectie kan gericht zijn, zoals in figuur 11, maar ook diffuus. De uitgaande straling wordt dan in willekeurige richt weerkaatst.

Tussen de normale en hemisferische emissie kan omgerekend worden, bijvoorbeeld voor glas met behulp van tabel A2 uit EN673 referentie [9] maar deze kan per materiaal verschillen en gaan uit van een glad oppervlak. De schermdoeken zijn niet vlak, maar bestaan uit bandjes die bijeen worden gehouden door draadjes. De draadjes liggen soms op het oppervlak en hebben dan bij grotere hoeken veel invloed zoals duidelijk wordt uit figuur 12.

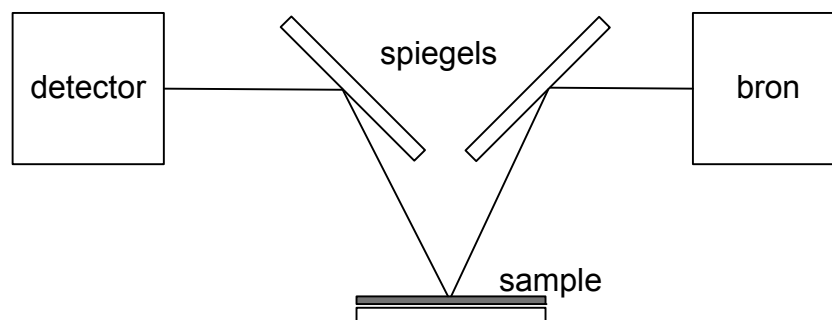


Figuur 12 detail van schermdoek

De straling die wordt uitgezonden door de draadjes wordt gereflecteerd door het achterliggende materiaal. Andersom wordt onder grote hoeken meer straling geabsorbeerd door de draadjes.

4.2 Meting met de spectrofotometer (WUR)

Het scherm wordt bij deze meting opgedeeld in de uitgangsmaterialen. Van de uitgangsmaterialen (folie) wordt een sample gebruikt dat groter is dan de in de schermen gebruikte bandjes. Deze samples worden aangeleverd door de leverancier. Er worden met een Perkin Elmer 950 twee metingen uitgevoerd: een transmissiemeting en een reflectiemeting voor de ijking. Het meetbereik van de Perkin Elmer is niet voldoende daarom wordt er ook gemeten met de Varian FT-IR. De Varian meting die wel het IR spectrum volledig kan meten wordt vervolgens geijkt op basis van de Perkin Elmer meting in de range van het spectrum waar beide apparaten kunnen meten. Bij de transmissiemeting in de Perkin Elmer wordt het sample in een bundel infraroodstraling geplaatst tussen de bron en de integrerende bol. Een detector is in de bol geplaatst. De detector meet per golflengte de hoeveelheid invallende straling. Door de meting met en zonder sample uit te voeren is uit het verschil tussen deze twee metingen, vermenigvuldigd met de energiedichtheid per golflengte, gedeeld door het totaal, de transmissie te bepalen. Bij reflectiemetingen wordt de straling die door het sample verstrooid wordt, eveneens door de bol opgevangen en door de detector gedetecteerd. De transmissie zal in de Varian voor verstrooiende materialen te laag worden gemeten omdat alleen de normale reflectie wordt gemeten, maar hiervoor wordt gecorrigeerd met behulp van de meting met de Perkin Elmer.



Figuur 13 Reflectiemeting met een spectrofotometer

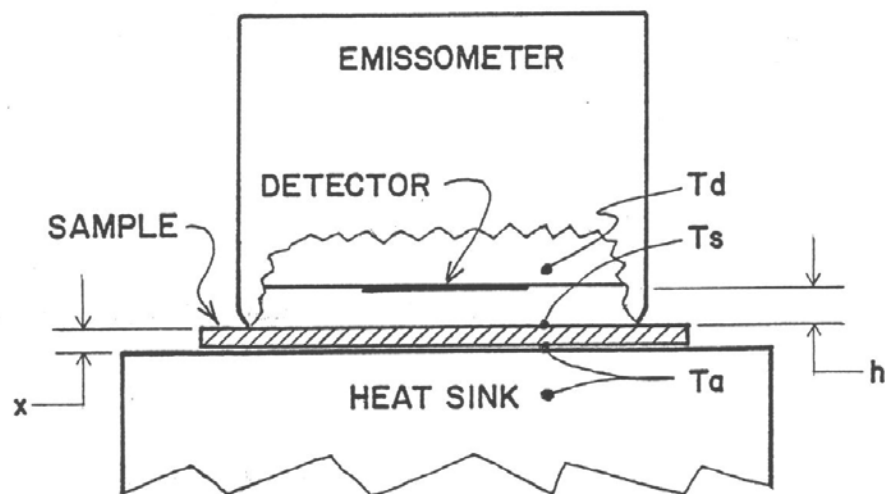
De reflectiemeting met de Varian FT-IR spectrometer is, schematisch weergegeven in figuur 13, wordt uitgevoerd door de bundel infraroodstraling via spiegel op het sample te laten vallen en de gereflecteerde bundel via een tweede spiegel op de detector. Ook

deze meting wordt tweemaal uitgevoerd. Eerst wordt gemeten met een spiegel in plaats van het sample en vervolgens met het sample. Uit het verschil wordt wederom de reflectie bepaald. Alleen de normaal gereflecteerde straling valt op de detector. Aangezien het folies betreft is van belang dat deze vlak opgespannen worden. Om deze reden is in deze opstelling geen samengesteld schermdoek te meten, aangezien de bandjes in het doek onder verschillende hoeken staan. De bandjes zijn kleiner dan de bundel. De randen van de bandjes zullen de bundel bovendien verstrooien. Voor diffuus reflecterende folies zal de reflectie in de Varian dus te laag worden gemeten, maar aangenomen wordt dat de mate van verstrooiing gelijk is als die bij de Perkin Elmer

Per gebruikt materiaal worden de eigenschappen bepaald. De eigenschappen van het samengestelde doek worden berekend door de eigenschappen van de bestanddelen naar rato van oppervlak op te tellen. De invloed van de touwtjes die de bandjes bijeen houden wordt verwaarloosd. Voor de fysieke gaten geldt dat $\tau=1$. Om de fysieke openheid van een doek te bepalen worden op een digitale foto pixels geteld.

Nadeel van de methode zoals door WUR gehanteerd is dat er niet wordt uitgegaan van de echte schermen maar van de onderdelen waaruit de schermen zijn opgebouwd. De uiteindelijke meting bestaat uit een samenstelling van de verschillende metingen die allemaal een fout in zich hebben. Daardoor wordt de totale fout groter.

4.3 Calorische Emissiemeter (TNO)



Figuur 14 AE emissiemeter van Devices and services. Bron: [6]

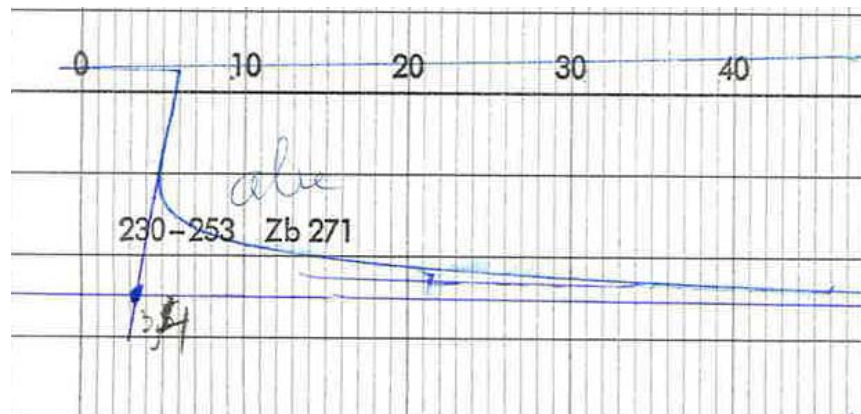
TNO gebruikt een AE emissiemeter van Devies and Services zoals weergegeven in figuur 14. Met de emissiemeter wordt het samengestelde schermdoek gemeten. Deze bestaat uit een warme stralingsholte die op het materiaal wordt gezet en een detector die een spanning op basis van de gereflecteerde straling genereert tussen 0 en 1 volt die gelijk is aan de emissiecoëfficiënt. Door de geometrie van de sensor is de meting is hemisferisch. De transmissie wordt niet rechtstreeks gemeten maar wordt volgens TN81-1 referentie [7] bepaald door de schijnbare emissie te meten met twee verschillende achtergronden met bekende emissie, één hoog en één laag. De schijnbare emissie kan omschreven worden als:

$$\varepsilon_{\text{schijnbaar}} = \varepsilon_{\text{sample}} + \tau_{\text{sample}} \cdot \left[1 - \tau_{\text{sample}} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{\text{achtergrond}})}{(1 - \varepsilon_{\text{sample}} - \tau_{\text{sample}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{achtergrond}})} \right]$$

Door de meting tweemaal uit te voeren ontstaan twee vergelijkingen met twee onbekenden die dus zijn op te lossen. In theorie (verwijzing artikel) heeft de emissiecoëfficiënt van de achterzijde ook invloed. De achterzijde van het sample reflecteert en zendt straling uit. Bij de meting met een hoog reflecterende achtergrond wordt deze straling gereflecteerd en via het doek door de sensor opgevangen. Bij materialen met een beperkte transparantie is deze invloed beperkt.

De sensor heeft ongeveer 1 minuut nodig om tot een evenwicht te komen. De meting veronderstelt een goed thermisch contact tussen sample en ondergrond en deze dienen dezelfde (omgevings)temperatuur te hebben. Daarvoor dient het materiaal thermisch goed geleidend te zijn. Het gebruik van thermische pasta is niet toegestaan omdat er dan geen sprake meer is van een materiaal met bekende emissie als achtergrond. Voor het meten van slecht geleidende materialen geldt een aparte procedure [6] maar deze is beperkt bruikbaar in combinatie met de meting van semitransparante materialen. In de praktijk warmt het schermdoek dus op. Figuur 15 geeft een voorbeeld van een meting met de emissiemeter.

Door de meetwaarden (volgens TN79-17) te extrapoleren tot het moment waarop de sensor op het doek gezet wordt, wordt de (schijnbare) emissiecoëfficiënt verkregen. Dit is in de figuur te zien waarbij aluminiumfolie wordt gemeten. Op de horizontale schaal staat de emissiewaarde maal 100. De meting dient van onderen naar boven te worden gelezen. De sensor komt van een ondergrond met hoge emissie.



Figuur 15 meetresultaat van de emissiemeter

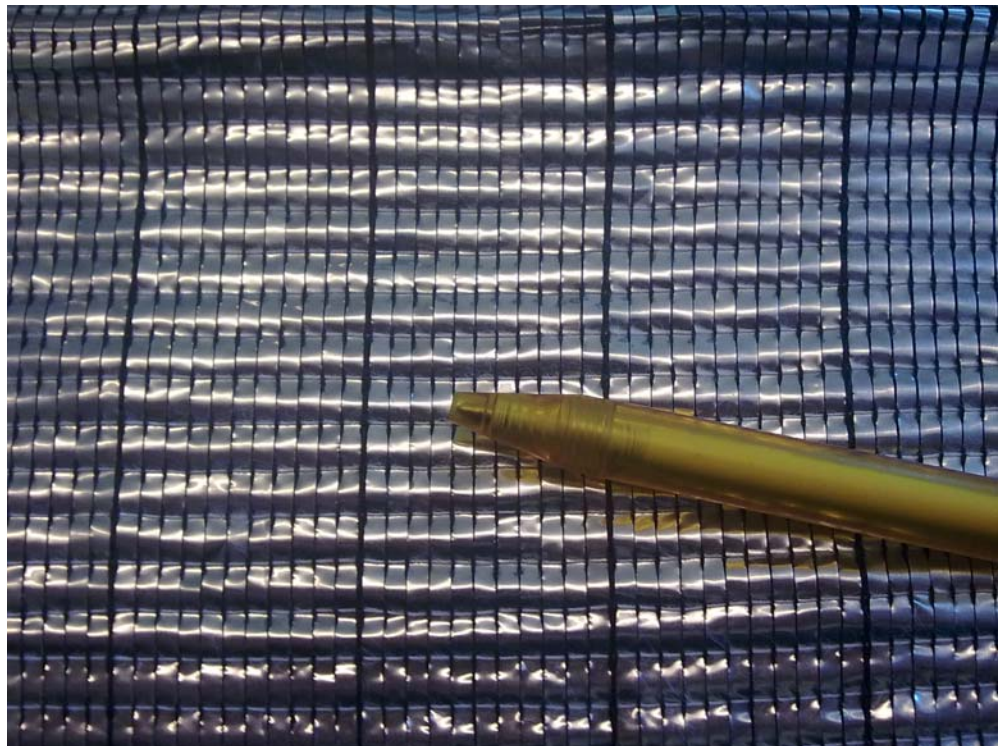
De meting wordt ook beïnvloed door de temperatuur van de sensor zelf. Als de sensor langdurig op een reflecterende ondergrond wordt geplaatst zal deze warmer worden dan wanneer deze op een goed geleidende ondergrond met hoge emissie wordt geplaatst. In de praktijk wordt dit ondervangen door een vaste procedure aan te houden waardoor de reproduceerbaarheid groter wordt. De combinatie van het opwarmen van het sample, het opwarmen/afkoelen van de sensor en de lage reactiesnelheid maakt het onmogelijk om de normale nauwkeurigheid van 0.01 zoals gespecificeerd door de fabrikant te realiseren.

5 Metingen aan 8 schermdoeken

In het kader van dit project zijn metingen gedaan om de uitkomsten van de bestaande meetmethoden te kunnen vergelijken. Bovendien zijn een aantal aanvullende metingen uitgevoerd om de resultaten beter te kunnen beoordelen.

5.1 Inleiding

In het kader van dit onderzoek zijn 4 verschillende typen doeken van 2 leveranciers doorgemeten volgens beide hierboven beschreven methoden. Dit zijn veel gebruikte doeken die regelmatig worden gebruikt bij een groenlabelkas aanvraag. Het betreft een verduisteringsdoek, een energiescherm, een open (zonwering) scherm en een gesloten scherm voor zowel zonwering als energiebesparing wordt gebruikt.

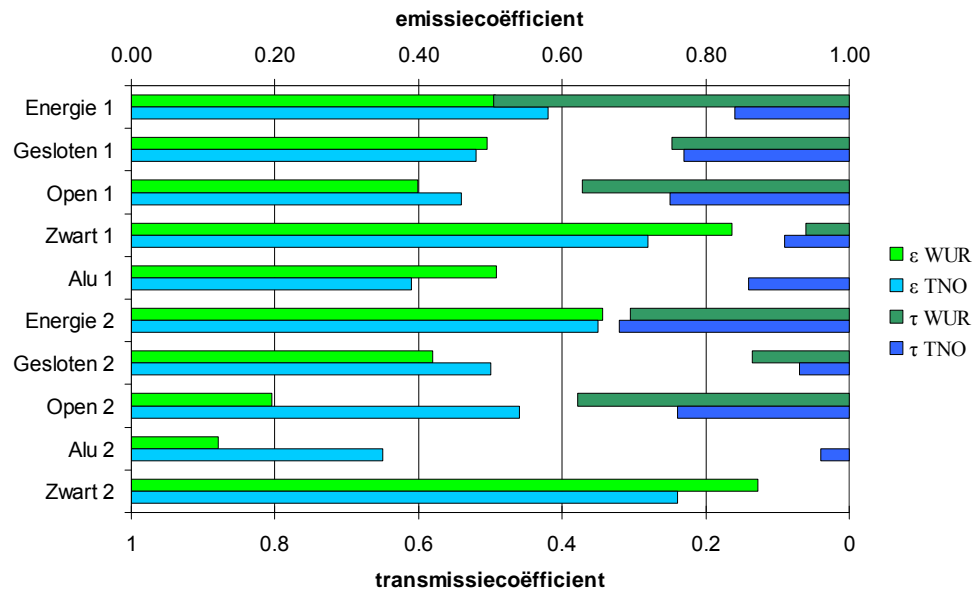


Figuur 16 Een aluminium scherm,

Het verduisteringsscherm bestaat uit twee lagen: een zwart scherm en een laag met aluminium. Er zijn dus 10 doeken die steeds worden vergeleken. Het open en het gesloten scherm zijn vrijwel gelijk, met dat verschil dat in het open scherm bandjes materiaal zijn weggelaten daar waar in het gesloten scherm op deze plaats transparante bandjes zitten. Beide schermen bestaan voor 50% uit (bandjes met) aluminium.

5.2 Bestaande methoden

De verschillende schermen zijn volgens de in het vorige hoofdstuk beschreven meetmethoden doorgemeten. De resultaten zijn weergegeven in figuur 17.



Figuur 17 Meetresultaten volgens bestaande meetmethoden

Voor de 10 gemeten doeken zijn de emissiecoëfficiënten links en de transmissiecoëfficiënten rechts uitgezet. De ruimte tussen de twee balken is dus gelijk aan de reflectie. De door WUR bepaalde normale emissiecoëfficiënt is omgerekend naar de hemisferische emissiecoëfficiënt volgens tabel A.2 in EN673. Er zijn behoorlijke verschillen zichtbaar. Opvallend groot is het verschil tussen de twee aluminium schermen. Het zelfde verschil is terug te zien bij de schermen die dezelfde aluminium bandjes bevatten, aangezien het uitgangsmateriaal hetzelfde is en dit uitgangsmateriaal is gemeten (in de WUR meting). De getoonde waarden zijn immers door berekening van de uitgangsmaterialen bepaald. De emissiewaarde van het open 1 scherm is volgens de TNO meting hoger dan de emissiewaarde van het bijbehorende gesloten scherm. Dit kan niet kloppen omdat op de plek waar gaten zitten in het open scherm er materiaal zit in het gesloten scherm. De emissiecoëfficiënt van een gat is immers 0 en die van het materiaal groter dan 0. Wat verder opvalt, is het grote verschil in de transparantie van het energiescherm 1.

Om deze verschillen te kunnen verklaren is een aantal extra metingen gedaan. Deze zijn in de volgende paragrafen beschreven.

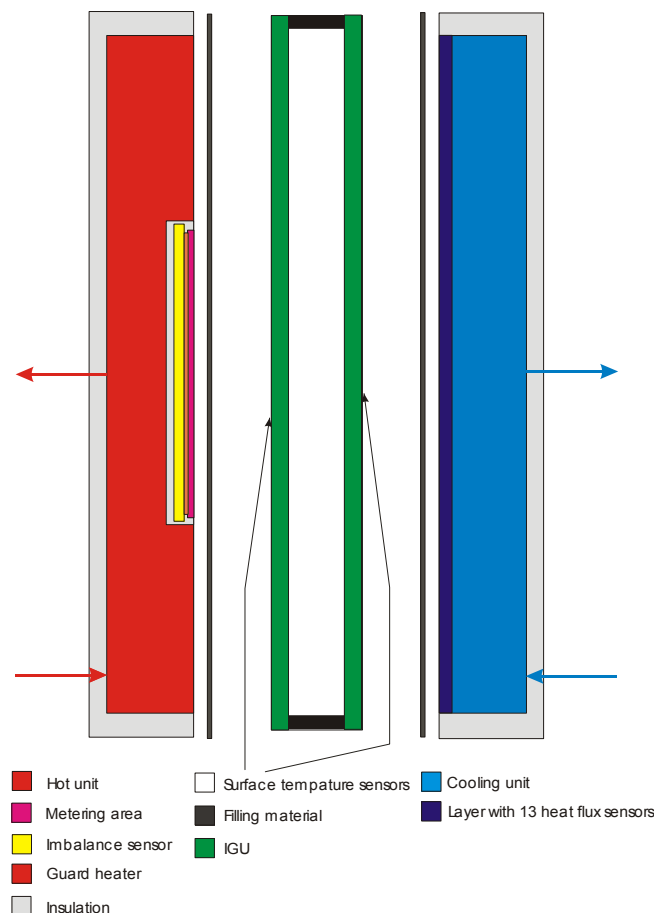
5.3 Twee platen apparaat

De schermen zijn gemeten volgens de tweeplaten methode (volgens EN674). Met deze methode wordt een gecontroleerd temperatuurverschil aangebracht over een sample en wordt gemeten hoeveel warmte er door het sample stroomt.

Het instrument is gebaseerd op de eisen vastgelegd in ISO normering. Dit betreft ISO 8302 voor GHP instrumenten en ISO 8301 voor instrumenten op basis van warmtestroomsensoren. Het instrument is een 'single specimen' instrument met een guard section aan de warme kant en een sectie met warmtestroomsensoren aan de koude zijde van het instrument. De metingen zijn uitgevoerd met de elementen in verticale positie. Een doorsnede tekening van het instrument is in figuur 1 te vinden.

De twee aluminium platen van het instrument bevatten watervoerende kanalen en zijn aangesloten op thermostaatbaden. De warme sectie bevat de rechthoekige 'guard' uitsparing van 255 mm. Hierin is een elektrisch stoekelement ondergebracht aangesloten op een PID regelaar. Tevens is een isolatielaag aangebracht met daarin een speciale sensor die de onbalans ten gevolge van laterale warmtestromen meet. Deze onbalans in de warmtestroom wordt door de PID regelaar naar nul weggeregeld. Indien er geen laterale warmtestroom meer bestaat gaat alle door het stoekelement ontwikkelde warmte door het monster.

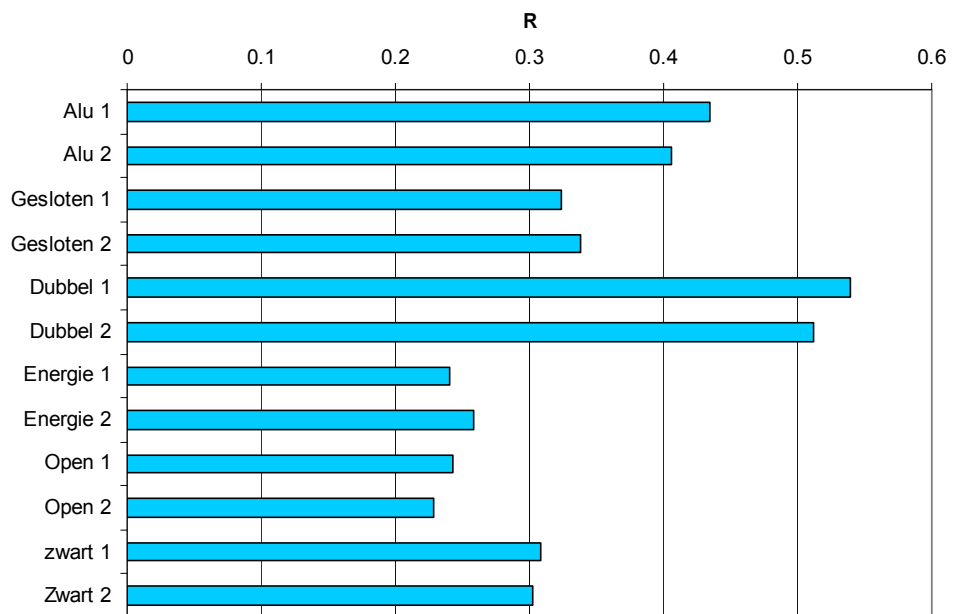
Guarded Hot Plate Instrument



Figuur 18: Schema met doorsnede van het instrument

De calibratie van het instrument is door meting van het elektrisch vermogen traceerbaar naar internationale standaarden. De calibratie van de warmtestroomsensoren is door het uitvoeren van GHP metingen aan referentiemonsters. De temperatuurmetingen worden uitgevoerd met 2 setjes van 5 thermokoppels van 0.2 mm dikte. Tussen monster en platen worden een vulmateriaal gebruikt om oneffenheden in het monster en die veroorzaakt door de thermokoppels op te vangen. Het vulmateriaal bestaat uit flanellen doeken.

Door het temperatuurverschil te delen door de warmtestroom per vierkante meter wordt de warmte weerstand R bepaald, uitgedrukt in m^2K/W . De gemeten R waarde is de totale warmte weerstand van het doek inclusief de spouwen aan beide zijden en is afhankelijk van een aantal parameters. De convectieve eigenschappen van het doek en de spouwweerstand zijn min of meer gelijk bij alle metingen, zeker gezien de kleine afmetingen van de spouw waarin het doek hangt tijdens de meting. Er blijven echter 3 onbekende infrarood eigenschappen en een warmte weerstand van het doek zelf. Het is niet mogelijk deze 3 onbekenden individueel te berekenen uit de meetresultaten. De gemeten waarde geeft echter wel een goede indruk van de totale energieprestatie van het doek. Naar mate de reflectie hoger is zal de R waarde hoger zijn, uitgaande van een kleine warmte weerstand van een doek zelf. De resultaten zijn weergegeven in figuur 19



Figuur 19 R waarden gemeten volgens de tweeplaten methode

Wat opvalt, is dat de verschillen in R waarde niet erg groot zijn tussen de doeken van hetzelfde type. Te zien is verder dat de gesloten doeken duidelijk beter presteren dan de open doeken. De energieschermen, die overigens ook dicht zijn, hebben een net iets hogere weerstand dan de open schermen.

Het grote verschil tussen de beide aluminium doeken zoals gemeten door WUR is niet terug te vinden, evenmin bij de dichte schermen. Om hierin meer inzicht te krijgen zijn extra metingen gedaan, waarbij de aluminium zijde van de alu doeken zwart is gespoten

met spuitverf. De emissiewaarde hiervan is ongeveer 0.95. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in

Tabel 2

	Normaal	Geverfd
Alu 1	2.30	3.04
Alu 2	2.46	2.96

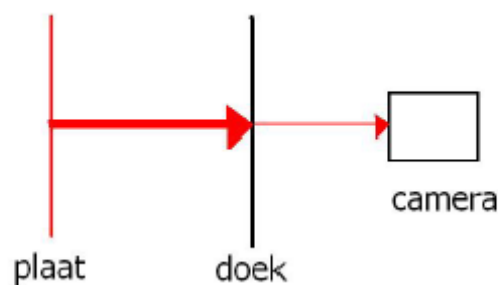
R waarden aluminium doeken in het tweeplaten apparaat, gewoon en met zwart geverfde zijde

De gemeten R waarde is nog steeds niet te ontleden in de afzonderlijke eigenschappen. Wel is duidelijk zichtbaar dat de lage emissiecoëfficiënt van de doeken de warmtestroom aanmerkelijk verkleint. De achterzijde van het Alu 2 doek heeft een lagere emissiecoëfficiënt dan het Alu 1 doek. De warmteweerstand van Alu 1 is vermoedelijk iets hoger door de minder vlakke textuur van het doek, die meer lucht vasthoudt. Daardoor is het effect van zwartverven bij alu2 kleiner. De gevonden meetresultaten wijzen op een gering verschil tussen beide doeken.

5.4 Infrarood camera

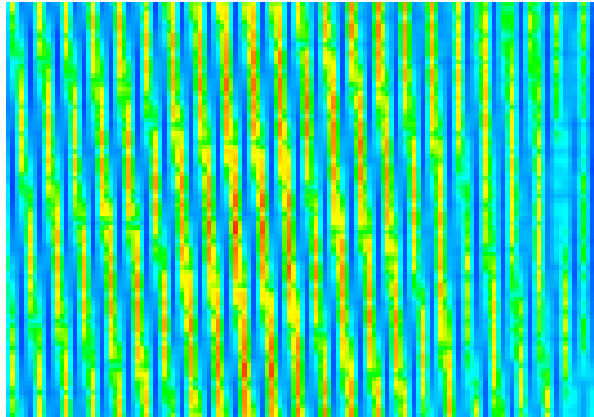
Om de gemeten verschillen in emissiecoëfficiënten te controleren is een tweetal eenvoudige opstellingen gemaakt met behulp van een infrarood camera. De beelden zijn gemaakt met behulp van een Testo 880 infrarood camera met een meetbereik van 8 tot 14 μ m. De camera is zo ingesteld dat het de temperatuur weergeeft, alsof het gemeten object een emissiewaarde heeft van 1. Met behulp van bijbehorende software kan de gemiddelde temperatuur van een stuk doek dat uit meerdere bandjes en touwtjes bestaat worden bepaald.

Transmissie



Figuur 20 Bepaling van de transmissie met de infraroodcamera

Figuur 20 beschrijft een eenvoudige opstelling om de transmissie van schermdoek met behulp van een infrarood camera te bepalen. Er is een warmtebeeld gemaakt van een infrarood straler, die gebruikt wordt voor verwarmingstoepassingen met een stuk schermdoek tussen de plaat en de camera. De meting is herhaald met een koude achtergrond. Op basis van het warmte beeld zoals weergegeven in figuur 21 kan de gemiddelde temperatuur van een stuk doek dat meerdere bandjes omvat berekend worden.



Figuur 21 Warmtebeeld van schermdoek met een warme achtergrond

De gemeten straling is een optelsom van de straling die het doek uitzendt, de gereflecteerde omgevingsstraling en de straling die door het doek heen gaat. Dus:

$$T_{\text{gemeten.koud}}^4 = \tau_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4 + \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \rho_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4$$

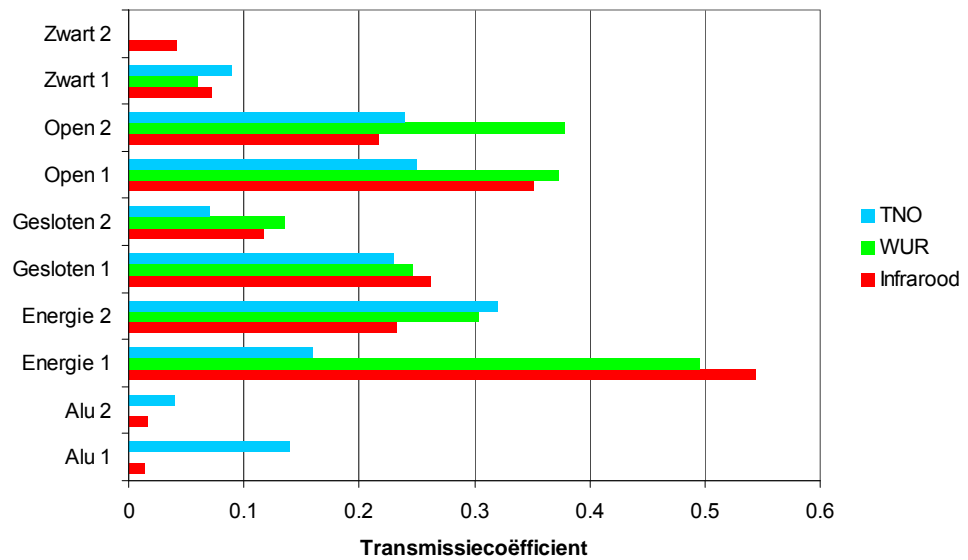
En

$$T_{\text{gemeten.warm}}^4 = \tau_{\text{doek}} \cdot T_{\text{warm}}^4 + \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \rho_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4$$

Door beide vergelijkingen van elkaar af te trekken vallen de reflectieterm en de emissieterm van het doek weg. T_{warm} is eveneens bepaald met de infrarood camera, waardoor de emissiecoëfficiënt van de plaat wegvalt. De transmissiecoëfficiënt is dan eenvoudig op te lossen tot:

$$\tau_{\text{doek}} = \frac{T_{\text{gemeten.warm}}^4 - T_{\text{gemeten.koud}}^4}{T_{\text{warm}}^4 - T_{\text{omgeving}}^4}$$

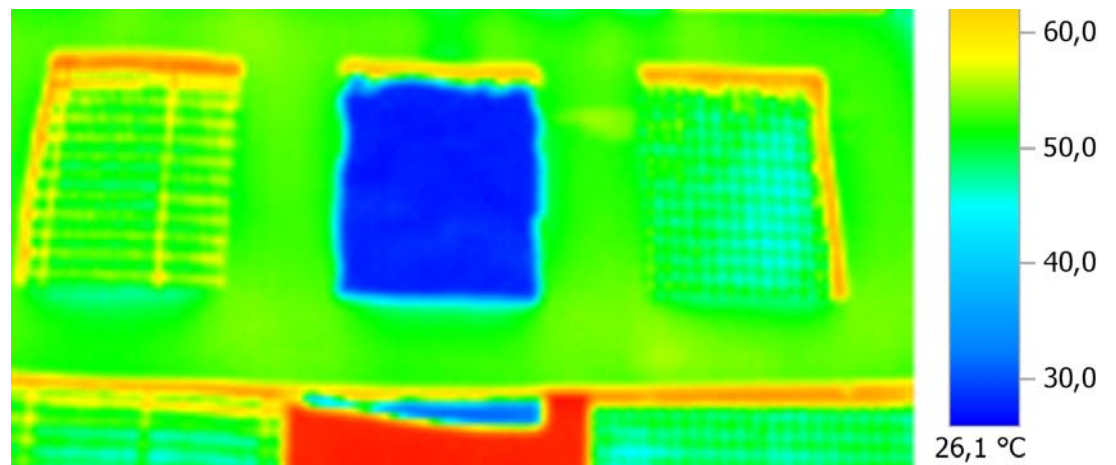
Het doek zelf blijft bij benadering op omgevingstemperatuur. Om dit te bevorderen wordt omgevingslucht langs het doek geblazen. De resultaten zijn weergegeven in figuur 22. De waarden zijn gecontroleerd met stalen plaat met gaten, waardoor de transmissie gelijk is aan de fysieke openingsgraad. De gemeten transmissie kwam goed overeen met de berekende (0.30 tegenover 0.32). Door de relatief grote afstanden tussen bron, doek en camera is er geen sprake van een hemisferische meting maar een normale.



Figuur 22 transmissiecoëfficiënt met de infrarood camera

Emissie

Een aluminium plaat, voorzien van een zwarte verflaag om de emissiecoëfficiënt te verhogen is elektrisch verwarmd. Op deze plaat zijn de schermdoeken gespannen en met een infraroodcamera is het warmte beeld vastgelegd. Een voorbeeld is weergegeven in figuur 23.



Figuur 23 Warmtebeeld aluminium doeken op een warme plaat

Het rode gedeelte in de figuur is de warme plaat en het egaal groene gedeelte is een houten frame. In het frame zitten drie vensters. Links is het doek Alu 1 te zien, rechts het doek Alu 2 en in het midden aluminiumfolie.

De werkelijke hoeveelheid straling die wordt gemeten is een optelsom van de door het object zelf uitgezonden straling, van reflectie van de omgeving en eventueel van straling de achterliggende warme plaat. In vergelijking:

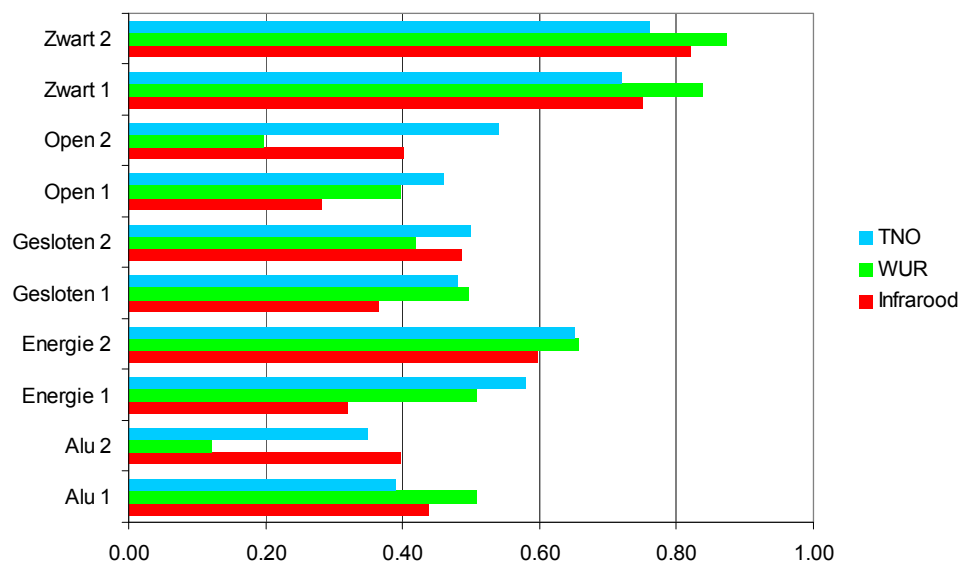
$$T_{\text{gemeten}}^4 = \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \rho_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4 + \tau \cdot \varepsilon_{\text{plaat}} \cdot T_{\text{plaat}}^4$$

Met $\varepsilon + \rho + \tau = 1$ is $\varepsilon_{\text{doek}}$ hieruit eenvoudig op te lossen.

$$\varepsilon_{\text{doek}} = \frac{T_{\text{gemeten}}^4 - \tau_{\text{doek}} \cdot \varepsilon_{\text{plaat}} \cdot T_{\text{plaat}}^4 + (\tau_{\text{doek}} - 1) \cdot T_{\text{omgeving}}^4}{T_{\text{doek}}^4 - T_{\text{omgeving}}^4}$$

De nauwkeurigheid van de meting wordt enerzijds beperkt door het meetbereik, maar anderzijds vooral door de onbekende temperatuur van het doek. De transmissiecoëfficiënt wordt als bekend verondersteld. Het doek zal bij benadering dezelfde temperatuur aannemen, maar per definitie niet dezelfde temperatuur. Om de temperatuur van het doek te controleren is het doek gespoten met zwarte verf, waardoor de emissiecoëfficiënt bekend wordt. Hieruit blijkt dat het doek enkele graden kouder is dan de plaat, waarbij wordt opgemerkt dat dit per doek kan verschillen.

De gevonden emissiecoëfficiënten, samen met de volgens de oude meetmethoden bepaalde emissiecoëfficiënten zijn weergegeven in Figuur 24.



Figuur 24 Emissiecoëfficiënten gecontroleerd met de infraroodcamera

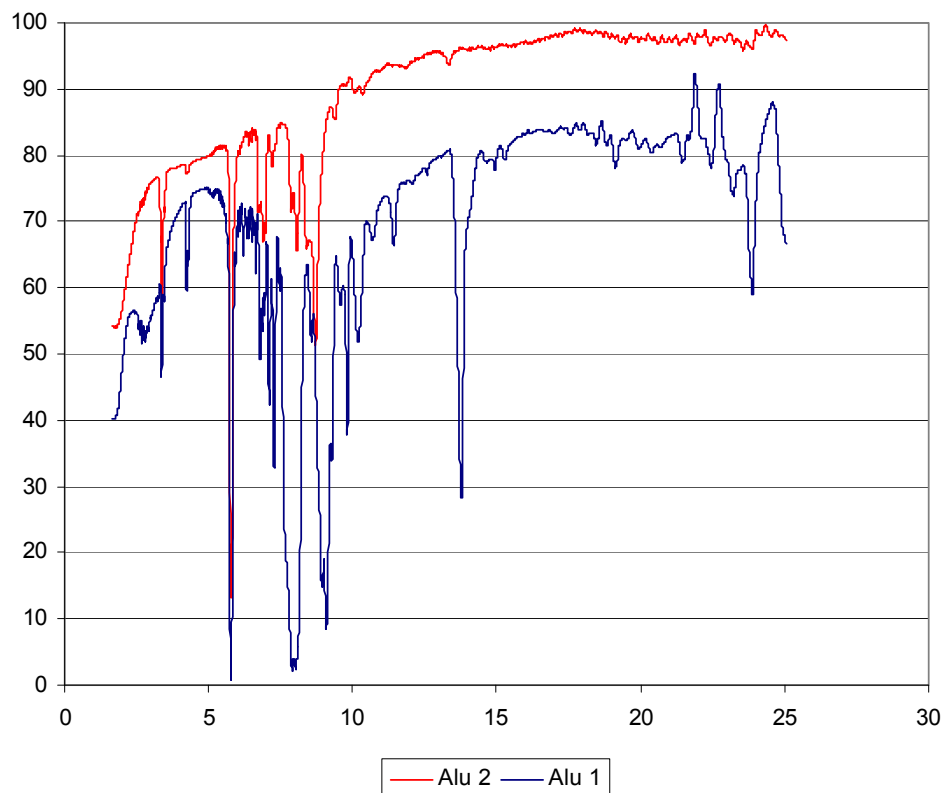
Over het algemeen ligt de gevonden emissiewaarden tussen de eerder gevonden emissiewaarden. Tussen de beide aluminium doeken is wederom weinig verschil. Het Alu 2 doek heeft ook volgens deze meting een lagere emissiecoëfficiënt dan Alu 1.

Er zijn aanvullende proeven gedaan waarbij getracht is om de omgevingstemperatuur te beheersen om zo de onzekerheid over de temperatuur van het doek weg te nemen. Er is een polystyreen omhulling gemaakt die over plaat en de doeken is heen gezet. Door een

opening in de doos is vervolgens het warmtebeeld gemaakt. Het bleek in de praktijk lastig om de temperatuur met behulp van een eenvoudige opstelling te controleren. De temperatuur verloopt te veel over het doek, waardoor geen betrouwbare meetgegevens werden verkregen.

5.5 Aluminium doeken

Het grote verschil in gemeten waarden van de aluminiumdoeken kan door meerdere verschijnselen verklaard worden. In deze paragraaf worden deze doeken en de uitgangsmaterialen daarom nader beschouwd. In figuur 25 zijn de resultaten van de spectrale meting van de beide uitgangsmaterialen weergegeven.

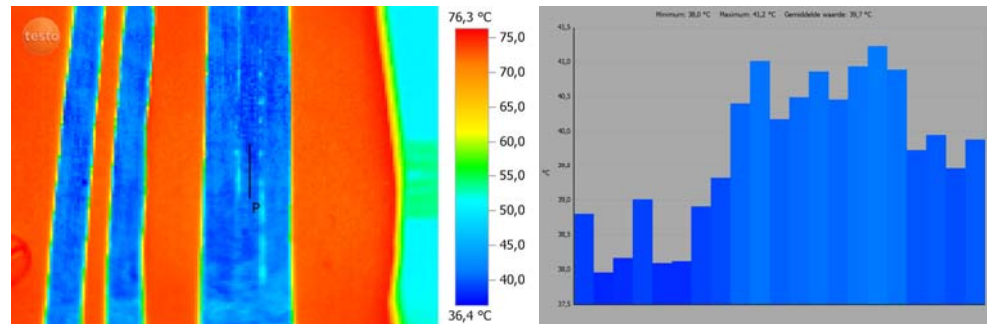


Figuur 25 Uitgangsmaterialen van de alu doeken in de spectrofotometer gemeten

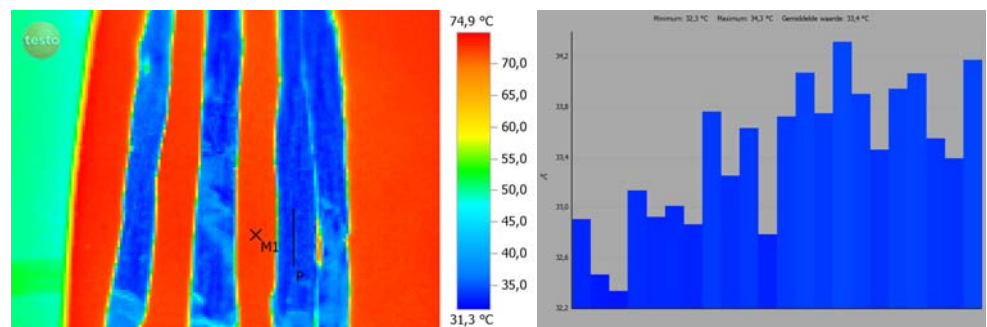
Het uitgangsmateriaal van Alu2 heeft een duidelijk hogere reflectie. Onbekend is echter in hoeverre er verschil is in de focussing van de teruggekaatste bundel. Het is enerzijds mogelijk dat het uitgangsmateriaal beter op te spannen is in de spectrofotometer. Anderzijds is het mogelijk dat het uitgangsmateriaal van Alu in hogere mate diffuus reflecteert.

Het uitgangsmateriaal van de beide aluminium doeken is ook gemeten met de emissiemeter. Het uitgangsmateriaal van Alu 2 is daarmee op 0.11 vastgesteld en het uitgangsmateriaal van Alu 1 op 0.22. Dat bevestigt het door WUR gemeten verschil, maar niet volledig.

In theorie is het mogelijk dat het materiaal van eigenschappen verandert tijdens het verwerken van het uitgangsmateriaal tot een schermdoek. Het materiaal moet tot bandjes gesneden worden en het doek moet geweven worden. Bij deze bewerkingen zou de dunne laag die het aluminium beschermt tegen corrosie beschadigd kunnen worden. Om dit te onderzoeken zijn bandjes uit het Alu 2 doek gehaald en deze zijn vergeleken met bandjes, geknipt van het uitgangsmateriaal van dit doek. Figuur 25 en figuur 26 zijn met de infraroodcamera gemaakt.



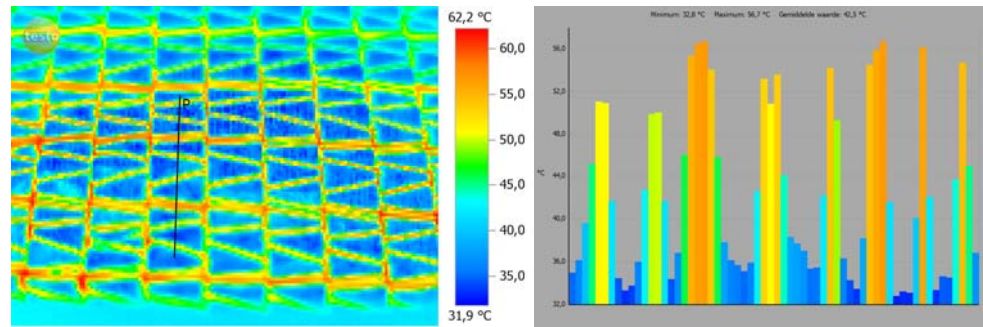
Figuur 26 Bandjes uit het doek Alu 2



Figuur 27 Bandjes van het uitgangsmateriaal van Alu 2

Over de bandjes is een temperatuurprofiel gemaakt, zichtbaar in de vorm van een zwart lijntje in de figuren. De gemiddelde temperatuur van het uitgangsmateriaal is 33.4 °C en van de bandjes uit het doek 39.7 °C. Omgerekend betekent dit een emissiecoëfficiënt van 0.15 voor het uitgangsmateriaal en 0.29 voor de bandjes uit het doek.

Om een beter beeld te krijgen van de samenstelling van het temperatuurbeeld is een close up genomen van het integrale doek Alu 2 (figuur 28).



Figuur 28 Close up Alu 2 op een warme plaat

In het midden van blauwe vlakjes is de gemeten temperatuur laag en verschilt niet veel van de temperaturen die bij het uitgangsmateriaal gemeten worden. Duidelijk is te zien dat de draadjes een veel hogere schijnbare temperatuur hebben, omdat deze een hoge emissiecoëfficiënt hebben. Te zien is ook dat de draadjes gereflecteerd worden door het aluminium. De invloed van de draadjes zoals gevonden met in de IR camera is groter dan aanvankelijk gedacht. De emissiecoëfficiënt wordt hierdoor dus hoger.

5.6 Analyse

Er zijn 4 verschillende schermdoeken van 2 leveranciers gemeten volgens de bestaande meetmethoden. Aanvullend zijn metingen gedaan volgens de tweeplaten methode en met de infraroodcamera. De spectrale metingen laten een groot verschil zien in de emissiecoëfficiënten van de verschillende doeken. Met de controlemetingen zijn deze verschillen niet te reproduceren. Wel scoort het doek Alu 2 consequent beter. De oorzaak kan enerzijds liggen in een verandering van de eigenschappen van uitgangsmateriaal het doek tijdens het productieproces en anderzijds in de geometrie van de schermen en het verwaarlozen van de bijdrage van de draadjes die het scherm bijhouden. De metingen bieden onvoldoende houvast om hierover een harde uitspraak te kunnen doen. Bij het meten van integraal schermdoek worden deze onzekerheden vermeden. De metingen volgens de tweeplaten methode bevestigen deze conclusie.

De transmissiemeting volgens de TNO methode geschied door twee metingen met verschillende achtergronden. Het nadeel hiervan is dat de meetfouten bij elkaar opgeteld kunnen worden. De transmissie bij de metingen van WUR zijn bepaald door de normale transmissie van de uitgangsmaterialen te meten in de spectrofotometer. Geometrie effecten worden hierin niet meegenomen. De transmissiemeting met behulp van de infraroodcamera blijkt een zeer eenvoudige meting met weinig onzekerheden, behalve het beperkte meetbereik van de camera.

Het bepalen van de emissiecoëfficiënt met behulp van de infraroodcamera biedt nieuwe inzichten en maakt het mogelijk om doeken onderling met elkaar te vergelijken. Het beperkte meetbereik van de camera en de onzekerheid over de temperatuur van het doek maken de bepaalde waarden onvoldoende nauwkeurig

6 Nieuwe opstelling

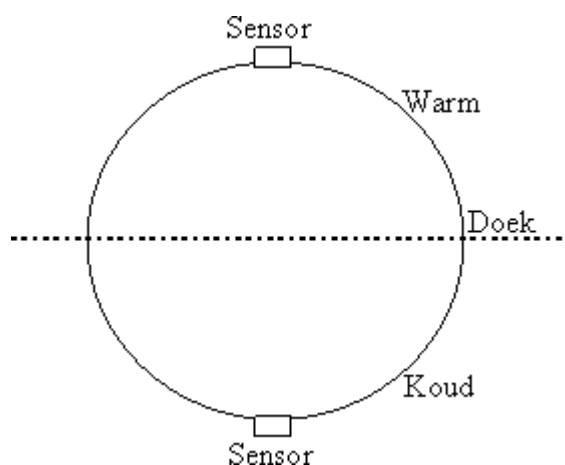
In de voorgaande hoofdstukken is beschreven dat de huidige meetmethoden van schermdoek beperkingen kennen, waardoor het hiermee niet mogelijk is om voldoende nauwkeurig de infrarood eigenschappen van schermdoek te kunnen bepalen. In dit hoofdstuk wordt een opstelling omschreven die de beperkingen niet kent. Met deze opstelling zijn dezelfde schermdoeken nog eens gemeten.

6.1 Meetprincipe

Uit de analyse van de metingen aan de schermdoeken is geconcludeerd dat de voorkeur uitgaat naar het meten van integraal doek, waarbij gezien de invloed van de textuur van het doek rechtstreeks de hemisfische emissie bepaald dient te worden. Tevens is vastgesteld dat het meten van de transmissie door afleiding uit twee metingen met verschillende achtergrond foutgevoelig is. De transmissie dient dus direct gemeten te worden en de meting met de infraroodcamera heeft laten zien dat dit goed mogelijk was.

Er wordt gezocht naar een eenvoudige en snelle meting van de eigenschappen van schermdoek. Het bepalen van de transmissie geschiedt eenvoudig door het aanbrengen van een warmtebron aan een zijde van het doek en door meten aan de andere zijde. Door aan de zijde van de bron te meten kan in dezelfde opstelling ook de reflectie gemeten worden.

Het meten met de infraroodcamera is vanwege de afmeting en bediening niet praktisch wanneer een reproduceerbare opstelling nodig is. Deze opstelling zou bovendien duurder worden dan nodig is. Bovendien is het meetbereik van de camera beperkt. De voorkeur gaat uit naar het calorisch meten met een dedicated sensor, dus het meten van de totale warmte-uitwisseling, maar dan zonder de traagheid van de AE emissiemeter.



Figuur 29 Meetopstelling voor het bepalen van de reflectiecoëfficiënt en de transmissiecoëfficiënt

Figuur 29 toont schematisch een opstelling waarmee in één keer de transmissie en de reflectie bepaald kunnen worden. De opstelling bestaat uit een warme stralingsholte en een koude stralingsholte met een hoge emissiecoëfficiënt. In beide holtes is een calorische infraroodsensor ingebouwd. De sensor bestaat uit een groot aantal thermokoppels die op een IC zijn geïntegreerd. Hiermee wordt de opwarming of afkoeling van kleine vlakjes ten opzichte van de sensor zelf gemeten. De reactiesnelheid van de sensor is kleiner dan 0.1s. De sensoren geven als output een temperatuur, waarbij de emissiecoëfficiënt op 1 is ingesteld. De sensor geeft daarnaast de temperatuur van de sensor zelf. Tussen de twee sensoren bevindt zich het schermdoek. Een uitgebreidere beschrijving van de opstelling is opgenomen in bijlage B.

Transmissiecoëfficiënt

Voor het bepalen van de transmissie worden twee metingen met elkaar vergeleken. Er worden twee metingen met elkaar vergeleken: een meting met een koude achtergrond (omgevingstemperatuur en met een warme achtergrond. In formules

$$T_{\text{gemeten.koud}}^4 = \tau_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4 + \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \rho_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4$$

En

$$T_{\text{gemeten.warm}}^4 = \tau_{\text{doek}} \cdot T_{\text{warm}}^4 + \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \rho_{\text{doek}} \cdot T_{\text{omgeving}}^4$$

De gereflecteerde straling van de koude holte met T_{omgeving} en de emissie van het doek zelf blijft gelijk. Door de eerste vergelijking van de tweede af te trekken vallen de laatste twee termen weg, onder de aanname dat de temperatuur van het doek gelijk blijft. Wat overblijft, kan herschreven worden als:

$$\tau_{\text{doek}} = \frac{T_{\text{gemeten.warm}}^4 - T_{\text{gemeten.koud}}^4}{T_{\text{warm}}^4 - T_{\text{omgeving}}^4}$$

Bij de metingen geldt bovendien dat $T_{\text{gemeten-koud}}$ en T_{omgeving} gelijk zijn.

Reflectiecoëfficiënt

Voor de het bepalen van de reflectie worden eveneens twee metingen gedaan. Er wordt een meting gedaan met een koude bron en een meting met een warme bron. De metingen zijn te omschrijven als.

$$T_{\text{gemeten.koud}}^4 = \rho_{\text{doek}} \cdot \varepsilon_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron.koud}}^4 + \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \tau_{\text{doek}} \cdot T_{\text{achtergrond}}^4$$

en

$$T_{\text{gemeten.warm}}^4 = \rho_{\text{doek}} \cdot \varepsilon_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron.warm}}^4 + \varepsilon_{\text{doek}} \cdot T_{\text{doek}}^4 + \tau_{\text{doek}} \cdot T_{\text{achtergrond}}^4$$

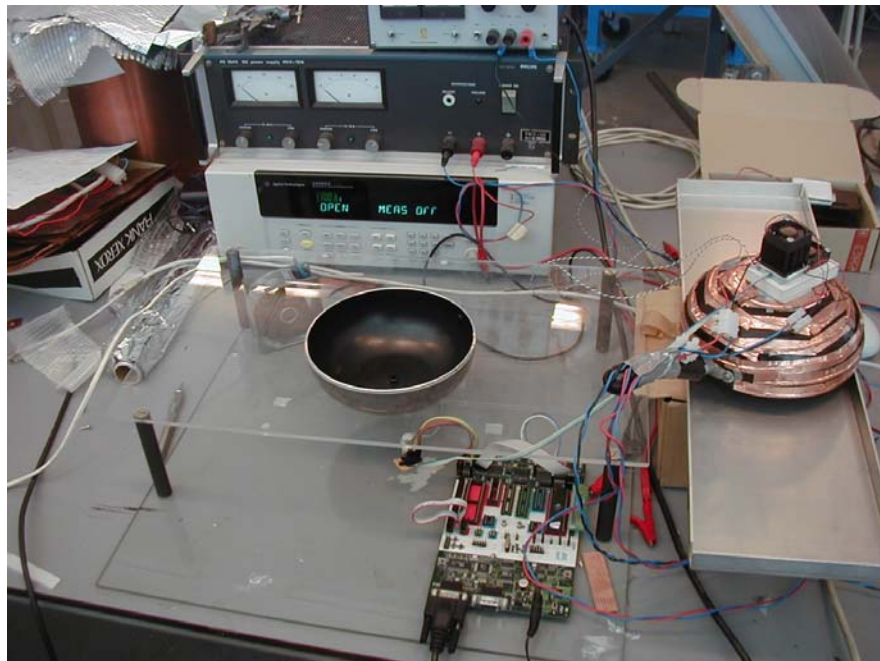
Door de eerste vergelijking vallen de laatste twee termen weg, wederom onder de aanname dat de temperatuur van het doek gelijk blijft. De vergelijking kan dan herschreven worden als

$$\rho_{\text{doek}} = \frac{T_{\text{gemeten.warm}}^4 - T_{\text{gemeten.koud}}^4}{\varepsilon_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron.warm}}^4 - \varepsilon_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron.koud}}^4}$$

$\varepsilon_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron.koud}}^4$ en $\varepsilon_{\text{bron}} \cdot T_{\text{bron.warm}}^4$ kunnen bepaald worden door te meten zonder schermdoek tussen de holtes. De onderste sensor leest deze termen dan rechtstreeks af.

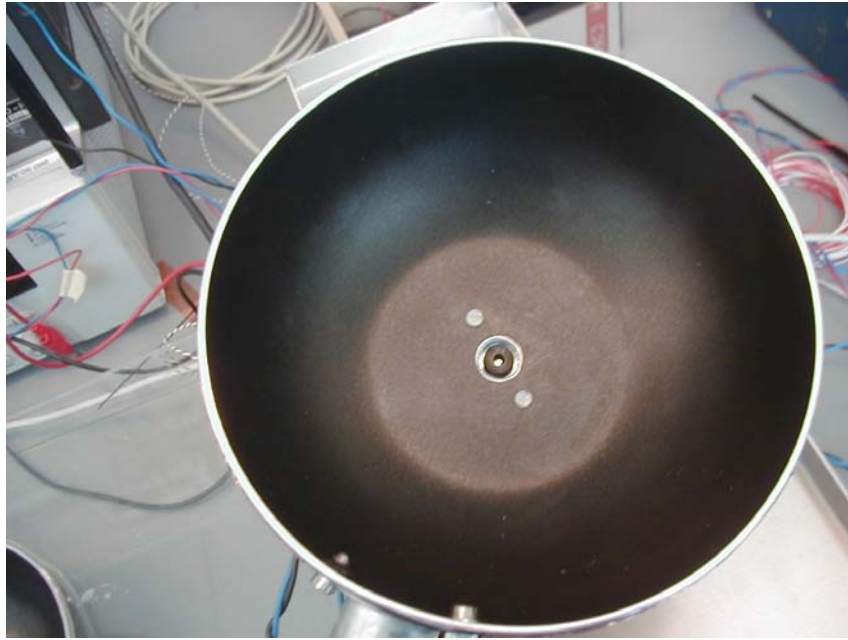
6.2 Uitvoering

Er is een labopstelling gebouwd om volgens het hierboven beschreven principe te kunnen meten, getoond in figuur 30.

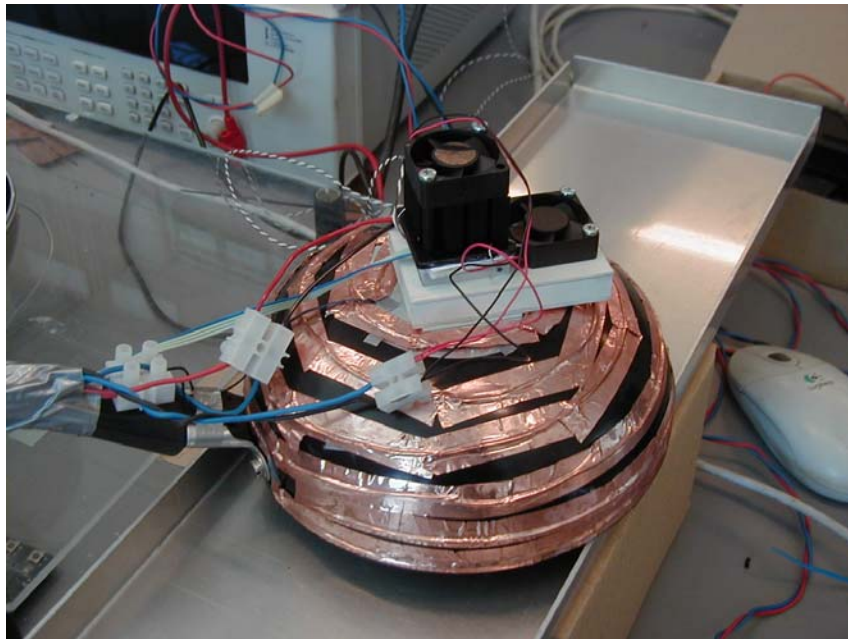


Figuur 30 labopstelling voor het meten van de infrarood eigenschappen

Centraal staat de niet verwarmde holte en rechts de verwarmde holte. Op de voorgrond het ontwikkelbord voor de elektronica. Op de achtergrond een datalogger voor controle metingen van de temperatuur en daarboven enkele labvoedingen voor de ventilatoren, Peltier element en stookdraad.

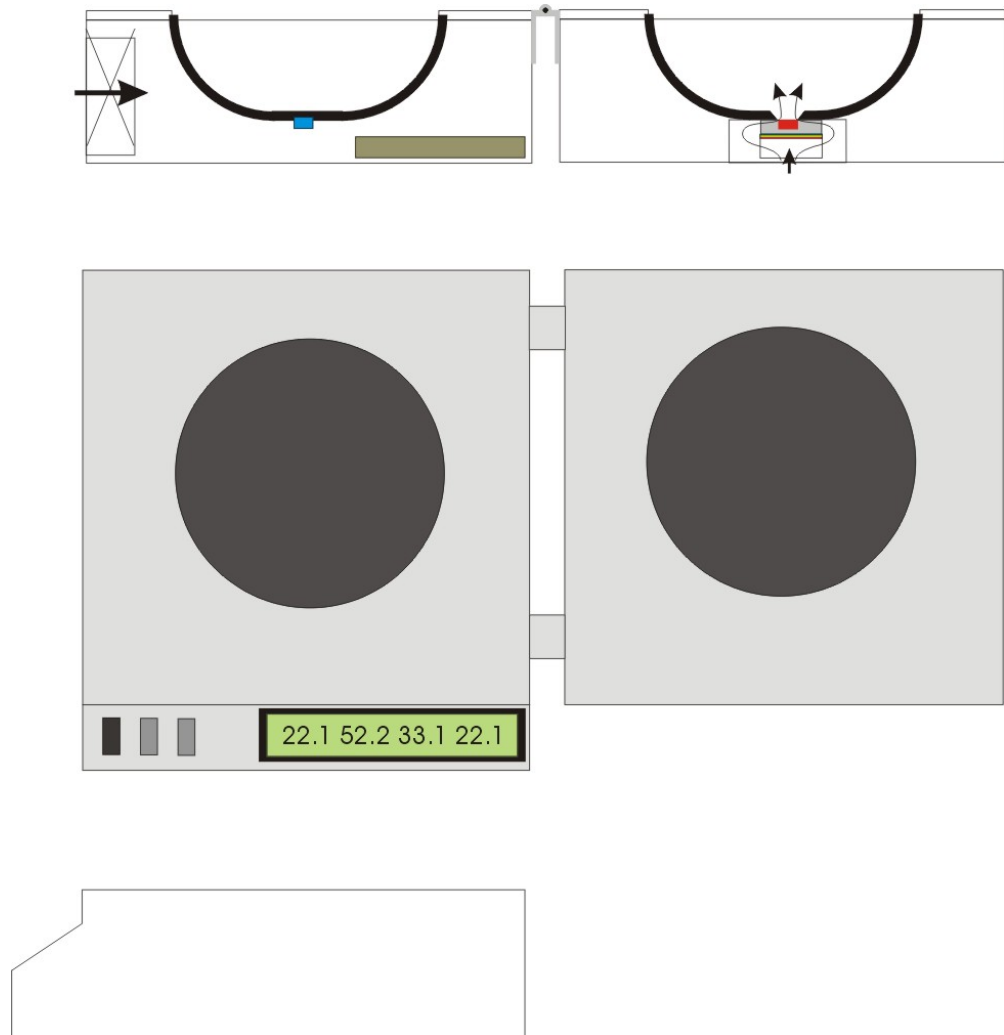


Figuur 31 De binnenzijde van de verwarmde stralingsholte



Figuur 32

In figuur 31 is de binnenzijde van de warme stralingsholte te zien met in het midden de sensor. Figuur 32 toont de buitenzijde. Bovenop de holte is een peltierkoeler bevestigd die de sensor koelt. Er is een ventilator die de warme zijde van het peltierelement koelt en een ventilator die omgevingslucht door de stralingsholte blaast om de ophoping van warme lucht onder de holte te voorkomen. Deze warme lucht zou immers door convectie het doek verwarmen en de meting hiermee extra beïnvloeden.

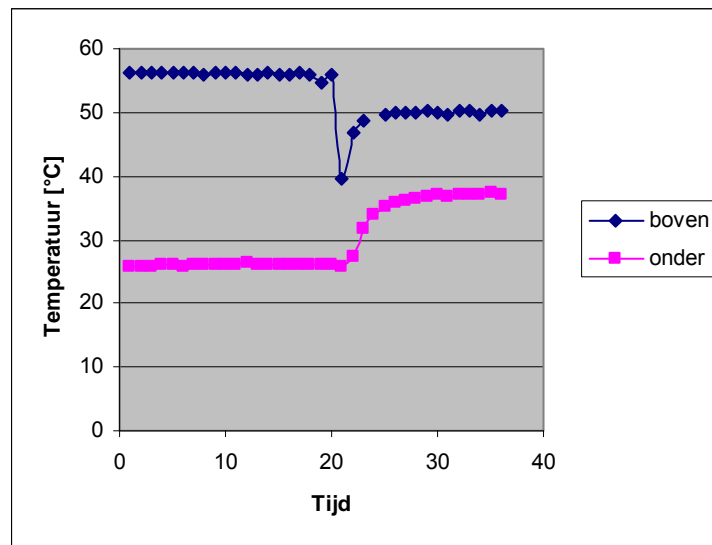


Figuur 33 Voorbeeld van een meetapparaat voor de infrarood eigenschappen van schermdoek

Op basis van de labopstelling kan relatief eenvoudig en goedkoop een meetapparaat ontwikkeld worden voor gebruik door diverse partijen. Figuur 33 toont een voorbeeld met rechts de warme bron en links de kamertemperatuurbron. Het materiaal wordt er tussen geplaatst en het instrument dichtgeklapt. Een display kan de gemeten temperaturen aangeven. Een uitgebreidere omschrijving van een dergelijk apparaat is opgenomen in bijlage B.

6.3 Meetresultaten

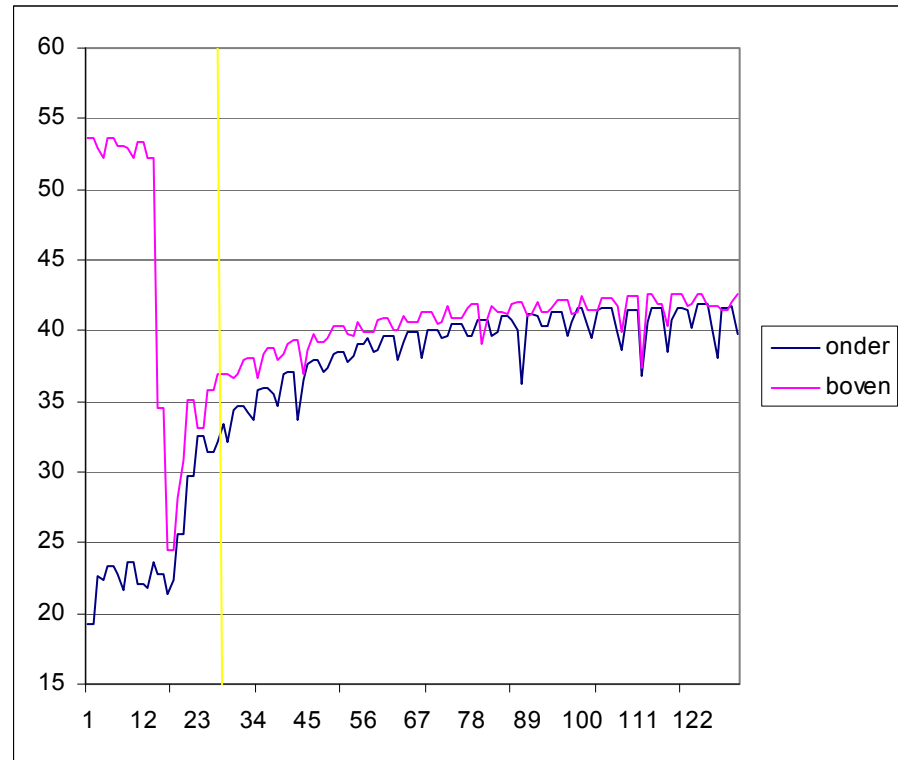
Met de in dit hoofdstuk beschreven opstelling zijn de schermdoeken opnieuw gemeten. Een voorbeeld van de meetwaarden van de sensoren is weergegeven in figuur 34



Figuur 34 Meetwaarden voor Alu 2

De figuur laat de meetwaarden uitgezet tegen de tijd zien. Tussen twee meetpunten zit 200ms. In de uitgangssituatie staat de bovenste stralingsholte niet over de onderste, maar ernaast op een stuk aluminiumfolie. De gemeten temperatuur wordt dus hoofdzakelijk bepaald door de reflectie van de warme holte. Op de koude stralingsholte ligt een stuk schermdoek. De warme bron wordt vervolgens op het doek gezet, boven de koude bron. De temperatuur wordt tijdens de beweging ook gemeten. Het diepste punt op de blauwe lijn is tijdens de beweging gemeten en dit punt dient daarom buiten beschouwing gelaten te worden. Te zien is dat de gemeten temperaturen snel oplopen. Het doek warmt dus erg snel op. De meting kan volgens de formules in 6.1 worden omgerekend in een transmissiecoëfficiënt en een reflectiecoëfficiënt onder voorwaarde dat het doek op omgevingstemperatuur is. Dit is alleen het geval direct nadat de warme bron op het doek is geplaatst. De berekende transmissiecoëfficiënt is 0.022 en de reflectiecoëfficiënt is 0.643. Hieruit volgt dat de emissiecoëfficiënt is $1 - 0.022 - 0.643 = 0.335$.

In figuur 35 zijn de meetresultaten voor het scherm energie 2 weergegeven, waarbij de tijd tussen verschillende meetwaarden is teruggebracht.

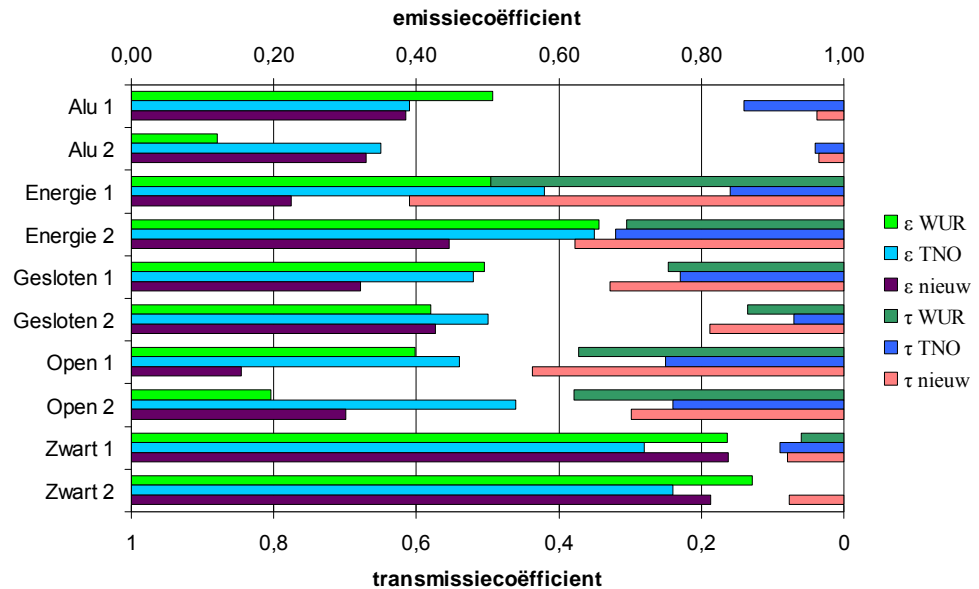


Figuur 35 Meetresultaten Energie 2

De gele lijn is het moment waarop de opstelling volledig gesloten is. Te zien is dat de snelle uitlezing voor storing in de gevonden waarden zorgt. Het moment van uitlezen is echter nauwkeuriger te bepalen. Hiertoe is een schakelaar bevestigd aan de warme holte die schakelt als deze op de koude holte wordt neergezet. De berekende transmissiecoëfficiënt is 0.377 en de reflectiecoëfficiënt is 0.177. De emissiecoëfficiënt is daardoor 0.446. De transmissie en reflectie zijn hoger dan met de bestaande meetmethoden werd gemeten. De emissie is lager.

De reflectie en emissie zijn te goed te controleren met bijvoorbeeld aluminiumfolie, waarvan de transmissie nul is. Om de transmissie te kunnen controleren is een referentiemeting uitgevoerd met EFTE folie dat eerder is gemeten met de spectrofotometer. Hiermee is een transmissiecoëfficiënt van 0.24 bepaald. Hetzelfde folie is gemeten met de nieuwe opstelling. Hiermee is in twee metingen eveneens een gemiddelde transmissie van 0.24 bepaald. Het verschil tussen de twee metingen bedroeg echter 0.04, hetgeen aangeeft dat de reproduceerbaarheid van de opstelling verbeterd moet worden.

In figuur 36 zijn de resultaten van zowel de nieuwe metingen als de metingen volgens de bestaande methoden voor alle doeken opgenomen.



Figuur 36 meetresultaten van de oude methoden en de nieuwe opstelling

Alle metingen zijn tweemaal uitgevoerd. Het gemiddelde van de twee metingen is in de figuur weergegeven. Het gemiddelde verschil in de emissiecoëfficiënt tussen de twee meting van de doeken is 0.025. Het maximale verschil is 0.055. In H3.2 is vastgesteld dat een reproduceerbaarheid van 0.03 gewenst is. Voor de transmissiecoëfficiënt en de reflectiecoëfficiënt is het gemiddelde verschil tussen de twee metingen 0.013 respectievelijk 0.015. De gemiddelde reproduceerbaarheid is dus voldoende, maar de absolute reproduceerbaarheid niet. Het verschil tussen verschillende metingen zal teruggebracht moeten worden tot onder de 0.03. De reproduceerbaarheid kan verhoogd worden door de uitlezing van de sensor te verbeteren, maar vooral door een mechanische verbetering die ervoor zorgt dat de opstelling zeer snel gesloten kan worden, met registratie van het moment van sluiten. Hierdoor wordt opwarming van het doek tijdens de meting geminimaliseerd waardoor ook de meetfout in het resultaat wordt verkleind.

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit project zijn de eigenschappen van schermdoek voor tuinbouwkassen beschouwd. De infrarood eigenschappen zijn bepalend voor het energiebesparend potentieel van de schermdoeken.

De U-waarde berekening van de kas wordt gemaakt met behulp van de IDT methode, onderdeel U-waarde. De warmteweerstand van het doek en de luchtdoorlatendheid hebben volgens de huidige methode geen invloed op het resultaat. Het is aan te bevelen om de IDT methode op deze punten aan te passen. De warmteweerstand wordt dan een functie van het aantal lagen en de luchtdoorlatendheid kan worden gemeten met een relatief eenvoudige meetopstelling. Voor open doeken loont het niet om de luchtdoorlatendheid te meten omdat hiermee geen extra IDT punten te behalen zijn. Indien de luchtdoorlatendheid van een scherm niet gemeten is, wordt de maximale luchtdoorlatendheid gehanteerd.

Voor wat betreft de infrarood eigenschappen hebben de emissiecoëfficiënt van de buitenzijde en de transmissiecoëfficiënt de grootste invloed op het te behalen aantal punten. Gezien de financiële gevolgen voor de tuinders is het verder aan te bevelen om de IDT methode enerzijds met praktijkonderzoek te verifiëren en anderzijds te vergelijken met overige programmatuur, vooral KASPRO. Dit geldt ook voor de gevolgen van condensvorming op het doek.

De bestaande meetmethoden zijn geëvalueerd en er zijn 8 schermdoeken van 2 verschillende leveranciers doorgemeten. Met behulp van eenvoudige opstellingen met een infraroodcamera en metingen volgens de tweelaten methode zijn de metingen gecontroleerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de bestaande meetmethoden belangrijke nadelen hebben. De met de emissiemeter bepaalde transmissie is indirect berekend en daardoor te weinig betrouwbaar. Bovendien wordt door de traagheid van het instrument het doek opgewarmd, wat vervolgens wordt aangezien voor een hogere emissie. De met de spectrofotometer bepaalde reflectie is een optelsom van de verschillende uitgangsmaterialen. Eventuele meetfouten worden dus ook opgeteld. Veranderingen in het uitgangsmateriaal bij fabricage van het doek en textuurafhankelijkheid worden niet meegenomen.

Om de eigenschappen van schermdoek te kunnen meten is een nieuwe opstelling ontworpen. Hiermee kan in één opstelling de transmissie en de reflectie gemeten worden. De resultaten hiervan bieden genoeg houvast om tot een uitgewerkt apparaat te komen. Er zijn nog een aantal verbeteringen nodig om tot een grotere nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid te komen.

Voor de labopstelling is een meetprotocol opgesteld. SMK kan meting volgens dit protocol voorschrijven voor gebruik in de IDT methode. Bij het meetprotocol behoren ook afspraken gemaakt te worden over wie de metingen kan uitvoeren. Het voorstel is bovendien om de eigenschappen van de gemeten doeken op een website te verzamelen zodat het voor de gebruikers eenvoudiger wordt om de juiste data te vinden en bovendien de kans op fouten wordt verkleind. Er kan een koppeling gemaakt worden waardoor de gegevens automatisch van de website gehaald worden. Het voordeel daarvan is, is dat de gegevens altijd up-to-date zijn en de kans op fouten kleiner wordt.

8 Referenties

- [1] IDT methode, onderdeel U-waarde, 2004
- [2] Oldegarm, Janssen, Bepaling U-waarde Kassen, TNO rapport 1999-CON-LBC/R7021
- [3] Miguel A A F. Transport phenomena through porous screens and openings : from theory to greenhouse practice. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, 1998
- [4] A.F. Mills, Basic heat and mass transfer. Second edition, University of California, Los Angeles, Prentice Hall, 1999.
- [5] De Zwart H F. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands 1996
- [6] Devices and Services, Emissivity measurements for in-place surfaces and for materials with low thermal conductivity, Technical Note 79-19, 1979
- [7] Devices and Services, Use of Emissometer for Semi-Transparent Materials Modifications, Technical Note 79-19, 1981
- [8] NEN2697, Berekeningsmethode voor de warmtedoorgangscoefficiënt van enkel-en isolerend dubbelglas voor toepassing in de glastuinbouw.
- [9] NEN-EN673, Glas voor gebouwen - Bepaling van de warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde) - Berekeningsmethode

A Concept Meetprotocol

Het instrument wordt ingeschakeld waarbij de microcontroller standaard de temperaturen van de sensoren op het scherm weergeeft.

De meting kan pas worden verricht nadat de warme stralingsholte op voldoende hoge temperatuur is gebracht ten opzichte van de omgeving en stabiel is. Dit kost bij een niet geregeld stookelement circa 15 minuten. De gebruikte temperatuur voor de proefmetingen liggen op circa 55°C, minimaal zo'n 30°C boven de omgevingstemperatuur.

De warme stralingsholte is in rust geplaatst boven een glanzend aluminium oppervlak. De laboratorium metingen zijn uitgevoerd met een aluminium plaat bekleed met huishoudfolie zodat het oppervlak ververst kan worden. Hierbij is het van belang dat er enige beluchting is om de warme lucht van de ventilator af te voeren. Het doel van de aluminium plaat is enerzijds om de warmte af te voeren naar de omgeving anderzijds om door stralingsuitwisseling een zo egaal mogelijk temperatuurverdeling te bewerkstelligen in de stralingsholte zelf.

De stralingstemperatuur van de warme holte gemeten door de bovenste sensor wordt berekend met behulp van aluminiumfolie als referentiemateriaal.

$$T_{\text{bron}} := \left(\frac{\rho_{\text{alu}} \cdot T_{\text{bron.koud}}^4 - T_{\text{gemeten.koud}}^4 + T_{\text{gemeten.alu}}^4}{\rho_{\text{alu}}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

De stralingstemperatuur T_{warm} van de warme holte gemeten door de onderste sensor wordt rechtstreeks gemeten door de warme holte op de koude te plaatsen zonder doek er tussen.

De stralingsholte op omgevingstemperatuur wordt vervolgens afgedekt met het door te meten schermdoek. Controle van het scherm geeft aan of het schermdoek dezelfde temperatuur heeft als de omgeving doordat ogenschijnlijk geen temperatuurverandering optreedt in de stralingsholte. Hiermee wordt $T_{\text{gemeten.koud}}$ bepaald

Vervolgens wordt de meting verricht door de warme stralingsbron te plaatsen boven de niet verwarmde stralingsbron. De temperaturen worden op het scherm weergegeven. In einduitvoering wordt het contactmoment geregistreerd zodat het beginpunt van de meting vast ligt. In de voorlopige toestand is steeds een scherm dump genomen van de metingen en deze grafisch uitgezet in Excel. Hieruit worden de begintemperaturen bepaald.

De transmissie wordt nu als volgt berekend:

$$\tau_{\text{doek}} := \frac{T_{\text{gemeten.onder.warm}}^4 - T_{\text{gemeten.koud}}^4}{T_{\text{warm}}^4 - T_{\text{bron.koud}}^4}$$

$T_{\text{gemeten.onder.warm}}$ is de temperatuur zoals gemeten met de onderste sensor met het doek tussen de warme en de koude holte. $T_{\text{bron.koud}}$ is de omgevingstemperatuur

De reflectie wordt berekend met de bovenste sensor en de volgende formule

$$\rho_{\text{doek}} := \frac{T_{\text{gemeten.boven.warm}}^4 - T_{\text{gemeten.koud}}^4}{T_{\text{bron}}^4 - T_{\text{bron.koud}}^4}$$

Hierin $T_{\text{bron.koud}}$ is de omgevingstemperatuur

B Meetopstelling

In het kader van dit project is een meetopstelling ontwikkeld en gebouwd. De gebouwde opstelling betreft een laboratorium opstelling. Om het voor verschillende partijen mogelijk te maken om de infrarood eigenschappen van schermdoek te kunnen bepalen kan op basis van de labopstelling een relatief goedkoop en gebruiksvriendelijk apparaat ontwikkeld worden. Deze bijlage beschrijft dit apparaat.

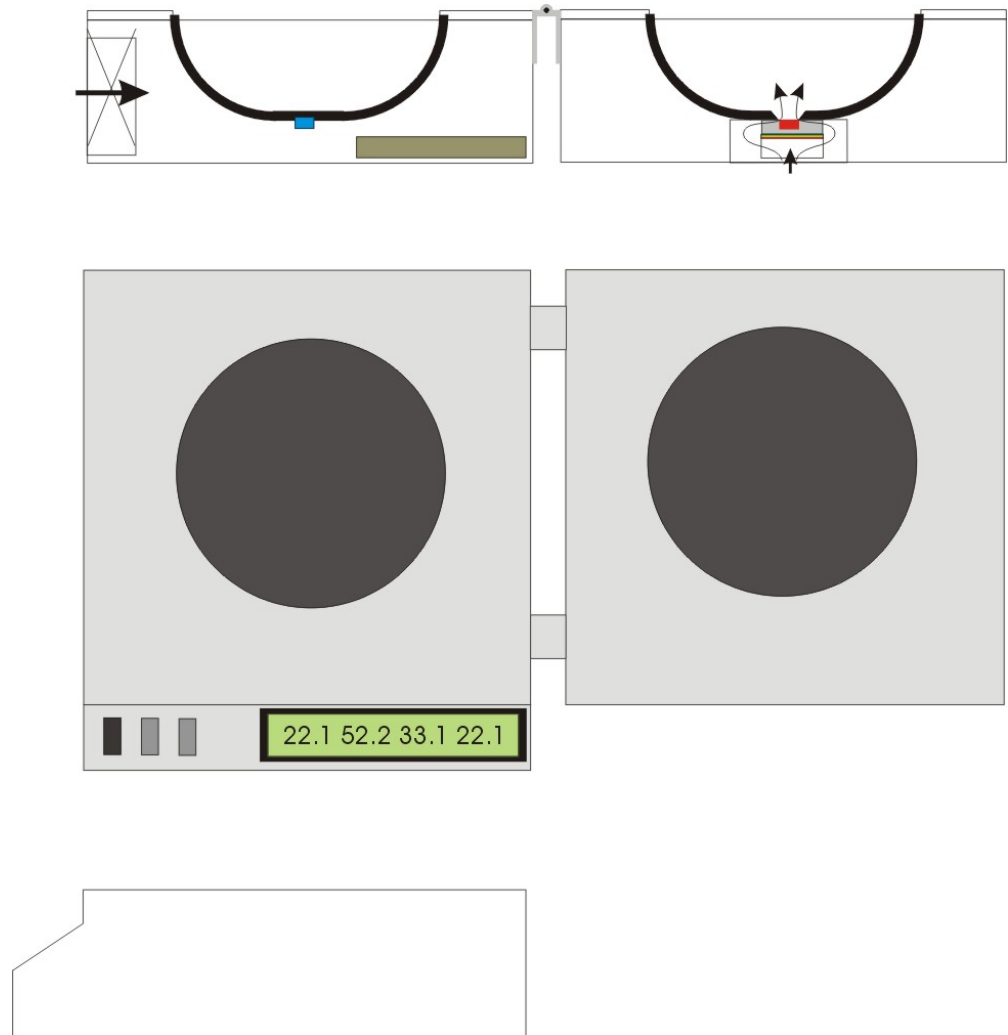
Meetprincipe

Het meetprincipe is gebaseerd op het contactloos meten van de temperatuur van objecten. Hiertoe is de sensor van Melexis geselecteerd als beste kandidaat. Deze sensor wordt geproduceerd met verschillende openingshoeken. De standaard exemplaren hebben een openingshoek van circa 90 graden. Deze openingshoek is deels bepalend voor de uiteindelijke omvang van het instrument aangezien de ruimtehoek en afstand tezamen de minimale benodigde meetdoorsnede van het monster bepalen. De stralingsholte krijgt daarmee een doorsnede van circa 15 cm en hoogte van circa 7,5cm. Gezien het feit dat de doeken zowel transparantie als reflectie vertonen is een gelijktijdige bepaling van zowel transmissie als reflectie gewenst. Dit betekent dat gewerkt dient te worden met 2 stralingsholten. Hierbij is er sprake van 1 warme en 1 op omgevingstemperatuur. De stralingsholten dienen uitsluitend om een constante en goed gedefinieerde omgeving te creëren voor het behalen van voldoende reproductiviteit. De stralingsholten dienen een zo hoog mogelijke diffuus stralingskarakter te kennen. Dit betekent praktisch dat ze voorzien dienen te zijn van een mat zwarte coating van schoolbordenverf.

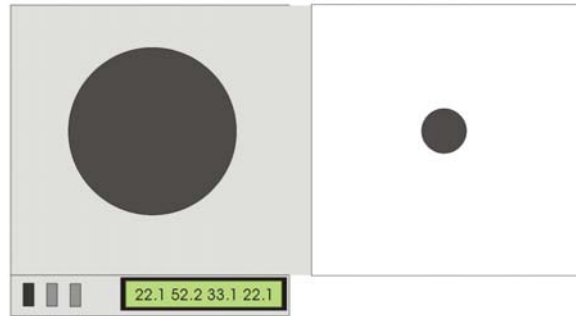
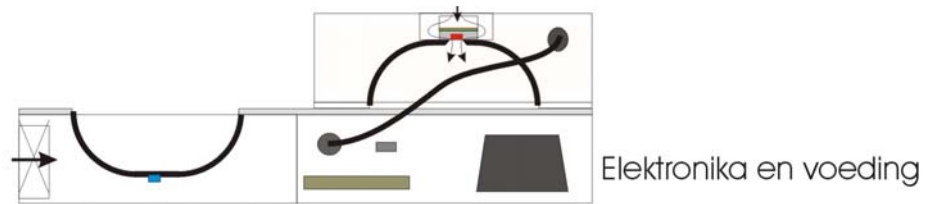
Bovenstaande uitgangspunten leiden tot een instrument opbouw bestaand uit een tweetal ruimteholten met ieder een sensor in de bodem waarop het schermdoek ter meting wordt geplaatst. Indien de warme stralingsholte wordt geplaatst boven de niet verwarmde zal de onderste sensor onmiddellijk de doorgelaten hoeveelheid straling meten.

De gemiddelde temperatuur van de warme stralingsholte wordt hetzij gemeten door de onderste sensor zonder aanwezigheid van het schermdoek, dan wel door het plaatsen van de warme stralingsholte boven zeer goed spiegelende aluminium ondergrond. In het laatste geval ziet de warme sensor zich gespiegeld in de folie.

Dit principe leidt tot de volgende uitvoeringsconcepten



Figuur 1: Klapopstelling met rechts de warme bron en links de kamertemperatuurbron. Het materiaal wordt er tussen geplaatst en het instrument dichtgeklapt. Een display kan de gemeten temperaturen aangeven.



Figuur 2: een eenvoudiger uitvoering waarbij de stralingsholte handmatig wordt verplaatst.



Figuur 3 : artist impression van een mogelijke uitvoering van figuur 2:

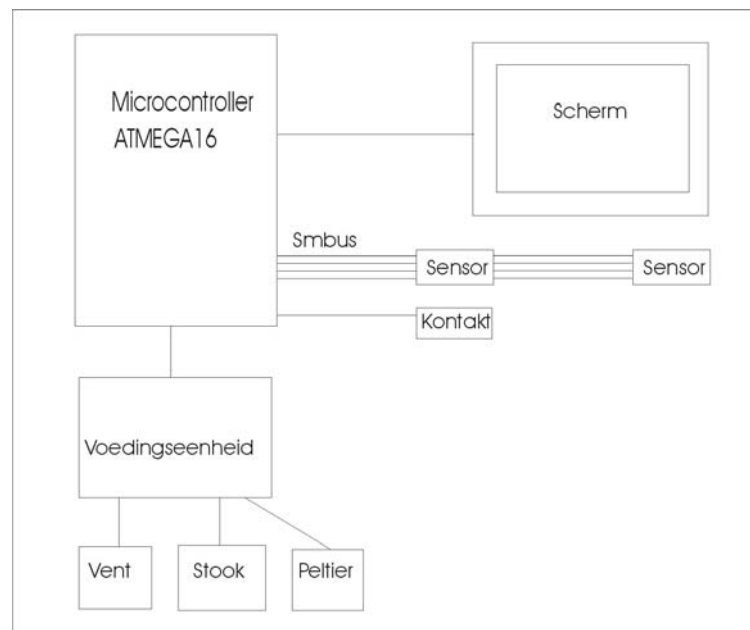
De praktische ontwikkeling van instrument is stapsgewijze gefaseerd uitgevoerd. Hierbij is de in figuur 2 geschetste variant aangehouden vanwege eenvoudiger opzet. De aanbeveling op basis van de resultaten is echter deze uit te voeren als figuur 1. De figuren 5 tot en met 7 geven een indruk van de laboratoriumuitvoering tijdens de

proefnemingen. Het uiteindelijk model maakt gebruik van sensoren met kleinere openingshoek. Idealiter dienen deze circa 60° te bedragen, echter deze zijn niet commercieel verkrijgbaar en dienen zelf vervaardigd te worden door het plaatsen van een correct gedimensioneerd diafragma over een sensor met een openingshoek van 90° .

De stralingsholten zijn vervaardigd uit aluminium. De warme stralingsholte is hierbij omwikkeld met een stookdraad. De voeding van deze stookdraad wordt geleverd door een laboratoriumvoeding, nodig is circa 40 W.

Aangezien een rechtstreeks contact tussen de sensor en de warme stralingsholte dient te worden voorkomen is de sensor geïsoleerd opgesteld. Tevens wordt deze sensor gekoeld. Daarnaast verzamelt zich in de stralingsholte warme lucht die het monster onnodig opwarmt. Daarom wordt deze holte met behulp van een ventilator gespoeld met omgevingslucht. De koeling van de sensor wordt gedaan met een Peltier element waarbij de sensor zelf op omgevingstemperatuur wordt gehouden. De warmte van het Peltier element wordt via een extra ventilator weggekoeld. Dit vergt dus zowel een voeding voor de ventilatoren (3W) als voor het Peltier element (20W).

De sensorhouder met koeling en Peltier element bestaat gefreesde elementen en het geheel is geschroefd aan de stralingsholte.



Figuur 4: schema regeleenheid.

Figuur 4 geeft een indruk van de regeleenheid. Voor de proefopzet is gebruik gemaakt van een PC voor de temperatuuruitlesing via een RS232 verbinding. In definitieve opzet dient de microcontroller tevens het vermogen geleverd aan het stookelement en het Peltierelement te regelen op basis van de gemeten sensortemperaturen. Het scherm kan dan worden vervangen door een LCD scherm. Het contact dient voor het detecteren van het sluiten van de twee helften, hiermee wordt het juiste moment van de start van de meting gewaarborgd.

Het programma voor de aansturing en uitlezing van de sensoren is geschreven in C. De controller heeft voldoende capaciteit voor extra taken en het berekenen van de emissie en transmissie op basis van de gemeten temperaturen.

C IDT methode onderdeel U-waarde

Hieronder is een gedeelte van de IDT methode, onderdeel U-waarde opgenomen. Het betreft het gedeelte waarin de U-waarde van de kas met scherm wordt berekend. Deze versie bevat reeds de invloed van de warmteweerstand van het doek. De berekening wordt gemaakt met behulp van het programma Mathcad.

13. BEREKENING U-waarde: kasdek met scherm

13.1 Berekening extra warmteverlies door spouwventilatie

$$\begin{aligned}
 d_{\text{spouwvlakscherm}} &:= 0.5(\text{MaxHoogte} - \text{MinHoogte}) & d_{\text{spouw}} &= 0.15\text{m} \\
 \text{Schermtype} &:= 2.00 & d_{\text{spouwvlakscherm}} &= 0.40\text{m} \\
 d_{\text{spo}} &:= \text{If}(\text{Schermtype} = 2, d_{\text{spouwvlakscherm}} \cdot d_{\text{spouw}}) & d_{\text{spo}} &= 0.40\text{m} \\
 \text{Schermleugte:} & & L_s &:= 0.5 \frac{\text{kap}}{\cos(\text{H})} & L_s &= 2.16\text{m} \\
 \text{Luchtvolumestroom per strekkende m:} & & V &:= d_{\text{spo}} \cdot v_{\text{spouw}} \cdot 1\text{-m} & V &= 0.02\text{m}^3 \cdot \frac{3.00}{\text{s}} - 1.00 \\
 \text{Luchtvolumestroom per m2 scherm:} & & Vm2 &:= \frac{V}{L_s \cdot 1\text{-m}} & Vm2 &= 0.01\text{m}^3 \cdot \frac{1.00}{\text{s}} \\
 \text{Spec.warmteverlies per m2:} & & C_{\text{vent}} &:= \rho_{\text{Lu}} \cdot c_{p,\text{Lu}} \cdot Vm2 & C_{\text{vent}} &= 11.72\text{kg} \cdot \text{K} \cdot \frac{1.00}{\text{s}} - 3.00
 \end{aligned}$$

a. Overnemen van Ingevoerde waarden voor het gekozen kasdek: $k_{\text{kasdektype}} = 1.00$

$$\epsilon_i := \epsilon_{\text{int},k_{\text{kasdektype}}} \quad \epsilon_i = 0.84 \qquad \epsilon_e := \epsilon_{\text{ext},k_{\text{kasdektype}}} \quad \epsilon_e = 0.84$$

b. Overnemen berekende warmteweerstand R_c : $R_c = R_{k_{\text{kasdektype}}} \quad R_c = 0.00\text{-m}^2 \frac{\text{K}}{\text{W}}$

Opmerking: door de R_c waarde over te nemen kan het scherm gecombineerd worden met elk type beglazing.

c. Bepaal de startwaarden met:

$$\alpha_e := 24 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad \alpha_i := 8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad \alpha_{\text{spo}} := 3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}$$

Definitie temperaturen:
 $T_e, T_h, \dots, T_1, \dots, T_2, \dots, T_3$ (spouw), \dots, T_4 (scherm), \dots, T_i, T_g

Vind de startwaarden voor de vier onbekenden:

T_{i0} = oppervlakte temperatuur glas binnenzijde
 T_{e0} = oppervlakte temperatuur glas buitenzijde
 T_{sp} = luchttemperatuur in de luchtspouw
 T_{sch1} = temperatuur van het scherm gewas kant
 T_{sch2} = temperatuur van het scherm spouwzijde

N.B.:
 Aangenomen wordt dat het scherm geen extra warmteweerstand heeft. De oppervlakte temperatuur is dan aan beide zijden dezelfde.

First guess: $T_1 := T_e \quad T_2 := T_e \quad T_3 := T_i \quad T_4 := T_i$

Given

$$\alpha_i (T_1 - T_4) = \alpha_{\text{spo}} (T_4 - T_3) \qquad \alpha_{\text{spo}} (T_3 - T_2) = \alpha_{\text{spo}} (T_4 - T_3)$$

$$\alpha_{\text{spo}} (T_3 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R_c} \qquad \alpha_e (T_1 - T_e) = \frac{T_1 - T_2}{R_c}$$

$$\begin{pmatrix} T_{i0} \\ T_{e0} \\ T_{sp} \\ T_{sch} \end{pmatrix} := \text{Find}(T_1, T_2, T_3, T_4)$$

De startwaarden zijn: $T_{eo} = 4.50\text{ K}$ $T_{lo} = 4.55\text{ K}$ $T_{sp} = 8.92\text{ K}$ $T_{sch} = 13.34\text{ K}$ $T_{sch1} \rightarrow T_{sch}$ $T_{sch2} \rightarrow T_{sch}$

d. Bepaling convectiefactor binnen en spouw:

Tussen scherm en binnenlucht: $C_{ic} := 3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C^3}$ $C_{ic} = 3.00\text{ m}^{-2.00} \cdot \text{K}^{-1.33} \cdot W$

α tussen scherm en luchtpouw:

$$\alpha_{s1} := 2 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

NB hier is nog fine-tuning mogelijk! v. α afh. van spouwbreedte

α 's in de luchtpouw:

(ter vereenvoudiging worden de 2 α 's aan elkaar gelijkgesteld)

$$\alpha_s := \alpha_{s1} \quad \alpha_s = 2.00\text{ kg} \cdot \text{K}^{-1.00} \cdot \text{s}^{-3.00}$$

e. Bepaling stralingsfactoren binnen en in de spouw

l: Schermtype

Afhankelijk van keuze rotscherm of vlakscherm):

$$\text{loor} := \text{if}(l = 1, 1, \frac{1}{\cos(H)}) \quad \text{loor} = 1.08$$

$$\text{gscoor} := \text{if}(l = 2, 1, \frac{1}{\cos(H)}) \quad \text{gscoor} = 1.00$$

Tussen scherm en kas:

$$F_1 := \frac{\epsilon_g \cdot \epsilon_{\text{sidek}}}{(\epsilon_{\text{sidek}} \cdot \text{loor}) + \epsilon_g - \epsilon_g \cdot \epsilon_{\text{sidek}}}$$

$$F_1 = 0.79$$

Tussen scherm en glas:

$$F_{gs} := \frac{\epsilon_g \cdot \epsilon_{\text{sedek}}}{(\epsilon_{\text{sedek}} \cdot \text{gscoor}) + \epsilon_g - \epsilon_g \cdot \epsilon_{\text{sedek}}}$$

$$F_{gs} = 0.49$$

Tussen glas en kas via scherm:

$$F_{gk} := \frac{\epsilon_g \cdot \epsilon_l \cdot \text{laudek}}{\left(\frac{\epsilon_l}{\cos(H)}\right) + \epsilon_g - \epsilon_g \cdot \epsilon_l}$$

$$F_{gk} = 0.00$$

f. Bepaling convectiefactor buiten bij

$$C_{ec} := 5.3 + 3.6 \cdot v \frac{\text{s}}{\text{m}} \quad C_{ec} := C_{ec} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad C_{ec} = 19.70\text{ m}^{-2.00} \cdot \text{K}^{-1.00} \cdot W$$

g. Bepaling stralingsfactor buiten

$$ZF := \frac{\pi - 1.5 \cdot H}{\pi} \quad ZF = 0.82$$

$$F_e := \epsilon_e \cdot ZF \quad F_e = 0.68$$

h. Oplossing van de warmtebalans vergelijking

Given

$$R_{\text{scherm}} := R_c$$

Warmtebalans op knooppunt Tsch:

$$C_{ic} (T_i - T_{sch1})^{\frac{4}{3}} + F_1 \sigma [(T_g + T_{\text{ikel}})^4 - (T_{sch1} + T_{\text{ikel}})^4] = \frac{T_{sch1} - T_{sch2}}{R_{\text{scherm}}}$$

$$\frac{Tsch1 - Tsch2}{Rscherm} = \alpha_g (Tsch2 - Tsp) \dots + F_{gs} \sigma [(Tsch2 + Tikel)^4 - (Tlo + Tikel)^4]$$

Warmtebalans op knooppunt Tsp:

$$\alpha_g (Tsp - Tlo) = \alpha_g (Tsch2 - Tsp) + 1 \cdot C_{vent} (Tl - Tsp)$$

Warmtebalans op knooppunt Tlo:

$$\alpha_g (Tsp - Tlo) \dots + F_{gs} \sigma [(Tsch2 + Tikel)^4 - (Tlo + Tikel)^4] - 1 \cdot [F_{gl} \sigma [(Tg + Tikel)^4 - (Tlo + Tikel)^4]] = \frac{Tlo - Teo}{R_c}$$

Warmtebalans op knooppunt Teo:

$$C_{ec} (Teo - Te) + F_{e} \sigma [(Teo + Tikel)^4 - (Th + Tikel)^4] = \frac{Tlo - Teo}{R_c}$$

$$\begin{pmatrix} Tlo \\ Teo \\ Tsp \\ Tsch1 \\ Tsch2 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{Find}(Tlo, Teo, Tsp, Tsch1, Tsch2)$$

Hieruit volgen de onbekende oppervlakte temperaturen:

Teo = 4.87 K Tlo = 5.01 K Tsp = 13.44 K Tsch1 = 12.81 K Tsch2 = 12.74 K

I. Berekening warmtestroom en U-waarde:

$$q_g = \frac{Tlo - Teo}{R_c} \quad q_g = 36.02 \text{ m}^{-2} \cdot 2.00 \text{ W}$$

$$\frac{Tsch1 - Tsch2}{Rscherm} = 17.76 \text{ m}^{-2} \cdot 2.00 \text{ W}$$

De U-waarde volgt uit: $U_{ks} = \frac{q_g}{Tl - Te} \quad U_{ks} = 3.27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \quad \text{Schermtyp} = 2.00$

Is = Schermtyp Is = 2.00

$$\text{Output} = f(Is = 1 \vee Is = 2, U_{ks}, 0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}})$$

$$\text{Output} = 3.27 \text{ kg} \cdot \text{K}^{-1.00} \cdot \text{s}^{-3.00}$$

$U_{kasdek.met.scherm} = \text{Output}$

$$U_{kasdek.met.scherm} = 3.27 \text{ kg} \cdot \text{K}^{-1.00} \cdot \text{s}^{-3.00}$$

$$T_{kas} \Rightarrow \begin{cases} Tl & \text{if Schermtyp} = 3 \\ Tsp & \text{otherwise} \end{cases}$$

Einde berekening element 13