

prepared M. Coesel

---

title

## Thermisch model voor FLIR C5 IR camera en IR thermometer

### Samenvatting

Aanleiding voor dit rapport is de mogelijkheid om met behulp van FLIR Tools software de IR opname te bewerken. Je kunt details op de IR foto selecteren en vervolgens de minimum -, maximum - en gemiddelde temperaturen aflezen. Verder bestaat de mogelijkheid om de weergegeven temperaturen te corrigeren voor een emissiecoëfficiënt en reflectietemperatuur die afwijken van de camera-instellingen. Dit rapport beschrijft de achterliggende principes van deze FLIR Tools software.

We schetsen de volgende twee rekenmodellen van een IR camera/thermometer:

- Het model gebaseerd op de IR thermometer responsie volgens Sakuma en Hattori. De hier beschreven methode komt uit: MSL Technical Guide 22, van Peter Saunders van Measurement Standards Laboratory of New Zealand. Dit behandelen we in hoofdstuk 2, t/m 5.
- Een alternatief thermisch model gebaseerd op warmteoverdracht door straling met behulp van Gebhartfactoren beschrijven we in hoofdstuk 6 en 7.

We laten zien dat in vele gevallen de gemeten temperatuur niet gelijk is aan de werkelijke temperatuur, maar afhangt van de emissiecoëfficiënt van het object, de omgevingstemperatuur en de temperatuur van de camera/detector.

We beschrijven methoden en geven praktijkvoorbeelden, om de omgevingstemperatuur, de detector temperatuur en de emissiecoëfficiënt van het object te meten, bij voorkeur met dezelfde IR-thermometer. Daarmee kunnen we met behulp van één van de rekenmodellen de meetonzekerheid schatten, zodat we die later bij de correctie van de IR-thermometer aflezing kunnen "meenemen".

### Leeswijzer

De eerste 5 hoofdstukken volstaan om inzicht te krijgen in de verwerking van IR camera/thermometer data. Hoofdstukken 6 en 7, waarin we het alternatieve thermische model van de IR thermometer beschrijven, kan je beschouwen als een toegift voor de lezer die zich verder wil verdiepen in deze materie.

## Revision Record

issue	date	total pages	authorization	pages affected	brief description of change
1	14-03-2024	34		All	Nieuw document

## Inhoud

<b>1.</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Emissiecoëfficiënt</b> .....	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>Meetprincipe</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Problemen bij de uitlezing van de IR thermometer.</b> .....	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Verwerking van het gemeten signaal</b> .....	<b>11</b>
<b>3.3</b>	<b>Meetfouten</b> .....	<b>11</b>
<b>4.</b>	<b>Correctie IR-thermometer aflezing</b> .....	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Meting omgevingstemperatuur <math>T_{refl}</math>.</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2</b>	<b>Meting van de detectortemperatuur <math>T_d</math>.</b> .....	<b>13</b>
<b>4.3</b>	<b>Meting van de emissiecoëfficiënt <math>\epsilon_{obj}</math>.</b> .....	<b>14</b>
<b>4.4</b>	<b>Correctie IR-thermometer aflezing</b> .....	<b>14</b>
<b>4.5</b>	<b>Praktijktest</b> .....	<b>15</b>
<b>5.</b>	<b>Nadere beschouwing IR-thermometer responsie volgens Sakuma en Hattori ...</b>	<b>16</b>
<b>6.</b>	<b>De responsie via uitwisseling van IR straling beschreven door Gebhart factoren</b> .....	<b>17</b>
<b>6.1</b>	<b>Uitgangspunten</b> .....	<b>17</b>
<b>6.2</b>	<b>Rekenmodel</b> .....	<b>17</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Situatie</b> .....	<b>17</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Thermisch model</b> .....	<b>18</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Berekening van de Gebhartfactoren</b> .....	<b>20</b>
<b>6.3</b>	<b>Berekeningsresultaten</b> .....	<b>21</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Invloed van veranderingen in <math>T_1</math>, <math>\epsilon_2</math> en <math>\epsilon_3</math> op <math>T_2</math></b> .....	<b>21</b>
<b>7.</b>	<b>Toepassing Sakuma-Hattori vergelijking op het Gebhart-factor model.</b> .....	<b>25</b>
<b>8.</b>	<b>ANNEX A</b> .....	<b>30</b>

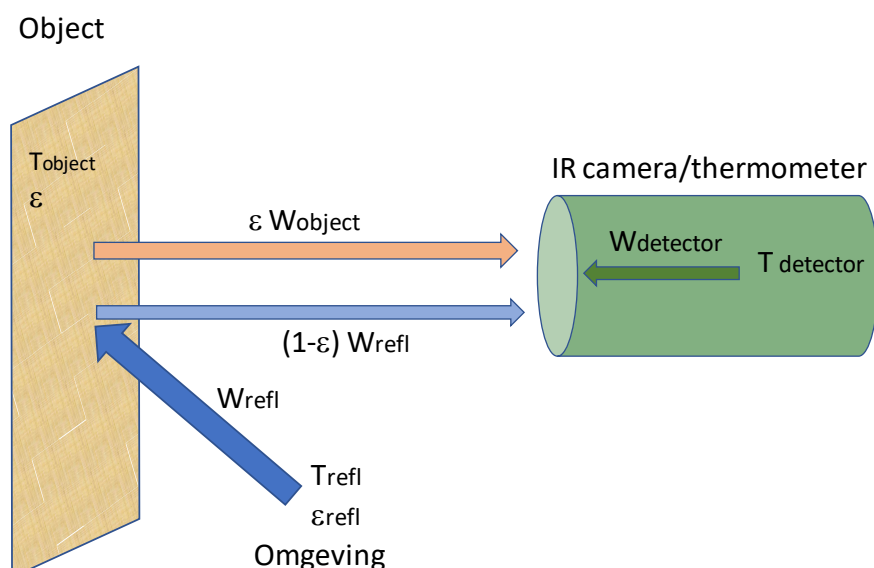
## 1. Referenties

RD 1	M. Coesel, Evaluatie IR camera en IR thermometer data, RC-TA-TN-002 issue 1
RD 2	c5-datasheet.pdf
RD 3	FLIR-tools-usermanual.pdf
RD 4	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Gebhart_factor">https://en.wikipedia.org/wiki/Gebhart_factor</a>
RD 5	MSL Technical Guide 22. <a href="https://www.measurement.govt.nz/download/28">https://www.measurement.govt.nz/download/28</a>
RD 6	F. Sakuma, S. Hattory. Study for Establishing a Practical Temperature Standard by Using Silicon Narrow-Band Radiation Thermometer. National Research Laboratory of Metrology, Niiharigun, Ibaraki, (1981).
RD 7	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Sakuma%E2%80%93Hattori_equation">https://en.wikipedia.org/wiki/Sakuma%E2%80%93Hattori_equation</a>
RD 8	P. Saunders, D.R. White, Interpolation errors for radiation thermometry. Metrologica 41 (2004) 41-46.
RD 9	<a href="https://www.flir.eu/support-center/Instruments/what-is-the-typical-spectral-response-for-certain-cameralens-combination/">https://www.flir.eu/support-center/Instruments/what-is-the-typical-spectral-response-for-certain-cameralens-combination/</a>
RD 10	ASTM E2847-21. Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers.
RD 11	M. Volmer, K P. Möllmann, Infrared Thermal Imaging, Second edition (2018), Wiley-VCH Verlag Weinheim, Germany.
RD 12	Thermal Coatings Seminar Series Training Part 1 : Properties of Thermal Coatings. Part 1 : Properties of Thermal Coatings. NASA GSFC Contamination and Coatings Branch. August 6, 2015.

## 2. Inleiding

FLIR Tools, de software waarmee je de FLIR waarnemingen kunt rapporteren, bevat een mogelijkheid om de IR opnamen te bewerken. Je kunt details op de IR foto selecteren en vervolgens de minimum, maximum en gemiddelde temperaturen aflezen. Verder bestaat de mogelijkheid om de weergegeven temperaturen te corrigeren voor een emissiecoëfficiënt en reflectietemperatuur die afwijken van de camera-instellingen. Over deze laatste mogelijkheid gaat dit rapport.

De IR-camera/thermometer meet de infrarode straling die door een object wordt uitgezonden. Zoals beschreven in de handleiding van FLIR Tools (RD 3), representeert de z.g. gereflecteerde temperatuur de invloed van de IR straling van de omgeving  $W_{refl}$  die wordt gereflecteerd door het object en opgevangen door de detector van de camera. Zie Figuur 1.



**Figuur 1** Schema thermografische meetopstelling. Object met temperatuur  $T_{object}$ , omgeving met temperatuur  $T_{refl}$  en camera/thermometer.

Betreffende de verwerking van het detectorsignaal tot de gemeten temperatuur volgen we twee methoden n.l.:

- De IR-thermometer responsie volgens Sakuma en Hattori.
- De responsie via uitwisseling van IR straling beschreven door Gebhart factoren.

De volgende twee IR-meetinstrumenten zijn het uitgangspunt voor dit rapport:

- Fluke 62 max IR-thermometer.
 

Temperatuurbereik	-30 °C tot 500 °C
Nauwkeurigheid	$\pm 1.5$ °C of $\pm 1.5\%$ van uitlezing, welke van beide het grootst is
	-10 °C tot 0 °C: $\pm 2.0$
	-30 °C tot -10 °C: $\pm 3.0$
Reactietijd (95%)	< 500 ms (95% van uitlezing)
Spectrale respons	8 tot 14 micron
Emissiviteit	0.10 tot 1.00
Optische resolutie	10:1 (openingshoek 6.4°)
Displayresolutie	0.1 °C
Reproduceerbaarheid van de uitlezingen.	$\pm 0.8\%$ van uitlezing of $< \pm 1.0$ °C, welke van beide het grootst is
Type of detector	Vermoedelijk thermopile.

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| FLIR C5 IR-camera        |   |
| Temperatuurbereik        | -20 °C tot 400 °C   |
| Thermal sensitivity NETD | <70 mK  |
| Nauwkeurigheid           | Bij een omgevingstemperatuur van 15 tot 35°C<br>0 °C tot 100 °C: ± 3.0°C<br>100 °C tot 400 °C: ± 3% |
| Spectrale responsie      | 8 tot 14 micron   |
| Emissiviteit             | 0.10 tot 1.00   |
| Openingshoek             | 54° x 42° (Fixed focus)   |
| Type of detector         | Focal plane array, uncooled microbolometer 160x120 pixels   |

## 2.1 Emissiecoëfficiënt

Zowel de IR-camera als de IR-thermometer heeft de mogelijkheid om de emissiecoëfficiënt van het te meten oppervlak in te stellen. Andere benamingen voor emissiecoëfficiënt zijn: Emissiviteit, emissiegraad, emittance, emissivity, emissiefactor.

De warmteflux of emittantie  $e_z$ , uitgezonden door een z.g. “zwart” oppervlak met temperatuur T Kelvin is:  $e_z = \sigma T^4$  [W/m<sup>2</sup>]. Dat is de straling die een oppervlak maximaal kan uitstralen behorende bij zijn temperatuur. T in Kelvin (K) = 273.15 + T in °C.

$\sigma$  = constante van Stephan Boltzmann = 5.67 E-8 W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>. Ideaalzwarte oppervlakken komen in de praktijk niet/nauwelijks voor.

De warmteflux uitgestraald door een echt oppervlak een z.g. “grijs” lichaam is:

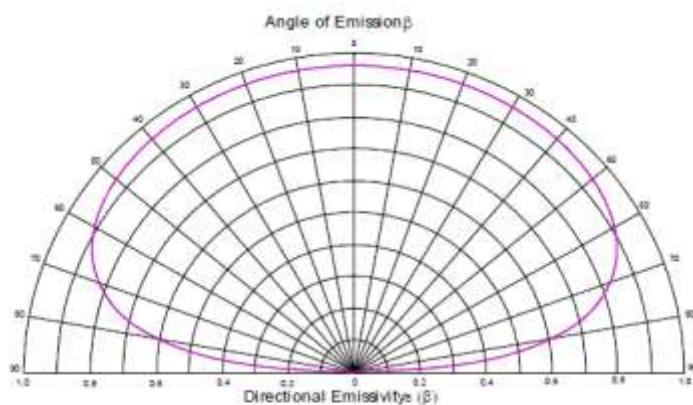
$e = \varepsilon \sigma T^4$ . Dat is de warmteflux in vergelijking met een zwarte straler.

$\varepsilon$  = emissiecoëfficiënt van het betreffende oppervlak.

De emissiecoëfficiënt is afhankelijk van de golflengte en richting van de uitgezonden straling, van de oppervlakte structuur en dikte en het type materiaal (elektrische geleider of isolator).

Bij onze toepassingen, het beoordelen van woningbouwconstructies, hebben we meestal te maken met en beperken we ons tot, elektrisch isolerende materialen.

Een voorbeeld van de richtingsafhankelijkheid van een geïdealiseerd materiaal staat in Figuur 2.



Directional emissivity curve for a dielectric  
with an index of refraction of  $n=1.5$

### Figuur 2 Richtingsafhankelijkheid emittantie van een elektrische isolator (geïdealiseerd) RD 12

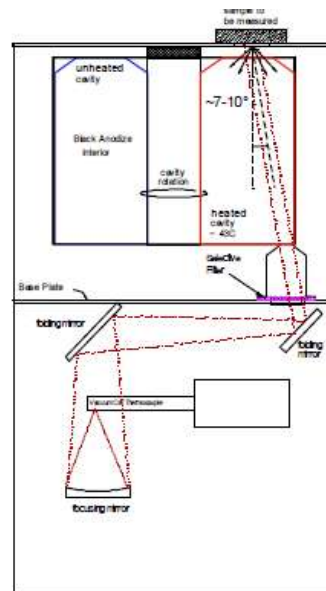
De total hemispherical emissiecoëfficiënt is de emissiecoëfficiënt gemiddeld over alle richtingen en golflengtes in het IR spectrum (~2 tot 40 μm). Deze duiden we aan met  $\varepsilon_h$ .

Kijken we ongeveer loodrecht op het oppervlak (hoek tussen 0 en 20°) dan spreken we van de normal emissiecoëfficiënt =  $\epsilon_n$ . Deze is van belang wanneer we met een IR camera of IR thermometer naar een oppervlak "kijken". Liefst bijna loodrecht op het oppervlak (bij loodrecht meet je namelijk ook het reflectiebeeld van de camera, hetgeen niet de bedoeling is).

De "n" wordt helaas vaak weggelaten in de literatuur. Dit is de waarde die je moet instellen op de camera of later bij de evaluatie van de opnamen moet ingeven in de FLIR-tools software (de instrumentele emissiecoëfficiënt).

Bij het opzoeken van de  $\epsilon_n$  data dien je te letten op het golflengtegebied van het IR spectrum.

Zo is de SFIR C5 camera ontworpen voor het golflengtegebied (LW) van 8 – 14  $\mu\text{m}$ . Dit geldt ook voor de IR thermometer van Fluke (62max). Sommige instrumenten voor het meten van de emissiecoëfficiënt hebben een meetbereik van 2.5 - 40 $\mu\text{m}$ , zoals b.v. de Gier-Dunkle DB 100 Figuur 3. Omrekenen van de emissiecoëfficiënt van het ene naar het andere golflengtegebied is alleen mogelijk als het volledige meetspectrum beschikbaar is.

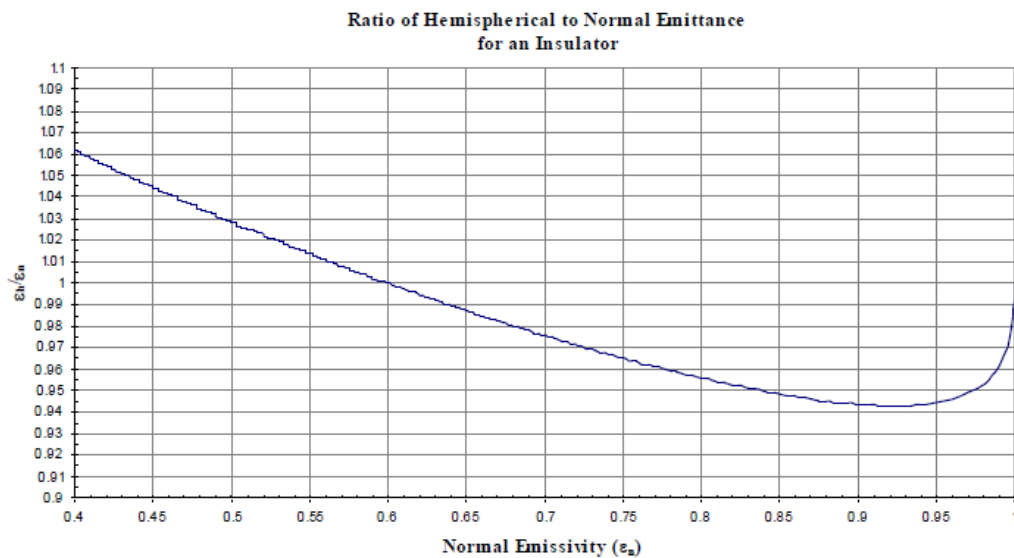


Illumination: Hemispherical  
 Detector: Directional ~7-10 deg  
 Detector type: CsI vacuum thermocouple  
 Detector Range: 5?-40 $\mu\text{m}$ ?  
 Accuracy:  $\pm 0.02$  sample must be gray  
 Measurement: Hemispherical-Directional Reflectance

**Figuur 3 Gier-Dunkle DB 100 voor meting  $\epsilon_n$ !**

Willen we de warmteflux van een oppervlak uitrekenen dan moeten we de hemispherical emissiecoëfficiënt  $\epsilon_h$  gebruiken.

Deze kun je, wanneer alleen  $\epsilon_n$  bekend is, bepalen uitgaande van  $\epsilon_n$  met behulp van de grafiek in Figuur 4.



**Figuur 4** Verhouding tussen  $\epsilon_h$  en  $\epsilon_n$ . Geïdealiseerd RD 12.

In Tabel 2-1 vinden we een aantal emissiecoëfficiënten ( $\epsilon_n$ ) geselecteerd uit RD3 voor de voor energiecoaches meest gangbare materialen. Metaaloppervlakken al of niet voorzien van een coating, zijn vanwege de grote onzekerheid van hun optische eigenschappen lastig te bemeten en sluiten we daarom uit. Tevens is de  $\epsilon_h$  opgenomen, omgerekend uit de  $\epsilon_n$  via Figuur 4.



Materiaal	$\epsilon_{\text{normal}}$ RD 3	Golflengte	Temperatuur (°C)	$\epsilon_{\text{H}} / \epsilon_{\text{N}}$ RD 12	$\epsilon_{\text{hemispherical}}$
T: ~Gier Dunkle DB100: 2.5 - 40 $\mu\text{m}$		LLW: 6.6 - 20 $\mu\text{m}$		LW: 8 - 14 $\mu\text{m}$	
		SW: 2 - 5 $\mu\text{m}$		FLIR en Fluke	
Baksteen rood	0.93	T	20	0.942	0.88
Behangpapier	0.85 - 0.90	SW	20	0.948 - 0.943	0.81 - 0.85
Beton	0.92	T	20	0.942	0.87
Beton ruw	0.97	SW	17	0.95	0.92
Email	0.9	T	20	0.943	0.85
Gips	0.8 - 0.9	T	20	0.955 - 0.943	0.76 - 0.85
Glas	0.97	LW	20	0.95	0.92
Hardboard	0.85	SW	20	0.948	0.81
Hout	0.8 - 0.9	T	20	0.955 - 0.943	0.76 - 0.85
Huid mens	0.98	T	32	0.951	0.93
Kalkpleister (stucwerk)	0.91	T	10 - 90	0.943	0.86
Kleding zwart	0.98	T	20	0.951	0.93
lak mat zwart	0.96 - 0.98	T	40 - 100	0.947 - 0.951	0.91 - 0.93
Lak wit	0.8 - 0.95	T	40 - 100	0.955 - 0.944	0.76 - 0.90
Leer	0.75 - 0.80	T		0.965 - 0.955	0.72 - 0.76
Papier dikte/kleur t.b.s.	0.68 - 0.94	T		0.98 - 0.943	0.67 - 0.89
Pleisterlaag	0.86 - 0.91		20	0.947 - 0.943	0.81 - 0.86
PVC vloerbedekking	0.93	LW	70	0.942	0.88
Spaanplaat	0.9	SW	20	0.943	0.85
Verf dikte/kleur t.b.s.	0.27 - 0.96	T			0.9
Vernis eiken parketvloer	0.90 - 0.93	LW	70	0.943 - 0.942	0.85 - 0.88
Water	0.96	T	20	0.946	0.91
Water ijs	0.96 - 0.98	T	-10	0.947 - 0.951	0.91 - 0.93
Water sneeuw	0.8	T		0.955	0.76
Zandsteen	0.935	LLW	19	0.943	0.88

**Tabel 2-1 Emissiecoëfficiënten**

Een onzekerheid van 0.05 in  $\epsilon_{\text{N}}$  geeft bij benadering een onzekerheid, afhankelijk van de temperatuurniveaus, van 0.2 tot 1 K in de gemeten temperatuur.

Worden deze metingen vervolgens gebruikt om de thermische weerstand (R-waarde) van de bouwconstructie te schatten, dan is de overeenkomstige bijdrage aan de onzekerheid in de geëvalueerde R-waarde ongeveer 10%.

### 3. Meetprincipe

Een uitgebreide beschrijving van de werking van IR thermometers staat in RD 5.

Hier volgt een samenvatting.

Alle voorwerpen zenden straling uit in de vorm van elektromagnetische golven. Voor objecten die zich op kamertemperatuur bevinden, bevindt bijna alle uitgezonden straling zich in het infrarode spectrum, d.w.z. bij golflengten in de buurt van 10  $\mu\text{m}$ .

Een IR-thermometer kan de temperatuur van een object bepalen aan de hand van de intensiteit van het signaal (elektrische stroom of spanning) gemeten aan de uitgang van de IR-stralingsdetector. Veel IR-thermometers zijn ontworpen voor een golflengtebereik van 8 – 14  $\mu\text{m}$ . Daarmee zijn temperaturen te meten tussen -50°C en 500°C.

Het signaal varieert op een niet-lineaire manier met de temperatuur. Een twee maal zo sterk signaal betekent niet dat de temperatuur twee maal zo hoog is.

De relatie tussen het detectorsignaal en de temperatuur is gegeven door de z.g. thermometer responsiefunctie (volgens Sakuma en Hattori, zie hoofdstuk 5) die bij goede benadering luidt:

$$S(T) = \frac{C}{e^{\left(\frac{C2}{AT+B}\right)} - 1} \quad (3-1)$$

A, B en C zijn constanten die bepaald worden door de eigenschappen van de IR-thermometer.  
 c2 is de tweede Planck constante = 14388  $\mu\text{m K}$ . Let op T is in Kelvin.  
 Is S(T) bekend, dan is de temperatuur te berekenen uit de inverse van (3-1), dat is:

$$T = \frac{C2}{A \ln(C/S+1)} - \frac{B}{A} \quad (3-2)$$

In hoofdstuk 5 gaan we hier nader op in.

### 3.1 Problemen bij de uitlezing van de IR thermometer.

- Emissiecoëfficiënt van het object.  
 De intensiteit W van de straling uitgezonden door een object met een temperatuur van T Kelvin en een emissiecoëfficiënt  $\varepsilon$  is:  $W = \varepsilon\sigma T^4$ .  
 $\sigma$  is de constante van Stephan-Boltzmann = 5.67 E-8 W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>.  
 T in Kelvin (K) = 273.15 + T in °C.  
 Is  $\varepsilon=1$ , dan spreken we van een “zwarte straler”, “black body”, “zwart lichaam”.  
 $\varepsilon$  is afhankelijk van de golflengte.  
 Voor een z.g. “grijze straler” is  $\varepsilon$  onafhankelijk van de golflengte. De aanname van grijze straler past men vaak toe.
- Instrumentele emissiecoëfficiënt.  
 Objecten met dezelfde temperatuur, maar met verschillende emissiecoëfficiënten zullen verschillende IR-thermometer aflezingen opleveren.  
 Om dit te voorkomen hebben sommige IR-thermometers de mogelijkheid om de emissiecoëfficiënt in te stellen op die van het te meten object. Dit noemt men de “instrumentele emissiecoëfficiënt”.  
 Andere thermometers zijn ingesteld op een vaste waarde (0.95 of 0.97), of hebben alleen een laag (0.75), middel (0.85) en hoog (0.95) instelbare waarde.
- Gereflecteerde straling  
 Een niet-transparant oppervlak met een emissiecoëfficiënt  $\varepsilon$  reflecteert infrarode straling.  
 De reflectie = 1- $\varepsilon$ .  
 Deze gereflecteerde straling, afkomstig van omringen objecten/omgeving, wordt opgevangen door de detector en opgeteld bij de straling die van het doelobject afkomt (zie Figuur 1).
- Detectorstraling  
 De detector zelf zendt ook straling uit. Het signaal aan de uitgang van de detector komt overeen met het verschil tussen de inkomende, inclusief gereflecteerde en de uitgaande straling die door de detector wordt uitgezonden. Blijkbaar gaat men (RD 5) ervan uit dat de detector een zwarte straler is.
- Formule voor het gemeten signaal  
 Brengen we de bovenstaande effecten in rekening, dan is het gemeten signaal S<sub>meas</sub>:

$$S_{meas} = \varepsilon_{obj}S(T_{obj}) + (1 - \varepsilon_{obj})S(T_{refl}) - S(T_d) \quad (3.1-1)$$

T<sub>obj</sub> = temperatuur van het te meten object.

$\varepsilon_{obj}$  = emissiecoëfficiënt van het object

T<sub>refl</sub> = temperatuur van de omgeving/omringende object.

T<sub>d</sub> = temperatuur van de detector.

Elk van de S(T) functies zijn te berekenen door de betreffende temperatuur (in K) in te vullen in de responsiefunctie 3.1.

### 3.2 Verwerking van het gemeten signaal

Als het gemeten signaal  $S_{meas}$  wordt vervangen door de signaal-naar-temperatuur conversievergelijking (3-2), zal het resultaat niet de objecttemperatuur  $T_{obj}$  opleveren vanwege de invloeden van  $\epsilon_{obj}$ ,  $T_{refl}$  en  $T_d$ .

Om een meting te produceren die de objecttemperatuur beter weergeeft, verwerkt de IR-thermometer het gemeten signaal voordat deze in een temperatuur wordt omgezet.

Om dit betrouwbaar te kunnen doen, moet de thermometer op de een of andere manier waarden verkrijgen voor de drie invloedsvariabelen  $\epsilon_{obj}$ ,  $T_{refl}$  en  $T_d$ .

De detectortemperatuur  $T_d$  meet het instrument zelf via een temperatuursensor rechtstreeks op de detector. Hieraan kan de gebruiker niets veranderen.

Voor IR-thermometers met een instelbare emissiecoëfficiënt, kan de gebruiker het instrument informeren over de beoogde emissie door deze in te stellen op het instrument.

Instrumenten met een vaste emissiecoëfficiënt zijn ontworpen voor specifieke toepassingen zoals voor voorwerpen van kunststof, steen, papier. Deze hebben een emissiecoëfficiënt van ongeveer 0.95.

De temperatuur  $T_{refl}$  van de omgeving zal van geval tot geval verschillen. De meeste fabrikanten gaan ervan uit dat  $T_{refl}$  ongeveer gelijk is aan de detectortemperatuur  $T_d$ .

Dit is zeker niet in alle omstandigheden het geval.

De IR-thermometer verwerkt het gemeten signaal als volgt:

Eerst wordt het gemeten signaal gedeeld door de instrumentele emissiecoëfficiënt  $\epsilon_{instr}$ ; vervolgens wordt een hoeveelheid toegevoegd die overeenkomt met het signaal bij de detectortemperatuur  $T_d$ ; tenslotte wordt het resulterende signaal omgezet in de gemeten temperatuurwaarde  $T_{meas}$ . Of in formulevorm:

$$S(T_{meas}) = \frac{S_{meas}}{\epsilon_{instr}} + S(T_d) \quad (3.2-1)$$

Waarom wordt S(Td) toegevoegd?

De reden daarvoor is dat het signaal  $S(T_{meas}) > 0$  moet zijn om de temperatuur via de inverse betrekking (3.2) te berekenen. Zie het onderstaande rekenvoorbeeld Tabel 3-1:

T object (°C)	Tdetector (°C)	S(Tobject)	S(Tdetector)	Smeas (3.1-1)	S(Tmeas) (3.2-1)
-30	20	0.0046	0.0117	-0.0070	0.0046
0	20	0.0084	0.0117	-0.0033	0.0084
30	20	0.0136	0.0117	0.0019	0.0136

Tabel 3-1 Voor  $\epsilon_{object}=1$  en  $\epsilon_{inst} = 1$ .

Verder is:

c2=	14387.8	microm K
C=	1	
Lam0=	11	microm
DeltaLam=	6	microm
A=	9.36	microm
B=	178	microm K

Als we het gemeten signaal bepalen via vergelijking 3.1-1, dan is voor object temperaturen  $< T_{detector}$  het gemeten signaal ( $S_{meas}$ ) negatief en daarmee is het niet mogelijk om de corresponderende temperatuur te berekenen. Als we echter het signaal verhogen met het signaal van de detector ( $S(T_{detector})$ ), dan resulteert dat in een positieve waarde van  $S(T_{meas})$ .

### 3.3 Meetfouten

We gaan ervan uit dat  $T_{refl}$ ,  $T_d$  en  $\epsilon_{obj}$  niet exact en slechts bij grove benadering bekend zijn.

Om de gevolgen van deze signaalbewerking te doorgronden, substitueren we  $S_{meas}$  van vergelijking (3.1-1) in vergelijking (3.2-1):

$$S(T_{meas}) = \frac{\varepsilon_{obj}S(T_{obj}) + (1 - \varepsilon_{obj})S(T_{refl}) - (1 - \varepsilon_{instr})S(T_d)}{\varepsilon_{instr}} \quad (3.3-1)$$

Dit kunnen we schrijven als de som van de volgende drie termen:

$$\left. \begin{aligned} S(T_{meas}) &= S(T_{obj}) \\ &+ \frac{(1 - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} \{S(T_{refl}) - S(T_d)\} \\ &+ \frac{(\varepsilon_{obj} - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} \{S(T_{obj}) - S(T_{refl})\} \end{aligned} \right\} \quad (3.3-2)$$

Indien de tweede en derde term van (3.3-2) nul zijn, dan zou  $T_{meas} = T_{obj}$ , ma.w. de gemeten temperatuur komt overeen met de temperatuur van het object.

Dat is het geval wanneer:

$T_{refl} = T_d$  en  $\varepsilon_{obj} = \varepsilon_{instr}$ , voor  $\varepsilon_{instr} < 1$

Als aan deze condities niet wordt voldaan, dan zal de aflezing van de thermometer onjuist zijn.

Is echter  $\varepsilon_{instr} = 1$  (en  $\varepsilon_{obj} = 1$ ) dan is de aflezing van de thermometer niet afhankelijk van  $T_{refl}$  noch van  $T_d$ .

Tot zover de samenvatting van RD 5. In het volgende hoofdstuk bespreken we de mogelijkheden om de aflezing van een IR-thermometer te corrigeren aan de hand van bekende en of gemeten  $T_{refl}$ ,  $T_d$  en  $\varepsilon_{obj}$ .

## 4. Correctie IR-thermometer aflezing

Eerst beantwoorden we de vraag: Hoe kun je de omgevingstemperatuur  $T_{refl}$ , de detector temperatuur  $T_d$  en de emissiecoëfficiënt van het object  $\varepsilon_{obj}$  meten, bij voorkeur met dezelfde IR-thermometer?

Daarbij is het belangrijk om de meetonzekerheid in te schatten, zodat we die later bij de correctie van de IR-thermometer aflezing kunnen "meenemen".

### 4.1 Meting omgevingstemperatuur $T_{refl}$ .

Neem een stuk gealuminiseerd Tonzon radiatorfolie en verkreukel het (met schone handschoenen aan) door er een prop van te maken. Haal de prop voorzichtig uit elkaar zodat er weer een enigszins vlak vel ontstaat. Bevestig dit gekreukelde vel m.b.v. dubbelzijdig klevend plakband op een stuk plastic of karton of hardboard. Zie Figuur 5.

Bedek hiermee het te meten object en meet de temperatuur van het gekreukelde vel. Stel de emissiecoëfficiënt op de IR-thermometer in op 1.0.

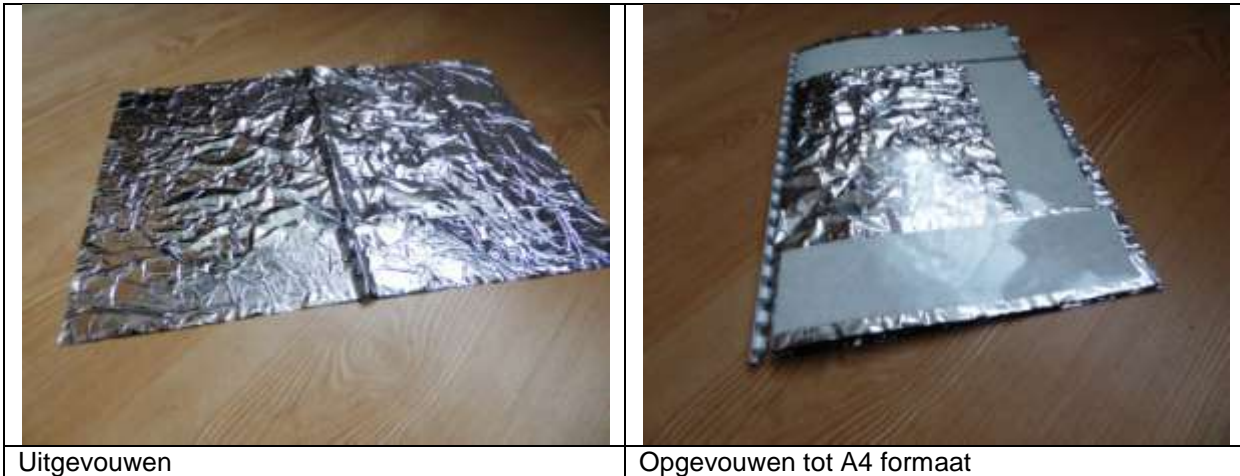
Door de kreukels is de folie bij benadering diffuus reflecterend. De emissiecoëfficiënt van de folie is die van aluminium en is 0.05 – 0.1.

Met deze waarden ingevuld in vergelijking (3.3-1) krijgen we:

$$S(T_{meas}) = 0.1 S(T_{folie}) + 0.9 S(T_{refl})$$

Dat wil zeggen: We meten voor >90% de temperatuur van de omgeving  $T_{refl}$ .

In de plaats van Tonzonfolie kun je ook aluminium keukenfolie nemen (RD 3).



Uitgevouwen

Opgevouwen tot A4 formaat

**Figuur 5 Scherm voor het meten van  $T_{refl}$ .**

## 4.2 Meting van de detectortemperatuur $T_d$ .

Het instrument zelf meet de temperatuur van de detector, maar deze wordt niet weergegeven op de uitlezing. In een aantal gevallen kun je aannemen dat de detectortemperatuur gelijk is aan de omgevingstemperatuur. Voorwaarde is dat de IR-thermometer voldoende tijd krijgt om de omgevingstemperatuur aan te nemen. Is dat niet het geval dan kan de detectortemperatuur afgeleid worden uit twee metingen aan hetzelfde object, mits de emissiecoëfficiënt instelbaar is op het instrument (RD 5). De temperatuur en emissiecoëfficiënt van het object en de reflectietemperatuur hoeven niet bekend te zijn. De detectortemperatuur kan berekend worden uit:

$$S(T_d) = \frac{\varepsilon_1 S(T_1) - \varepsilon_2 S(T_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad (4.2-1)$$

Waarbij:

$T_1$  = aflezing van de thermometer bij  $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_1$ .

$T_2$  = aflezing van de thermometer bij  $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_2$ .

Signaalwaarden  $S(T_1, T_2)$  te berekenen via (3-1) en de temperatuur  $T_d$  via (3-2).

Afleiding.

Uit (3.2-1) volgt:

$$S(T_1) = \frac{S_{meas}}{\varepsilon_1} + S(T_d) \quad \text{en}$$

$$S(T_2) = \frac{S_{meas}}{\varepsilon_2} + S(T_d)$$

Of na vermenigvuldigen met  $\varepsilon_1$ , respectievelijk  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_1 S(T_1) = S_{meas} + \varepsilon_1 S(T_d) \quad \text{en}$$

$$\varepsilon_2 S(T_2) = S_{meas} + \varepsilon_2 S(T_d)$$

Van elkaar aftrekken levert:

$$\varepsilon_1 S(T_1) - \varepsilon_2 S(T_2) = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) S(T_d)$$

Daaruit volgt (4.2-1).

- Alternatieve methode o.a. voor instrumenten met vast  $\varepsilon_{instr}$ .  
Neem een stuk vlakke gealuminiseerd plastic folie b.v. Tonzon radiatorfolie, druk de thermometer tegen de gealuminiseerde zijde van de folie en meet de temperatuur. Dit is bij grove benadering de temperatuur van de detector.  
De emissiecoëfficiënt van de folie is orde 0.01 en reflecteert dus bijna alle straling die afkomstig is van de detectorfrontlens en zijn directe omgeving. Zodoende wordt de temperatuur van het spiegelbeeld

van de detectorfrontlens/behuizing gemeten en daarmee slechts bij benadering de detectortemperatuur. De instelling van  $\varepsilon_{instr}$  is niet zo van belang, maar naar verwachting het beste tussen 0.8 en 1.0.

Zoals later uit de praktijktest (hoofdstuk 4.5) blijkt is deze methode niet geschikt voor een IR-camera. Dat komt omdat de folie niet goed wordt afgebeeld op de detector. Het beeld is "out of focus". De minimale afstand voor een goede IR beeldweergave is namelijk 10cm (voor de FLIR C5).

### 4.3 Meting van de emissiecoëfficiënt $\varepsilon_{obj}$ .

Het te meten object tot ongeveer 20K boven de omgevingstemperatuur opwarmen.

De temperatuur van de detector  $T_d$  (instrument) moet stabiel zijn.

Breng een stukje dikke plastic tape aan op het object. Daarvan mogen we aannemen dat de emissiecoëfficiënt 0.95 – 0.97 is.

Meet de temperatuur van het getapete oppervlak, waarbij de  $\varepsilon_{instr} = \varepsilon_{tape}$  (=0.95 – 0.97).

Beschouw vergelijking (3.3-2) die we hier herhalen:

$$\begin{aligned}
 S(T_{meas}) &= S(T_{obj}) \\
 &+ \frac{(1-\varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} \{S(T_{refl}) - S(T_d)\} \\
 &+ \frac{(\varepsilon_{obj} - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} \{S(T_{obj}) - S(T_{refl})\}
 \end{aligned} \tag{3.3-2}$$

Bij goede benadering zijn de tweede en derde term nul, zodat de gemeten temperatuur  $T_{meas}$  = temperatuur van het getapete deel =  $T_{obj}$ . Noteer  $T^*_{obj}$ .

Meet nu de temperatuur van het niet-getapete oppervlak van het object  $\rightarrow T_{meas}$ .

- Voor een IR camera of IR-thermometer met instelbare  $\varepsilon_{instr}$ .  
Nu stellen we  $\varepsilon_{instr}$  net zo lang in tot de gemeten temperatuur =  $T^*_{obj}$ , dan is  $\varepsilon_{obj}$  gevonden. De derde term van (3.3-2) is dan =nul.  
We kunnen  $\varepsilon_{obj}$  ook berekenen via (3.3-2) uit:

$$\varepsilon_{obj} = \frac{S(T_d) - S(T_{refl}) + \varepsilon_{instr}(S(T_{meas}) - S(T_d))}{S(T^*_{obj}) - S(T_{refl})} \tag{4.3-1}$$

Ervan uitgaande dat  $T_d \neq T_{refl}$ . Dat is, vanwege de dissipatie van zijn elektronica, vermoedelijk het geval voor een IR-camera.

- Voor een IR-thermometer met vaste  $\varepsilon_{instr}$ .  
Wanneer  $T_{refl} = T_d$ . Dan is volgens (4.3-1) de emissiecoëfficiënt van het object  $\varepsilon_{obj}$ :

$$\varepsilon_{obj} = \left\{ \frac{S(T_{meas}) - S(T_{refl})}{S(T^*_{obj}) - S(T_{refl})} \right\} \varepsilon_{instr} \tag{4.3-2}$$

$T_{meas}$  = de gemeten temperatuur van het niet-getapete oppervlak.

Hiermee is natuurlijk ook een eerste schatting te maken betreffende de methode voor de thermometer met instelbare emissiecoëfficiënt.

### 4.4 Correctie IR-thermometer aflezing

We zijn dus geïnteresseerd in  $T_{obj}$ , met bekend veronderstelde  $T_{refl}$ ,  $T_d$  en  $\varepsilon_{obj}$ .  
 $S(T_{obj})$  volgt uit (3.1-1):

$$S(T_{obj}) = \frac{S_{meas} - (1 - \epsilon_{obj})S(T_{refl}) + S(T_d)}{\epsilon_{obj}} \quad (4.4-1)$$

$S_{meas}$  volgt uit (3.2-1):

$$S_{meas} = \epsilon_{instr} \{S(T_{meas}) - S(T_d)\} \quad (4.4-2)$$

$T_{meas}$  = uitlezing van de thermometer; daarmee berekenen we  $S_{meas}$  en vervolgens  $S(T_{obj})$  en ten slotte de gecorrigeerde uitlezing  $T_{obj}$ , de “werkelijke” objecttemperatuur.

Signaalwaarden  $S(T_x)$  te berekenen via (3-1) en de temperatuur  $T_{obj}$  via (3-2). Temperaturen in Kelvin!

## 4.5 Praktijktest

Datum 7 april 2024

Met de FLIR C5

Zie 8. ANNEX A.

- Meting  $T_{refl} = 18.3^\circ\text{C}$
- Meting  $T_d$  op folie:  $27^\circ\text{C}$  ???. *De camera is “out of focus” en daarmee niet geschikt voor deze foliemethode.*
- Meting  $T_d$  met 2 temperatuurmetingen =  $18.1^\circ\text{C}$
- Meting  $\epsilon$  van RVS waterkoker berekende  $\epsilon_{RVS} = 0.24$ .  
 $\epsilon_{RVS}$  via FLIR Tools  $\epsilon_{instr} = 0.24$

Datum: 8 april 2024.

Met de Fluke 62max.

- Meting  $T_{refl}$   
 $\epsilon_{instr} = 1.0$   
 $T_{refl} = 21^\circ\text{C}$
- Meting  $T_d$   
 $T_d$  op folie:  $21.3^\circ\text{C}$
- Meting  $T_d$  met 2 temperatuurmetingen  
 $\epsilon_{instr} = 0.4$ ,  $T_1 = 19.3^\circ\text{C}$   
 $\epsilon_{instr} = 1.0$ ,  $T_2 = 20.4^\circ\text{C}$   
 $T_d = 21.1^\circ\text{C}$
- Meting  $\epsilon$  van RVS waterkoker  
 $T_{tape} = 59.5^\circ\text{C} \rightarrow T_{obj}$ ,  $\epsilon_{tape} = 0.95$ .  
 $\epsilon_{RVS} = 0.20$ .  
Berekende  $\epsilon_{RVS} = 0.20$ .  
 $\epsilon_{RVS}$  via FLUKE  $\epsilon_{instr} \approx 0.15$  (lastig te bepalen door fluctuerende temperatuur)

Een lage emissiecoëfficiënt is lastig te bepalen met de Fluke 62max. Het gaat beter met de FLIR C5 in combinatie met de FLIR Tools.

### Conclusie

In principe kunnen we, zoals uit de tests is gebleken, de onbekende  $T_{refl}$ ,  $T_d$  en  $\epsilon_{obj}$  door enkele metingen bepalen/schatten.

Vervolgens is de “werkelijke” temperatuur van het object  $T_{obj}$  zelf te berekenen.

De FLIR Tools software doet hetzelfde voor u, nadat u  $T_{refl}$  en/of  $T_d$  en/of  $\epsilon_{instr}$  hebt aangepast.

## 5. Nadere beschouwing IR-thermometer responsie volgens Sakuma en Hattori

De detector zet de opgevangen IR straling om in een elektrisch signaal dat door de elektronica in een temperatuur wordt omgezet.

De relatie tussen het elektrisch signaal  $S(T)$  en de temperatuur  $T$  geeft men weer door de thermometer responsie functie:

$$S(T) = \frac{C}{\frac{c2}{e^{AT+B}}}$$

Deze relatie is voorgesteld door Sakuma en Hattori (RD 6) en later toegepast in de z.g. Planck's vorm (zie o.a. RD 7) en is het uitgangspunt voor hoofdstuk 2 en 4:

$$S(T) = \frac{C}{\frac{c2}{e^{AT+B}} - 1}$$

De constanten A, B en C zijn afhankelijk van de doorlaatkarakteristiek van het IR-bandfilter. Voor de lage temperatuurtoepassingen ( $T < 500^\circ\text{C}$ ) ligt dat tussen de golflengten van 8 en 14  $\mu\text{m}$ .

Voor een voldoende smalle bandbreedte,  $\sigma/\lambda_0 \ll 1$ , zijn A, B en C bij benadering (RD 8):

$$A = \lambda_0 \left\{ 1 - 6 \left( \frac{\sigma}{\lambda_0} \right)^2 \right\}$$

$$B = \frac{c2 \left( \frac{\sigma}{\lambda_0} \right)^2}{2}$$

$$C = c1 \int_0^\infty \left\{ \frac{R(\lambda)}{\lambda^5} \right\} d\lambda$$

$\lambda$  = golflengte,  $\lambda_1$  en  $\lambda_2$  is de bandbreedte ( $\lambda_2 < \lambda_1$ ).

$\lambda_0$  = gemiddelde golflengte =  $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ .

$\sigma$  = standaard afwijking van het bandfilter

$c1$  = eerste stralingsconstante =  $3.741\,771\,53 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$

$c2$  = tweede stralingconstante =  $1.438\,7770 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$

$R(\lambda)$  = spectrale responsie van het bandfilter inclusief optiek.

Voor een uniforme spectrale responsie tussen de golflengten  $\lambda_1$  en  $\lambda_2$  is de standaardafwijking  $\sigma = \Delta\lambda/\sqrt{12}$ , waarbij  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , zodat:

$$A = \lambda_0 \left( 1 - \frac{\Delta\lambda^2}{2\lambda_0^2} \right)$$

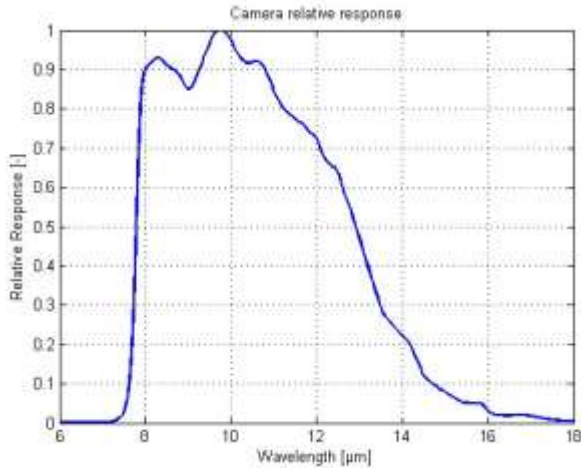
$$B = \frac{c2\Delta\lambda^2}{24\lambda_0^2}$$

De constante C is in het vervolg niet van belang en stellen we op 1.

De FLIR C5 camera en FLUKE 62max IR-thermometer hebben beide een bandbreedte van 8 tot 14  $\mu\text{m}$ , zodat  $\lambda_0 = 11 \mu\text{m}$  en  $\Delta\lambda = 6 \mu\text{m}$ . Daarmee wordt  $A = 9.364 \mu\text{m}$  en  $B = 178.4 \mu\text{mK}$ .

De "echte" spectrale responsie is niet uniform zoals blijkt uit Figuur 6. Bovendien is  $\sigma/\lambda_0 = 0.16$ . Dat is niet  $\ll 1$ . Toch wordt bovenstaande benadering veelvuldig toegepast (RD 10).





Figuur 6 Spectrale responsie FLIR camera (RD 9).

## 6. De responsie via uitwisseling van IR straling beschreven door Gebhart factoren.

In dit hoofdstuk beschrijven we een thermisch model van de IR-camera/thermometer. Met dit model is het mogelijk om het effect van parameters te onderzoeken die ontbreken in het z.g. signaal (S) model besproken in het voorgaande.

Deze parameters zijn:

Emissiecoëfficiënt van de omgeving met temperatuur  $T_{\text{refl}}$ .

Emissiecoëfficiënt van de detector/frontlens.

Invloed van de afstand tot het te meten object.

### 6.1 Uitgangspunten

We gaan uit van, in het IR golflengtegebied:

- Grijze oppervlakken
- Diffuse reflecties
- Transparante atmosfeer ( $\tau = 1$ )
- Omsloten ruimte gevormd door het te bemeten oppervlak, de camera-frontlens en de omgeving.

Dit betekent dat het hier beschreven model niet geldig is voor de stralengang tussen de frontlens en de detector.

Binnen de omsloten ruimte is geen schaduwwerking m.a.w. de omsloten ruimte heeft een convex buitenoppervlak.

### 6.2 Rekenmodel

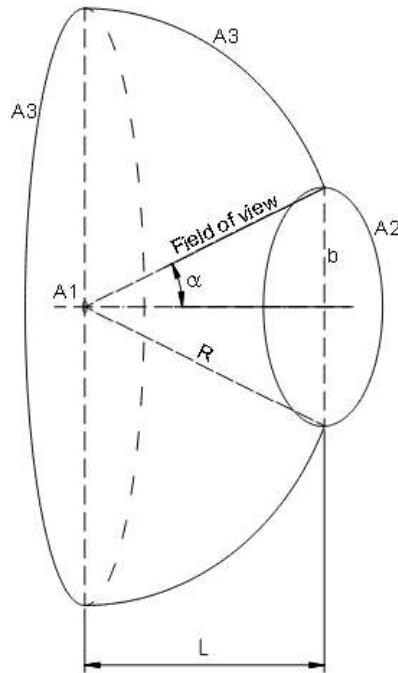
#### 6.2.1 Situatie

Een situatieschets staat in Figuur 7.

De camera aangeduid met frontlensoppervlak A1 is gericht op een vlak object met uniforme temperatuur  $T_2$  en oppervlak A2.

A1 ligt in het centrum van een denkbeeldige halve bol. A2 snijdt een stuk van deze bol af op afstand L, zodanig dat A2 precies in de cirkelvormige field of view van de camera past.

Het overgebleven bol oppervlak **plus** het basisvlak waarin A1 ligt is gelijk aan oppervlak A3 en heeft een uniforme temperatuur T3.



**Figuur 7 Situatieschets rekenmodel**

De oppervlakken A1, A2 en A3 vormen een omsloten ruimte.

Het oppervlakje A1 stelt de frontlens van de camera voor. De IR-detector ligt achter de frontlens. Het beeldveld (field of view) van de camera bedraagt  $54^\circ \times 42^\circ$  volgens RD 2. We kiezen voor ons model de kleinste hoek  $42^\circ$ , zodat  $\alpha = 21^\circ$  (cirkelvormige beeldveld).

Het te meten oppervlak A2, het beeldvlak, bevindt zich op een afstand L [m] van het vlak van de detector.

Het oppervlak A3 valt buiten het zicht van de camera. Echter het beïnvloedt via reflectie van het meetvlak A2 de IR input op de detector. In de FLIR tools usermanual (RD.3) noemt men dat de gereflecteerde temperatuur. Dat is dus in ons geval de temperatuur T3 van A3.

De invloed van de directe omgeving van de camera stellen we voor door vlak A3.

Dat is een halve bol met in zijn centrum de camera-frontlens/detector en met een uitsnede van een bolsector met straal b van het beeldvlak A2. Let op; het cirkelvormige vlak "achter" de camera (minus vlak A1) behoort ook tot A3.

R = straal van de halve bol.

Bij gegeven beeldvlak afstand L is:

$$A2 = \pi b^2 = \pi L^2 \tan^2 \alpha \quad (1)$$

A3 = oppervlak van halve bol – oppervlak van de bolsector + achtervlak – A1

$$A3 = 2\pi R^2 - \pi R(2b \tan(\alpha/2) + b) + \pi R^2 - A1$$

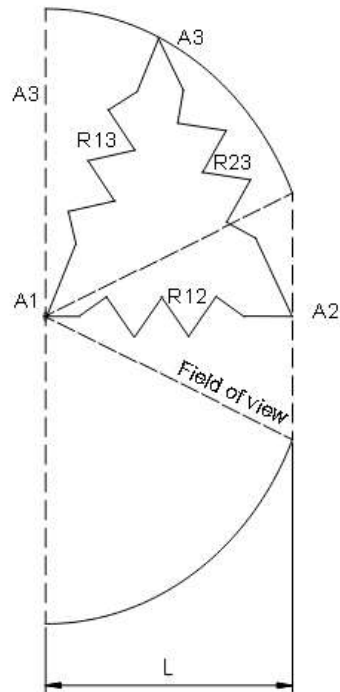
Met  $b = L \tan \alpha$  en  $R = L/\cos \alpha$ , kunnen we A3 uitdrukken als:

$$A3 = \frac{\pi L^2}{\cos^2 \alpha} (1 + 2\cos \alpha - \sin \alpha) - A1 \quad (2)$$

Voor A1 kiezen we een zeer kleine waarde b.v.  $10^{-4}$  [m<sup>2</sup>]

## 6.2.2 Thermisch model

Het thermisch model bestaat uit de stralingskoppelingen Rij tussen de vlakken A1, A2 en A3.



**Figuur 8 Stralingskoppelingen rekenmodel**

Omdat we uitgaan van vaste (opgelegde) temperaturen, kunnen we R23 buiten beschouwing laten. We zijn geïnteresseerd in de directe warmte input via R12 en de gereflecteerde warmte input via R13 op A1.

We gaan uit van de definitie van de Gebhartfactor Bij, dat is (RD 4):

Bij = door vlak j geabsorbeerde straling inclusief reflecties / door vlak i uitgezonden straling

$$B21 = Q_{abs21} / \varepsilon_2 A_2 \sigma T_2^4$$

$\sigma$  = constante van Stephan-Boltzmann =  $5.67 \text{ E-}8 \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ .

Bij dezelfde golflengte van de straling is de absorptiecoëfficiënt = emissiecoëfficiënt (wet van Kirchhoff).

Zodat de van 2 afkomstige door 1 geabsorbeerde warmte  $Q_{abs21} = \varepsilon_2 A_2 B21 \sigma T_2^4$

Voor de van 3 afkomstige door 1 geabsorbeerde warmte  $Q_{abs31} = \varepsilon_3 A_3 B31 \sigma T_3^4$

De door 1 uitgezonden straling naar vlak 2 =  $Q_{out12} = \varepsilon_1 A_1 B12 \sigma T_1^4$

De door 1 uitgezonden straling naar vlak 3 =  $Q_{out13} = \varepsilon_1 A_1 B13 \sigma T_1^4$

De netto ontvangen straling op vlak 1 is:

$$Q_1 = \varepsilon_2 A_2 B21 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 A_1 B12 \sigma T_1^4 + \varepsilon_3 A_3 B31 \sigma T_3^4 - \varepsilon_1 A_1 B13 \sigma T_1^4$$

Er geldt reciprociteit:  $\varepsilon_i A_i B_{ij} = \varepsilon_j A_j B_{ji}$ , zodat: (3)

$$Q_1 = \varepsilon_1 A_1 B12 \sigma (T_2^4 - T_1^4) + \varepsilon_1 A_1 B13 \sigma (T_3^4 - T_1^4) \quad (4)$$

Oftewel  $Q_1 = R12 \sigma (T_2^4 - T_1^4) + R13 \sigma (T_3^4 - T_1^4)$ .

$$R12 = \varepsilon_1 A_1 B12$$

$$R13 = \varepsilon_1 A_1 B13$$

In FLIR-Tools is het mogelijk om de emissiecoëfficiënt  $\varepsilon_2$  van het doelvlak (vlak 2) aan te passen. Flir-Tools berekent vervolgens nieuwe temperaturen. Hetzelfde geldt voor aanpassing van de “gereflecteerde temperatuur”, dat is in ons geval de temperatuur  $T_3$  van vlak 3.

Dit betekent dat de warmte-input ( $Q_1$ ) op de frontlens/detector niet verandert, immers de opname is gemaakt, zodat  $Q_1$  een vast gegeven is.

We kunnen dus, voor de veranderde  $\varepsilon_2$  en  $T_3$ , de nieuwe  $T_2$  berekenen uit (4) volgens:

$$T_2^4 = \frac{Q_1 - \varepsilon_1 A_1 B13 \sigma (T_3^4 - T_1^4) + \varepsilon_1 A_1 B12 \sigma T_1^4}{\varepsilon_1 A_1 B12 \sigma} \quad (4a)$$

Ook de invloed van veranderingen in  $T_1$ ,  $\varepsilon_2$  en  $\varepsilon_3$  op  $T_2$  zijn via (4a) in te schatten. Bedenk dat de Gebhartfactoren  $B12$  en  $B13$  afhankelijk zijn van de emissiecoëfficiënten volgens vergelijkingen (10) van het volgende hoofdstuk.

### 6.2.3 Berekening van de Gebhartfactoren.

De Gebhartfactor  $B_{ij} = F_{ij} \varepsilon_j + \sum (\rho_k F_{ik} B_{kj})$ , waarbij te sommeren is over  $k = 1$  t/m  $N$ . (5)

Met  $N$  = aantal vlakjes (nodes) die een enclosure (in dit geval  $A_1$ ,  $A_2$  en  $A_3$ ) vormen.

$\rho_k = 1 - \varepsilon_k$  = reflectie coëfficiënt.

Er geldt:  $\sum B_{ij} = 1$  gesommeerd over  $j = 1$  t/m  $N$ . (6)

$F_{ij}$  = viewfactor = door vlak  $j$  rechtstreeks getroffen straling / door  $i$  uitgezonden straling.

Er geldt reciprociteit:  $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$  en (7)

$\sum F_{ij} = 1$  gesommeerd over  $j = 1$  t/m  $N$ . (8)

Hiermee kunnen we de viewfactoren berekenen:

Voor vlakke oppervlakken geldt  $F_{ii} = 0$  (kan zichzelf niet zien).

Dus  $F_{11} = 0$  en  $F_{22} = 0$ .

Vlak 3 ligt buiten het zicht van  $A_1$ , zodat  $F_{13} = 0$  en  $F_{31} = 0$

Som over  $F_{1j}$  geeft:  $F_{11} + F_{12} + F_{13} = 1 \rightarrow F_{12} = 1$

Met  $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$  wordt  $F_{21} = A_1 / A_2$ .

Som over  $F_{2j}$  geeft:  $F_{21} + F_{22} + F_{23} = 1 \rightarrow F_{23} = 1 - A_1 / A_2$ .

Met  $A_2 F_{23} = A_3 F_{32}$  wordt  $F_{32} = (A_2 - A_1) / A_3$ .

Som over  $F_{3j}$  geeft:  $F_{31} + F_{32} + F_{33} = 1 \rightarrow F_{33} = (A_3 - A_2 - A_1) / A_3$

(9)

Volgens (5) is:

$$B12 = F12 \varepsilon_2 + \rho_1 F11 B12 + \rho_2 F12 B22 + \rho_3 F13 B32 \text{ en}$$

$$B22 = F22 \varepsilon_2 + \rho_1 F21 B12 + \rho_2 F22 B22 + \rho_3 F23 B32 \text{ en}$$

$$B32 = F32 \varepsilon_2 + \rho_1 F31 B12 + \rho_2 F32 B22 + \rho_3 F33 B32$$

(10)

Dit zijn 3 vergelijkingen met 3 onbekenden  $B12$ ,  $B22$  en  $B32$ .

Evenzo gaan we te werk met  $B13$  uit (4). Expliciete oplossingen zijn in principe mogelijk, maar ten koste van veel algebra en kans op fouten. Daarom is het eenvoudiger om de Gebhartfactoren via een numerieke methode te bepalen. We maken gebruik van de Excel functie “productmat”, het vermenigvuldigen van 2

matrices  $F_{ik}$  en  $B_{kj}$ . Als startwaarde voor de  $B_{kj}$  nemen we  $B_{kj}^{\text{start}} = F_{kj}$ . Met de zo berekende  $B_{ij}$  berekenen we een nieuwe  $B_{ij}$  enzovoort tot het verschil tussen de  $B_{ij}$ 's verwaarloosbaar klein is.

Verwaarlozen we  $A_1$  ten opzichte van  $A_2$  en  $A_3$ , dan zijn:

$F_{21} \approx 0$ ,  $F_{23} \approx 1$ ,  $F_{32} \approx A_2/A_3$  en  $F_{33} \approx 1 - A_2/A_3$ .

$A_2$  en  $A_3$  bevatten beide de factor  $\pi L^2$ , die wegvallen tegen elkaar als we  $A_2$  delen door  $A_3$ .

Bij goede benadering zullen, zolang  $A_1 \ll A_2$  en  $A_1 \ll A_3$ , de viewfactoren, Gebhartfactoren en daarmee  $Q_1$  onafhankelijk zijn van de afstand  $L$  tussen de camera en het te meten object.

In werkelijkheid hoeft dat niet het geval te zijn wanneer de temperaturen van  $A_2$  en  $A_3$  niet uniform zijn.

## 6.3 Berekeningsresultaten

### 6.3.1 Invloed van veranderingen in $T_1$ , $\varepsilon_2$ en $\varepsilon_3$ op $T_2$

We herhalen (4a):

$$T_2^4 = \frac{Q_1 - \varepsilon_1 A_1 B_{13} \sigma (T_3^4 - T_1^4) + \varepsilon_1 A_1 B_{12} \sigma T_1^4}{\varepsilon_1 A_1 B_{12} \sigma} \quad (4a)$$

#### 6.3.1.1 Speciale gevallen

- Doelvlak en omgeving (gereflecteerde temperatuur) hebben tijdens de meting, aangeduid met "nominale geval", dezelfde temperatuur ( $T_2 = T_3$ ).  
Voor de FLIR camera geldt als doelvlak een geselecteerd gedeelte (box of ellips) van het beeld.  $T_2$  is dan de gemiddelde temperatuur van het geselecteerde gedeelte.

Halve openingshoek =	21.0	° voor FLIR C5								
Objectafstand =	1	m								
Nominale geval										
						°C	K	K <sup>4</sup>		
eps1 =	0.95	A1 =	0.0001	m2	T1 =	18	291.15	7.2E+09		
eps2 =	0.95	A2 =	0.46292	m2	T2 =	30	303.15	8.4E+09		
eps3 =	0.95	A3 =	9.04287	m2	T3 =	30	303.15	8.4E+09	gereflecteerde temperatu	
Viewfactoren			Gebhart factoren							
	1	2	3		1	2	3			
1	0	1	0	1	1E-05	0.95013	0.04986		Q13 =	-3.3839E-04
2	0.00022	0	0.99978	2	0.00021	0.00256	0.99723		Q12 =	-6.4481E-03
3	0	0.05118	0.94882	3	5.5E-07	0.05105	0.94895		Qtot = Q1 :	-6.7865E-03
Nieuwe geval										
						°C	K	K <sup>4</sup>		
eps1 =	0.95	A1 =	0.0001	m2	T1 =	18	291.15	7.2E+09		
eps2 =	0.1	A2 =	0.46292	m2	T2 =	30.02	303.17	8.4E+09		
eps3 =	0.95	A3 =	9.04287	m2	T3 =	30	303.15	8.4E+09	gereflecteerde temperatu	
Viewfactoren			Gebhart factoren							
	1	2	3		1	2	3			
1	0	1	0	1	0.00019	0.10024	0.89957		Q13 =	-6.1050E-03
2	0.00022	0	0.99978	2	0.00021	0.00027	0.99952		Q12 =	-6.8150E-04
3	0	0.05118	0.94882	3	9.9E-06	0.00539	0.9946		Qtot = Q1 :	-6.7865E-03

Grote verandering van  $\varepsilon_2$  van 0.95 naar 0.1 heeft nauwelijks invloed op de temperatuur van het geselecteerde gedeelte T2 (30.0 → 30.02°C). Dit komt overeen met de bevindingen met FLIR-Tools. De methode van RD 5, vergelijk (8), levert  $T_2 = T_{\text{measured}} = 30.60^\circ\text{C}$  als resultaat.

- De emissiecoëfficiënt van de camera is ingesteld =1.0, terwijl de werkelijke emissiecoëfficiënt  $\epsilon_2 = 0.8$ .

Halve openingshoek =	21.0	° voor FLIR C5											
Objectafstand =	1	m											
Nominale geval													
							°C	K	K <sup>4</sup>				
eps1 =	0.95	A1 =	0.0001	m2	T1 =	18	291.15	7.2E+09					
eps2 =	0.8	A2 =	0.46292	m2	T2 =	30	303.15	8.4E+09					
eps3 =	0.95	A3 =	9.04287	m2	T3 =	18	291.15	7.2E+09				gereflecteerde temperatu	
Viewfactoren				Gebhart factoren									
	1	2	3		1	2	3						
1	0	1	0	1	4.1E-05	0.80043	0.19953				Q13 =	0.0000E+00	
2	0.00022	0	0.99978	2	0.00021	0.00216	0.99764				Q12 =	-5.4322E-03	
3	0	0.05118	0.94882	3	2.2E-06	0.04301	0.95699				Qtot = Q1 :	-5.4322E-03	
Nieuwe geval													
							°C	K	K <sup>4</sup>				
eps1 =	0.95	A1 =	0.0001	m2	T1 =	18	291.15	7.2E+09					
eps2 =	1	A2 =	0.46292	m2	T2 =	27.72	300.868	8.2E+09					
eps3 =	0.95	A3 =	9.04287	m2	T3 =	18	291.15	7.2E+09				gereflecteerde temperatu	
Viewfactoren				Gebhart factoren									
	1	2	3		1	2	3						
1	0	1	0	1	0	1	0				Q13 =	0.0000E+00	
2	0.00022	0	0.99978	2	0.00021	0.0027	0.9971				Q12 =	-5.4322E-03	
3	0	0.05118	0.94882	3	1.3E-21	0.05373	0.94627				Qtot = Q1 :	-5.4322E-03	

De gemeten waarde is dan 27.72°C. Dit komt overeen met RD 5:  $T_{\text{measured}} = 27.70^\circ\text{C}$ .

### 6.3.1.2 Overige gevallen

Uit Rd 5 table 1, aangevuld met  $T_2=200^\circ\text{C}$ .

Doelvlak is een zwarte straler, die men voor calibratie gebruikt, met een emissiecoëfficiënt  $\epsilon_2 = 0.997$ .

De emissiecoëfficiënt op het instrument ingesteld op  $\epsilon_{\text{inst}} = 0.95$

Omgevingstemperatuur = gereflecteerde temperatuur =  $T_3 = 20^\circ\text{C}$ .

Detectortemperatuur =  $T_1 = 21^\circ\text{C}$ . We nemen aan dat de detectortemperatuur = frontlensstemperatuur.

Doelvlak temperatuur  $T_2 = -50, 100, 200$  en  $500^\circ\text{C}$ .

T2	$T_{\text{measured}}$ Vergelijking 4a	$T_{\text{measured}}$ RD 5 table 1
-50	-55.7	-56.5
100	102.8	103.0
200	204.9	206.2
500	509.2	516.4

**Tabel 6-1**

Stelt men de emissiecoëfficiënt op het instrument in op 0.997, dan is de meetfout  $\rightarrow 0$ .

# TA

# TECHNICAL NOTE

document **RC-TA-TN-004**  
 issue 1  
 date 14-03-2024  
 page 24

Halve openingshoek =	21.0	° voor FLIR C5								
Objectafstand =	1	m								
Nominale geval										
						°C	K	K <sup>4</sup>		
eps1 =	1	A1 =	0.0001	m2	T1 =	21	294.15	7.5E+09		
eps2 =	0.997	A2 =	0.46292	m2	T2 =	-50	223.15	2.5E+09		
eps3 =	0.95	A3 =	9.04287	m2	T3 =	20	293.15	7.4E+09	gereflecteerde temperatu	
Viewfactoren			Gebhart factoren							
	1	2	3		1	2	3			
1	0	1	0	1	6.5E-07	0.99701	0.00299	Q13 =	1.7179E-06	
2	0.00022	0	0.99978	2	0.00022	0.00268	0.99711	Q12 =	2.8304E-02	
3	0	0.05118	0.94882	3	3.5E-08	0.05357	0.94643	Qtot = Q1 :	2.8305E-02	
Nieuwe geval										
						°C	K	K <sup>4</sup>		
eps1 =	1	A1 =	0.0001	m2	T1 =	21	294.15	7.5E+09		
eps2 =	0.95	A2 =	0.46292	m2	T2 =	-55.66	217.493	2.2E+09		
eps3 =	0.95	A3 =	9.04287	m2	T3 =	20	293.15	7.4E+09	gereflecteerde temperatu	
Viewfactoren			Gebhart factoren							
	1	2	3		1	2	3			
1	0	1	0	1	1.1E-05	0.95013	0.04986	Q13 =	2.8635E-05	
2	0.00022	0	0.99978	2	0.00022	0.00255	0.99723	Q12 =	2.8277E-02	
3	0	0.05118	0.94882	3	5.8E-07	0.05105	0.94895	Qtot = Q1 :	2.8305E-02	



## 7. Toepassing Sakuma-Hattori vergelijking op het Gebhart-factor model.

Het Gebhartfactormodel is, zoals besproken, geldig tot aan de frontlens van de detector.

In dit hoofdstuk gaan we de warmte-input op de detector berekenen en vervolgens zo goed mogelijk fitten met de Sakuma-Hattori vergelijking (hoofdstuk 5). D.w.z. we gaan de constanten A en B bepalen.

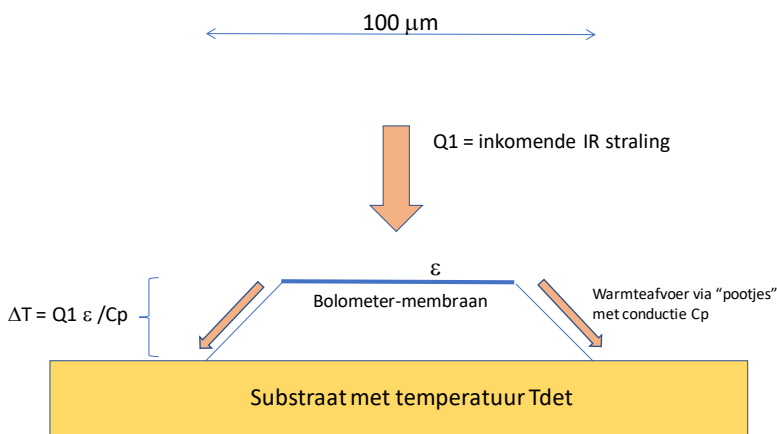
Om de warmte-input op de detector te kunnen berekenen gaan we uit van de spectrale responsie van het optiek-detector systeem, waaruit we de IR warmte transmissie bepalen.

De spectrale responsie van een typische bolometer-detector vonden we al in Figuur 6.

### Het meetprincipe van de bolometer.

De inkomende IR straling verwarmt een plaatje, het bolometer membraan. Het gemeten temperatuurverschil tussen het detectorsubstraat (Figuur 9) en het membraan is evenredig met de inkomende IR straling.

Bedenk dat de "inkomende" IR straling negatief is als de te meten objecttemperatuur lager is dan de detectortemperatuur.



$$\Delta T \approx \text{evenredig met } Q1$$

**Figuur 9 Bolometer principe schets**

De transmissie  $\tau$  van de IR straling door het optiek detectorcombinatie berekenen we met behulp van de vergelijking van Planck:

$$\tau(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)L(\lambda,T)d\lambda}{\sigma T^4} \quad (5.1)$$

T = temperatuur van het te meten object (K).

Waarbij  $R(\lambda)$  = transmissie karakteristiek, waarbij de volgende twee mogelijkheden beschouwen:

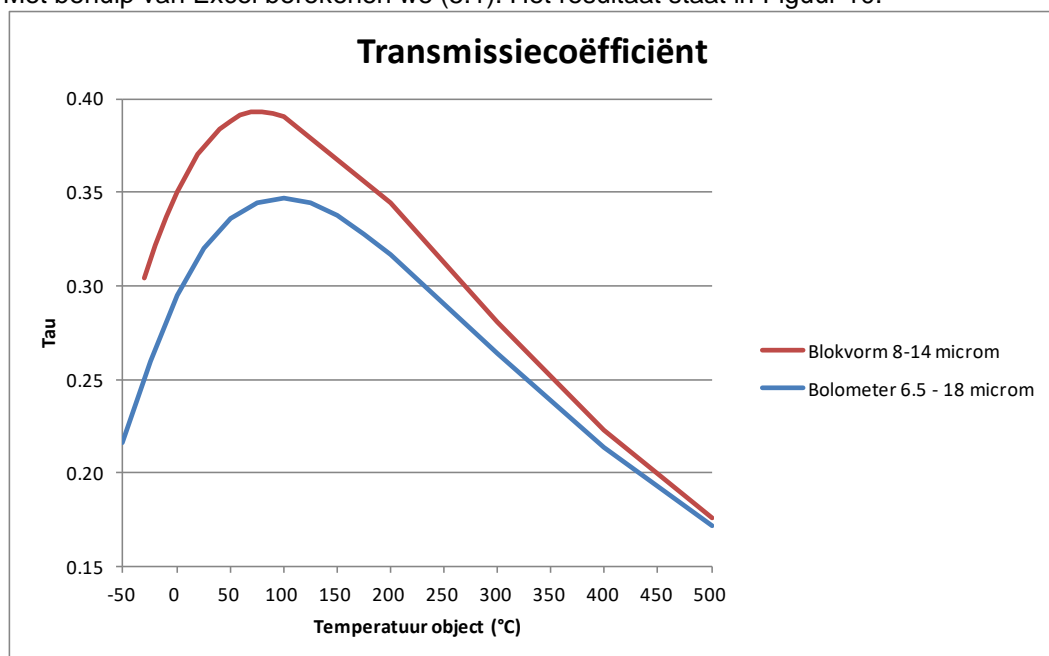
1. De "blokvorm" d.w.z.  $R=1$  voor  $8 \leq \lambda \leq 14$  micrometer en  $R=0$  voor de overige  $\lambda$  waarden
2.  $R(\lambda)$  volgt de karakteristiek van Figuur 6 voor  $6.5 \leq \lambda \leq 18$  micrometer en  $R=0$  voor de overige  $\lambda$  waarden.

$$L(\lambda, T) = \frac{2 \pi C1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{C2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}} \quad (5.2)$$

$$C1 = 5.955E-17 \text{ W m}^2$$

$$C2 = 1.439E-02 \text{ m K}$$

Met behulp van Excel berekenen we (5.1). Het resultaat staat in Figuur 10.



**Figuur 10** Opmerking: De bolometer spectrale verdeling is volgens Figuur 6

De IR-warmte input  $Q_d$  op de detector vinden we door de warmte input op de frontlens  $Q_1$  (hoofdstuk 6.2.2 vergelijking 4) te vermenigvuldigen met de transmissiecoëfficiënt  $\tau$ , voor de gekozen waarde van de objecttemperatuur  $T_2$ .

$$Q_d(T_2) = \tau(T_2) * Q_1(T_2)$$

Het berekeningsresultaat is in Tabel 7-1, waarbij:

- $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 1.0$
- Detectortemperatuur  $T_1 = 21^\circ\text{C}$ .
- Gereflecteerde temperatuur  $T_3 = 21^\circ\text{C}$ .
- Halve openingshoek =  $21^\circ$  (FLIR C5 camera)
- Frontlens oppervlak  $A_1 = 1 \text{ cm}^2$ .

T2 (°C)	Q1 (W)	$\tau$	Qd = $\tau$ Q1 (W)	+0.011186 (W)
-50	-0.0284	0.22	-0.00612	0.00506
-25	-0.0209	0.26	-0.00544	0.00574
0	-0.0109	0.29	-0.00321	0.00798
25	0.0024	0.32	0.00075	0.0119
50	0.0194	0.34	0.00652	0.0177
75	0.0409	0.34	0.0141	0.0253
100	0.0675	0.35	0.0234	0.0346
125	0.100	0.34	0.0344	0.0456
150	0.139	0.34	0.0470	0.0582
175	0.186	0.33	0.0611	0.0723
200	0.242	0.32	0.0766	0.0877
300	0.569	0.26	0.150	0.162
400	1.12	0.21	0.240	0.251
500	1.98	0.17	0.340	0.351

**Tabel 7-1 Detector warmte input voor bolometer spectrale verdeling 6.5 – 18  $\mu$ m.**

We zien in Tabel 7-1, in de 4<sup>de</sup> kolom, dat de warmte-input negatief is voor  $T_2 < 21^\circ\text{C}$ . De Sakuma-Hattori vergelijking is niet geldig voor negatieve functiewaarden. Om dit te voorkomen tellen we een constante warmte-input op bij Qd (5<sup>de</sup> kolom. In dit geval blijkt +0.011186 W de beste "fit" te geven). Evenzo voor de "blokvormige" spectrale verdeling, zie

T2 (°C)	Q1 (W)	$\tau$	Qd = $\tau$ Q1 (W)	+0.01367 (W)
-50	-0.0284	0.26	-0.00747	0.00620
-25	-0.0209	0.31	-0.00656	0.00711
0	-0.0109	0.35	-0.00380	0.00987
25	0.0024	0.37	0.00088	0.0146
50	0.0194	0.39	0.00751	0.0212
75	0.0409	0.39	0.0161	0.0297
100	0.0675	0.39	0.0264	0.0401
125	0.100	0.39	0.0385	0.0522
150	0.139	0.37	0.0522	0.0659
175	0.186	0.36	0.0672	0.0809
200	0.242	0.35	0.0834	0.0971
300	0.569	0.28	0.159	0.172
400	1.12	0.22	0.251	0.265
500	1.98	0.18	0.349	0.363

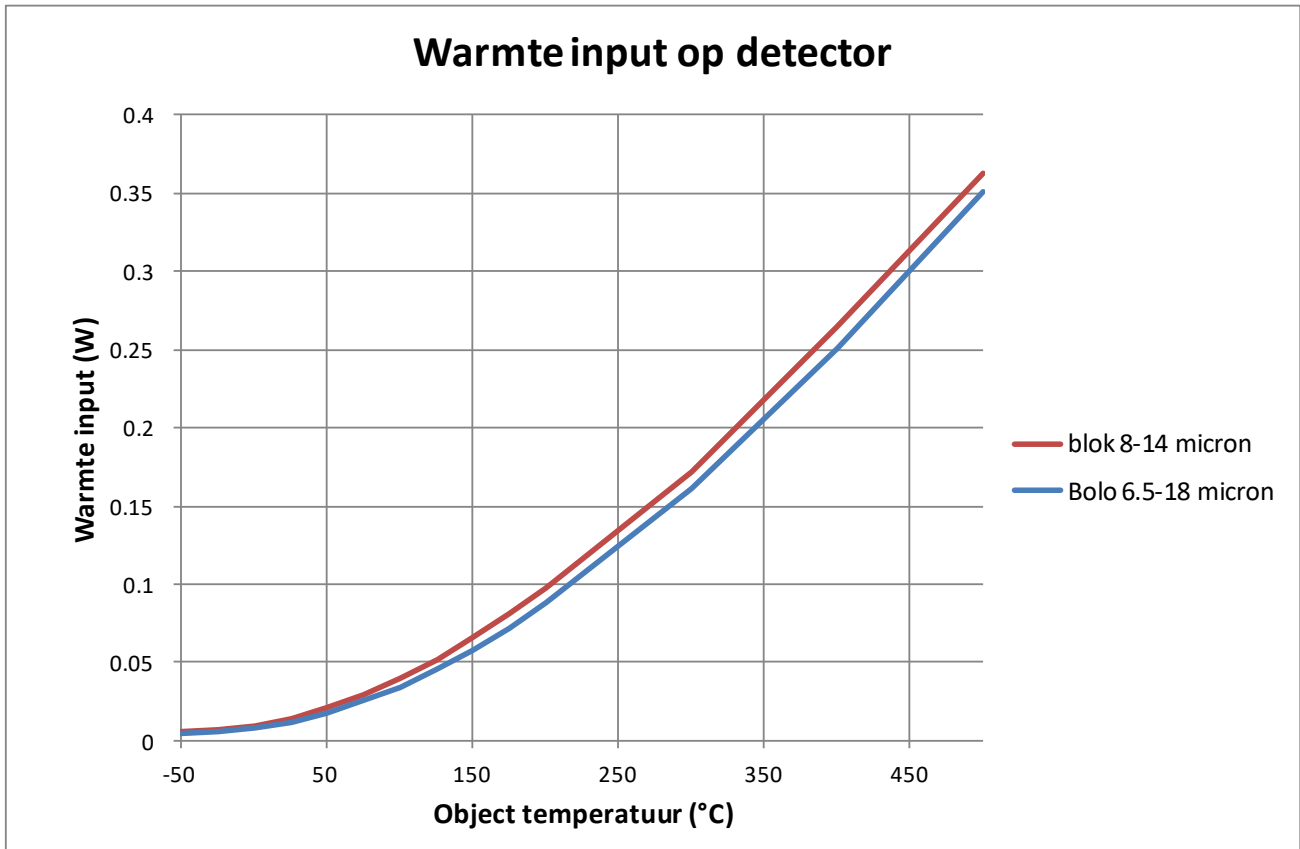
**Tabel 7-2 Detector warmte input voor blokvormige spectrale verdeling 8 – 14  $\mu$ m.**

In dit geval moeten we +0.01367W bijtellen om een zo goed mogelijk fit te krijgen voor de Sakuma-Hattori vergelijking.

Voor beide spectrale verdelingen staan de berekende detector warmte-inputs in Figuur 11 weergegeven. Het fitten van de warmte-inputs is uitgevoerd met de Excel solver, met de volgende resultaten (Tabel 7-3):

Sakuma-Hattori constanten	Bolometer spectrum 6.5-18 $\mu$ m	Blokvorm 8-14 $\mu$ m	Blokvorm 8-14 $\mu$ m RD.5
A	8.43	9.00	9.36
B	178	178	178
C	2.67	2.37	

**Tabel 7-3 Resultaten curve-fitting.** De waarde van C is niet relevant.



**Figuur 11**

Dit gaan we toepassen door de berekening van Tabel 6-1 te herhalen met de gevonden waarden voor A (8.43, 9.0 en 9.36) en te vergelijken met de resultaten verkregen via vergelijking 4a.

We herhalen nog even de uitgangswaarden voor  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_{inst}$ , T1 en T3:

Doelvlak is een zwarte straler, die men voor calibratie gebruikt, met een emissiecoëfficiënt  $\epsilon_2 = 0.997$ .

De emissiecoëfficiënt op het instrument ingesteld op  $\epsilon_{inst} = 0.95$

Omgevingstemperatuur = gereflecteerde temperatuur = T3 = 20°C.

Detectortemperatuur = T1 = 21°C. We nemen aan dat de detectortemperatuur = frontlens temperatuur.

T2 (°C)	$T_{measured}$ (°C) Vergelijking 4a	$T_{measured}$ (°C) A = 8.43 $\mu\text{m}$	$T_{measured}$ (°C) A = 9.0 $\mu\text{m}$	$T_{measured}$ (°C) A=9.36 $\mu\text{m}$ RD 5 table 1
-50	-55.7	-57.2	-56.7	-56.5
100	102.8	102.9	103.0	103.0
200	204.9	205.9	206.1	206.2
500	509.2	515.5	516.1	516.4

**Tabel 7-4**

We zien dat, in dit ene geval, de afwijking (meetfout) het kleinst is als we  $T_{measured}$  berekenen met vergelijking 4a.

De onderlinge verschillen in de berekende  $T_{measured}$  zijn echter niet groot.

Voorlopige conclusie: het maakt niet veel uit hoe we  $T_{measured}$  berekenen, we kunnen de methode van RD 5 blijven volgen (A=9.36  $\mu\text{m}$ ).

Andere berekeningsgevallen zouden een andere conclusie kunnen opleveren.

**TA**

**TECHNICAL NOTE**

document **RC-TA-TN-004**  
issue 1  
date 14-03-2024  
page 29

## 8. ANNEX A

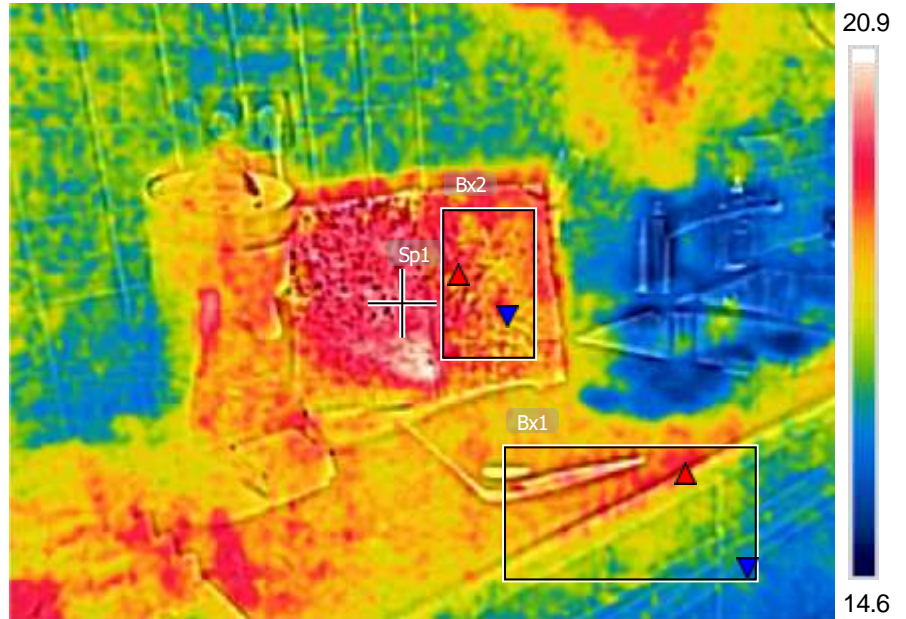
### Metingen

Bx1	Max	18.6 °C
	Min	17.3 °C
Bx2	Max	18.9 °C
	Min	18.0 °C
	Average	18.3 °C
Sp1		18.7 °C

### Parameters

Emissiegraad	1
Gerefl. temp.	18.3 °C
Afstand	1 m
Atmosferische temperatuur	20 °C
Ext. optiek temp.	20 °C
Ext. optiek trans.	1
Relatieve vochtigheid	50 %

8-4-2024 19:36:54



FLIR1261.jpg

FLIR C5

894013716

8-4-2024 19:36:54

Bepaling Trefl.  
Bx2: Trefl=18.3°C.



FLIR1261.jpg

FLIR C5

894013716

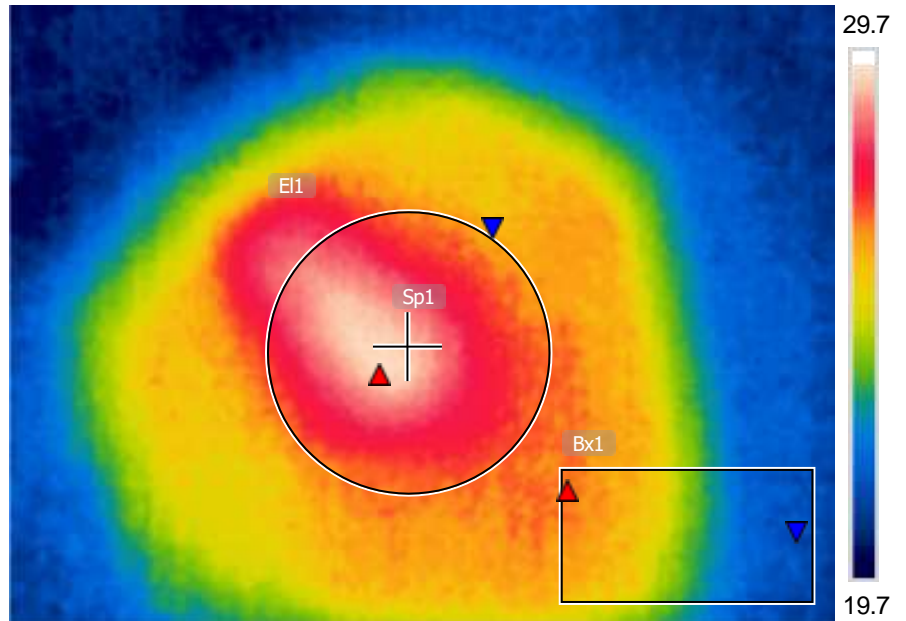
## Metingen

Bx1	Max	25.8 °C
	Min	21.3 °C
EI1	Max	29.4 °C
	Min	25.3 °C
	Average	26.9 °C
Sp1		28.8 °C

## Parameters

Emissiegraad	1
Gerefl. temp.	27 °C
Afstand	0 m
Atmosferische temperatuur	20 °C
Ext. optiek temp.	20 °C
Ext. optiek trans.	1
Relatieve vochtigheid	50 %

8-4-2024 19:37:36



FLIR1263.jpg

FLIR C5

894013716

8-4-2024 19:37:36



FLIR1263.jpg

FLIR C5

894013716

### Bepaling Td.

Foto camera direct op Al.folie.

EL1: Td

eps = 1.0, Td = 26.9°C

eps = 0.9, Td = 26.9°C

eps = 0.8, Td = 26.8°C

## Metingen

Bx1	Max	21.1 °C
	Min	18.9 °C
Sp1		58.8 °C

## Parameters

Emissiegraad	0.95
Gerefl. temp.	18.3 °C
Afstand	1 m
Atmosferische temperatuur	20 °C
Ext. optiek temp.	20 °C
Ext. optiek trans.	1
Relatieve vochtigheid	50 %

8-4-2024 19:41:38



FLIR1265.jpg

FLIR C5

894013716

8-4-2024 19:41:38

Bepaling Tobj\*  
Trefl = 18.8°C  
eps = eps\_tape=0.95  
SP1: Tobj\* = 58.8°C



FLIR1265.jpg

FLIR C5

894013716



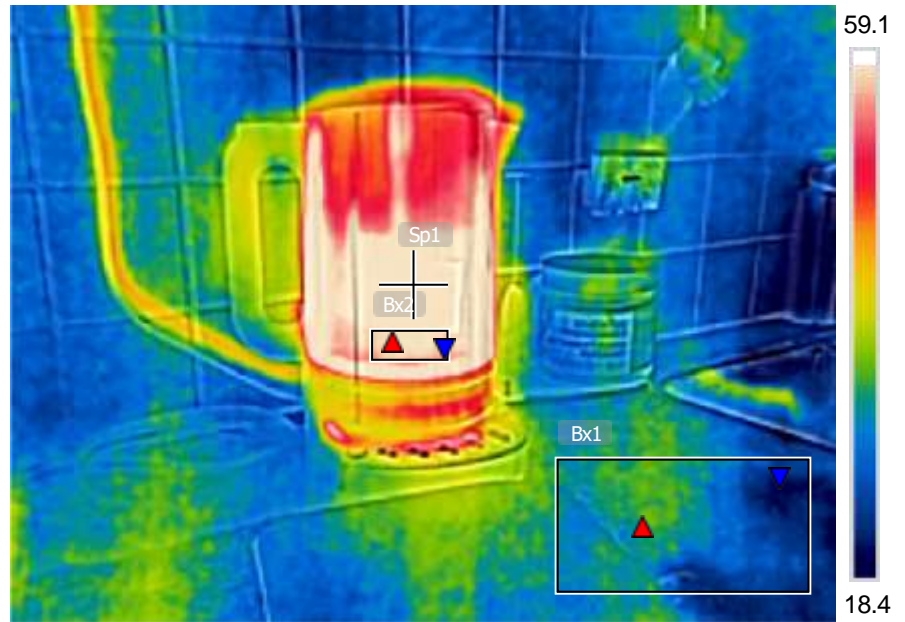
## Metingen

Bx1	Max	29.1 °C
	Min	20.5 °C
Bx2	Max	64.6 °C
	Min	54.7 °C
	Average	59.0 °C
Sp1		142.6 °C

## Parameters

Emissiegraad	0.23
Gerefl. temp.	18.3 °C
Afstand	1 m
Atmosferische temperatuur	20 °C
Ext. optiek temp.	20 °C
Ext. optiek trans.	1
Relatieve vochtigheid	50 %

8-4-2024 19:41:38



FLIR1265.jpg

FLIR C5

894013716

Bepaling eps van waterkoker (RVS).

Sp1:  $T_{obj}^* = 58.8^{\circ}\text{C}$

Bx2: T moet  $58.8^{\circ}\text{C}$  zijn, dat is het geval voor:

$\text{eps}_{\text{RVS}} = 0.23$

Berekend met (3.3-2) is  $\text{eps}_{\text{RVS}} = 0.24$ .

Grote variatie in literatuurwaarden.  
Ligt in de range van mogelijke waarden.

