

Stationair warmtetransport via geleiding, convectie en straling; niveau B

Kennisbank Bouwfysica

Samensteller: ir. Peter Erdsieck, uit:

Dictaat bouwfysica/warmte (ir. F.E. Bakker, TU-Eindhoven, faculteit bouwkunde)

1 Warmte-overdracht door straling

Aan het oppervlak van elk lichaam, warmer dan 0 K (-273 °C), wordt inwendige energie omgezet in elektromagnetische stralingsenergie. De energiestroom die op deze wijze het lichaam verlaat (emittantie = uitstraling) neemt toe met de temperatuur van het lichaamsoppervlak.

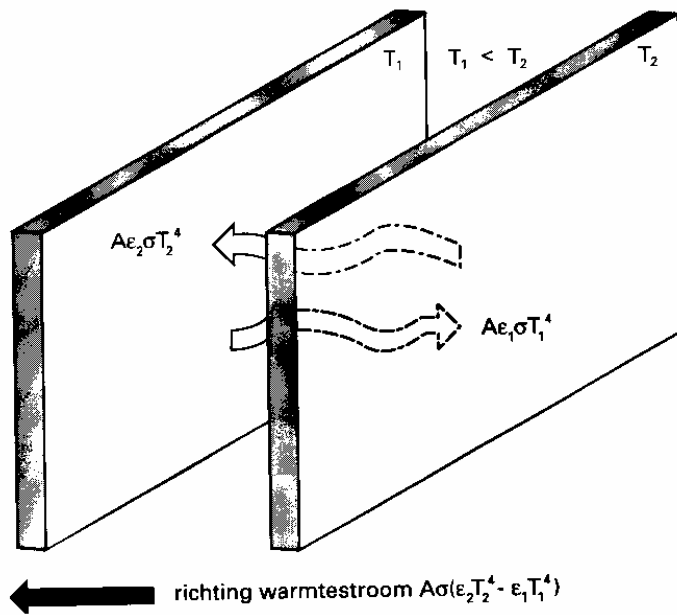
De warmteoverdracht per vierkante meter wordt weergegeven door de warmtestroomdichtheid. In formulevorm:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Hierin is:

M	emittantie	[W/m ²]
ε	emissiefactor (altijd $0 < \varepsilon < 1$)	[-]
σ	constante van Stefan-Boltzmann	[5,67.10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴]
T	temperatuur van het oppervlak	[K]

Vanwege de temperatuurafhankelijkheid wordt de elektromagnetische straling ook wel temperatuurstraling genoemd. De door gebouwdelen geëmitteerde straling ligt in het infraroodgebied en is dus onzichtbaar. Dit warmtetransport is niet aan een overdrachtsmedium gebonden, zoals dat bij geleiding en convectie het geval is, en is dus ook in vacuüm mogelijk. Een voorbeeld hiervan is zonlicht dat de aarde via het heelal bereikt. Als de straling een oppervlak treft, zal er deels absorptie plaatsvinden. De stralingsenergie wordt bij absorptie in warmte omgezet. Door middel van stralingsemisies en absorptie is dus warmtetransport van het ene lichaam naar het andere mogelijk.



figuur 1. warmtetransport tussen twee evenwijdige platen ten gevolge van stralingsemissie en stralingsabsorptie (langgolvlige, infrarode straling).

1.1 Emissiefactor

De emissiefactor (ϵ) heeft een waarde die groter dan 0 en kleiner dan 1 is. De waarde hangt af van:

- de temperatuur van een lichaam;
- het materiaal van een lichaam;
- de gesteldheid van het oppervlak.

De meeste bouwmaterialen hebben een emissiefactor die in de buurt van de 0,9 ligt. Met name zeer gladde metaaloppervlakken kunnen een veel kleinere emissiefactor hebben. Zo heeft gepolijst aluminium een emissiefactor van circa 0,05. Hiervan wordt gebruik gemaakt in zogenaamd HR-glas. Dit is dubbel glas waarop aan de spouwzijde van de binnenste glasplaat een uiterst dunne laag metaaloxide is aangebracht. Door deze metaallaag wordt de stralingsuitwisseling tussen de twee glasbladen verminderd.

Materiaaloppervlak	ϵ
edelmetalen, gepolijst	0,02
aluminium, gepolijst	0,05
menselijke huid	0,80
verf	0,90
papier, hout, aardewerk	0,92
gips, marmer, stucwerk	0,93
glas	0,94
beton	0,95

tabel 1. enkele emissiecoëfficiënten van materiaaloppervlakken, voor het temperatuurgebied van 273 K tot circa 400 K.

1.2 Absorptiefactor

De hoeveelheid stralingsenergie die een oppervlak per m^2 treft, wordt de irradiantie (E) van het oppervlak genoemd. De eenheid is W/m^2 . Een deel van de straling kan door het oppervlak geabsorbeerd worden, een ander deel gereflecteerd en de rest doorgelaten. De corresponderende fracties worden achtereenvolgens de absorptiefactor (α), de reflectiefactor (ρ) en de doorlatingfactor (τ) genoemd. Hierbij geldt dat:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Een oppervlak met een temperatuur T zal dus energie verliezen door emissie van straling ($\varepsilon \sigma T^4$) en energie winnen door absorptie (αE).

Stel de opvallende straling is afkomstig van een zwarte straler met dezelfde temperatuur als die van het oppervlak, dan geldt:

$$E = \sigma T^4$$

Het netto warmteverlies per m^2 door straling is dan:

$$\varepsilon \sigma T^4 - \alpha E$$

of, anders geschreven:

$$\varepsilon \sigma T^4 - \alpha \sigma T^4$$

Nu kan er volgens de tweede wet van de thermodynamica geen warmtestroom zijn zonder temperatuurverschil. Dus zal moeten gelden:

$$\varepsilon = \alpha$$

De gelijkheid staat bekend als de wet van Kirchhoff. Omdat bouwkundige oppervlakken bij normale temperaturen een emissiefactor van ca. 0,9 hebben, zal dus voor langgolvlige straling de absorptiefactor ook circa 0,9 zijn.

Bouwkundige materialen zijn overigens niet transparant voor langgolvlige straling, dat wil zeggen $\tau = 0$. Pas op, dit geldt ook voor glas. Glas is net zo ondoorzichtig voor langgolvlige infrarode straling als triplex voor licht. De eigenschappen voor langgolvlige straling zijn dus met de emissiefactor meestal volledig bekend:

$$\alpha = \varepsilon; \quad \rho = 1 - \varepsilon; \quad \tau = 0.$$

Let op dat voor kortgolvlige straling, zoals (zon)licht, deze factoren doorgaans andere waarden zullen hebben.

Voorbeeld 1

Een plat dak ($\varepsilon = 0,9$) heeft een oppervlaktetemperatuur aan de buitenzijde van 2°C .

Gevraagd:

De warmtestroom die 's nachts wordt afgegeven in de vorm van straling per m^2 dakoppervlakte in de volgende gevallen:

1. onbewolkte hemel met een irradiantie van 100 W/m^2 .
2. bewolkte hemel, met een wolkendek ($\varepsilon = 0,9$) van 0°C .

Uitwerking:

1. Warmtestroom door straling onbewolkte hemel:

$$\text{Emittantie dak: } 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (275)^4 = 292 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Absorptie dak: } 0,9 \times 100 = \frac{90}{292} \text{ W/m}^2$$

$$\text{Warmtestroom door straling : } 202 \text{ W/m}^2$$

2. Warmtestroom door straling bewolkte hemel:

$$\text{Emittantie dak: } 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (275)^4 = 292 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Absorptie dak: } 0,9 \times 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (273)^4 = \frac{255}{292} \text{ W/m}^2$$

$$\text{Warmtestroom door straling : } 37 \text{ W/m}^2$$

2 Langgolvlige en kortgolvlige straling

Zoals in het voorgaande is aangegeven, zijn de eigenschappen van bouwmaterialen voor langgolvlige (warmte)straling en kortgolvlige straling (bij voorbeeld licht) niet gelijk. Zo weerkaatst een donker oppervlak minder licht dan een licht oppervlak, ook al is het oppervlak (materiaal en structuur) voor het overige gelijk. Dientengevolge zullen ook de absorptiecoëfficiënten voor licht verschillen. De absorptiecoëfficiënten (en emissiecoëfficiënten) voor langgolvlige warmtestraling zijn niet kleurafhankelijk en in beide gevallen gelijk.

Voorbeeld 2

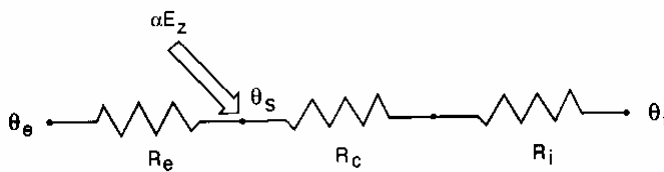
1. Een conventionele radiator ($90/70^\circ\text{C}$) heeft meestal een lichte kleur. Om de effectiviteit van de warmte-afgifte te vergroten, besluit men deze zwart te verven. Heeft dit zin?
2. Een bouwkundige zonnecollector, opgebouwd (van buiten naar binnen) uit een glasplaat, een luchtspouw en een met water gevuld collectoroppervlak, heeft doorgaans een zwarte kleur. Heeft dit zin?

Uitwerking:

1. Een radiator geeft zowel convectieve warmte als stralingswarmte af. Dit is langgolvlige straling, die afhankelijk is van materiaal en oppervlaktestructuur, doch niet van de kleur van het oppervlak. Een witte en zwarte radiator zullen voor stralingswarmte dezelfde emissiecoëfficiënt bezitten. Het heeft dus geen zin om een lichte radiator zwart te verven.
2. In een zonnecollector gaat het erom zonlicht om te zetten in warmte. Een donker oppervlak is dus zinvol, aangezien hierdoor zoveel mogelijk zonlicht wordt geabsorbeerd. Uiteraard zal met de opwarming van het collectoroppervlak de stralingswarmte vanaf dit oppervlak toenemen. De glasplaat op de collector voorkomt echter dat deze warmte verloren gaat. Hoewel de glasplaat voor kortgolvlige straling (zonlicht) goed doorlatend is, is deze voor langgolvlige warmtestraling vrijwel ondoorlatend. De warmte wordt als het ware opgesloten in de collector.

Vanwege de verschillende eigenschappen van glas voor kortgolvlige straling en langgolvlige straling is er in de zomerperiode een risico van oververhitting in vertrekken met op het zuiden georiënteerde raamopeningen aanwezig. Het zonlicht wordt door het glas in de raamopeningen betrekkelijk goed doorgelaten. Het achterliggende vertrek warmt hierdoor op. Aangezien het glas echter voor warmtestraling ondoorlatend is, blijft deze warmte opgesloten in het vertrek. Oververhitting is in de zomerperiode dan ook goed mogelijk.

Om die reden zijn glastypen ontwikkeld die minder zonlicht doorlaten, een lagere zontoetredingsfactor (ZTA) bezitten. Dit wordt gedaan door een metaalfilmje op het glas aan te brengen. Zonlicht wordt hierdoor voor een deel opgevangen en omgezet in warmte, voordat het in het vertrek terecht komt. Figuur 2 illustreert dit.



figuur 2. elektrisch analogon van een glasblad, waarop aan de buitenzijde een metaalfilmje is aangebracht. Hierdoor wordt een deel van het opvallende zonlicht geabsorbeerd (αE_z), waardoor een verhoging van de temperatuur van het glasblad optreedt.

Zoals uit figuur 2 blijkt, is het gevolg van dergelijk zonwerende beglazing dat het glasvlak toeneemt in temperatuur en warmer wordt dan de omgeving. Het glas kan dus, als gevolg van de thermische belasting, sterk uitzetten. Hiermee moet in de detaillering rekening gehouden worden.

Het probleem kan enigszins worden ondervangen door glas toe te passen met een lagere absorptiecoëfficiënt en dit te compenseren met een hogere reflectiecoëfficiënt. Immers, ook voor zonlicht geldt:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{ofwel: } \alpha + \rho = 1 - \tau.$$

Hierin is:

- α : absorptiecoëfficiënt
- ρ : reflectiecoëfficiënt
- τ : transmissiecoëfficiënt (doorlatendheidscoëfficiënt)

Zonwerend glas met een relatief hoge absorptiecoëfficiënt lijkt doorgaans iets donkerder dan normaal glas, maar komt voor het overige hiermee goed overeen. Zonwerend glas met een relatief hoge reflectiecoëfficiënt ziet er daarentegen spiegelend uit.

Voorbeeld 3

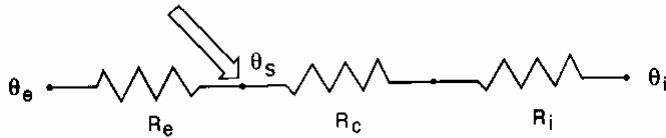
Een op het zuiden georiënteerde gevel van steeds metselwerk ($d=210$ mm) is aan de buitenzijde mat zwart geverfd. De zon staat pal zuid, waarbij de directe irradiantie op het verticale vlak 430 W/m^2 bedraagt. De diffuse straling op een horizontaal vlak bedraagt 150 W/m^2 . De binnenluchttemperatuur is 18 $^{\circ}C$, de buitenluchttemperatuur is 0 $^{\circ}C$. De warmtegeleidingscoëfficiënt van baksteenmetselwerk bedraagt $1,0$ $W/(m.K)$.

1. Teken het elektrisch analogon.

2. Hoe hoog wordt de oppervlaktetemperatuur van de muur onder de gegeven omstandigheden aan de buitenzijde?

Uitwerking:

1. Elektrisch analogon:



irradiantie op de gevel: direct: 430 W/m²
 diffuus: 75 W/m² (=0,5 x 150)
 totaal: 505 W/m²
 $R_e = 0,04$ $\theta_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$
 $R_i = 0,13$ $\theta_i = 18\text{ }^\circ\text{C}$
 $R_c = 0,21$

2. Warmtebalans in θ_s :

$$(0 - \theta_s) / 0,04 + (18 - \theta_s) / 0,34 + 505 = 0.$$

$$\theta_s = 20,0\text{ }^\circ\text{C}.$$