# Warmteoverdracht door straling

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. E.H. Tumbuan, prof.ir. J.J.M. Cauberg, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU-Delft

## 1 Inleiding

Wanneer een constructie door de zon wordt bestraald en/of er een temperatuurverschil over een constructie aanwezig is, zal er naar en door de constructie warmtetransport optreden. Om enig inzicht te krijgen in het mechanisme van het warmtetransport door een constructie en van een constructie naar zijn omgeving zullen eerst de verschillende manieren worden behandeld hoe warmtetransport kan plaatshebben, namelijk door:

- geleiding;
- convectie;
- straling.

## 2 Warmteoverdracht door straling

Elk oppervlak straalt een hoeveelheid warmte uit, die wordt bepaald door zijn temperatuur. Volgens de "wet van Stefan-Boltzmann" bedraagt deze straling:

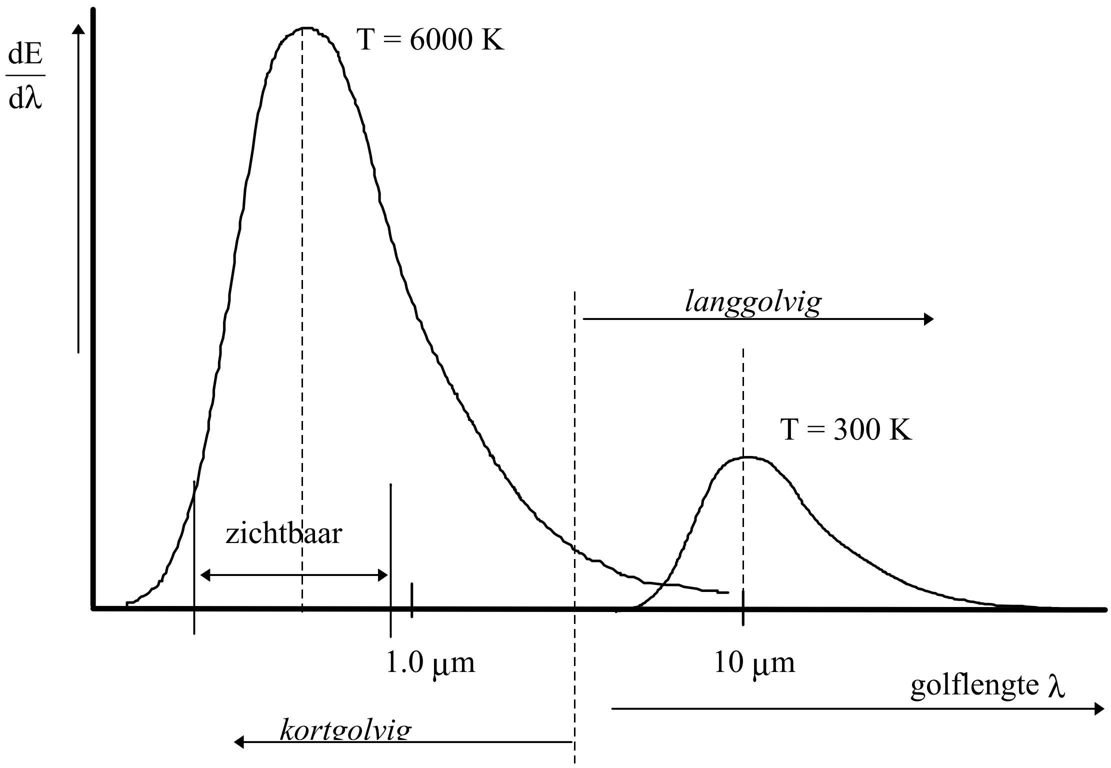
$$E = \varepsilon \, \sigma T^4$$

Waarin :

| | |
|---|---|
| $E$ | stralingswarmtestroomdichtheid per golflengte in [W/m$^2$] |
| $\sigma$ | constante van Stefan-Boltzmann, gelijk aan $5{,}67.10^{-8}$ [W/m$^2$K$^4$] |
| $\varepsilon$ | emissiecoëfficiënt van het oppervlak [-] |
| $T$ | temperatuur van het oppervlak in [K] |

De emissiecoëfficiënt $\varepsilon$ is over het algemeen een functie van de golflengte $\lambda$ en de temperatuur. Een oppervlak dat de maximale straling uitstraalt die bij zijn temperatuur hoort, noemen we een "zwarte straler" en heeft dus een emissiecoëfficiënt $\varepsilon = 1$.

We beperken ons in deze module slechts tot twee soorten straling, namelijk de kortgolvige straling (zonnestraling) en de langgolvige straling met golflengten > 3 $\mu$m (zie figuur 1). In deze figuur is de verdeling van de stralingswarmtestroomdichtheid per golflengte gegeven.
In de twee golflengtegebieden nemen we voor de emissiecoëfficiënt $\varepsilon$ van elk gebied een constante waarde aan, maar die voor beide gebieden verschillend kunnen zijn.
We spreken dan van "grijze" stralende oppervlakken, waarvan de totale straling dus kleiner is dan de zwarte straler van dezelfde temperatuur.




figuur 1. stralingswarmtestroomdichtheid per golflengte

De plaats van het maximum van de spectrale verdeling voldoet volgens Wien aan de relatie $\lambda_{max} T = 2{,}898.10^{-3}$ mK.

Voor de zonnestraling (kortgolvig, T ≈ 6000 K) is $\lambda_{max} \approx 0{,}5\ \mu m$, terwijl voor kamertemperaturen (langgolvig, T ≈ 300 K) $\lambda_{max} \approx 10\ \mu m$ is. Een deel van de zonnestraling is zichtbaar (licht). De straling bij kamertemperaturen is alleen voelbaar.

Volgens de “wet van Kirchoff” is de emissiecoëfficiënt ε gelijk aan de absorptiecoëfficiënt a, dat wil zeggen, dat het oppervlak even veel straling kan absorberen als emitteren.
In het algemeen wordt de opvallende straling op een oppervlak gedeeltelijk gereflecteerd, geabsorbeerd en doorgelaten, zodat voor beide golflengtegebieden geldt:

$a + r + t = 1$

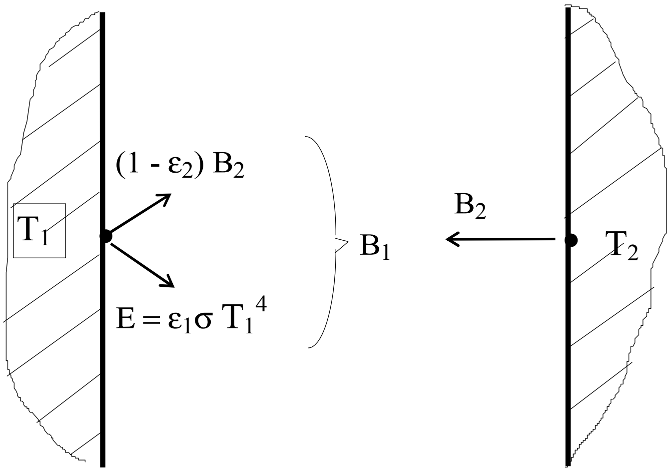
Waarin:

| | |
|---|---|
| a | absorptiecoëfficiënt |
| r | reflectiecoëfficiënt |
| t | doorlatingscoëfficiënt |

Een zogenaamde zwarte straler heeft een ε = a = 1, reflecteert niets en laat geen straling van de bijhorende golflengte(n) door. Vandaar dat hij zwart wordt genoemd (een zwarte kleur absorbeert al het opvallende licht).

## 3 Stralingsuitwisseling tussen twee grijs stralende oppervlakken

In figuur 2 zijn twee oppervlakken weergegeven met temperaturen $T_1$ en $T_2$ en emissiecoëfficiënten $\varepsilon_1$ en $\varepsilon_2$.
De oppervlakken emitteren, respectievelijk: $E_1 = \varepsilon_1 \sigma T_1^4$ en $E_2 = \varepsilon_2 \sigma T_2^4$.




figuur 2. stralingsuitwisseling tussen twee grote, grijs stralende oppervlakken

Van het oppervlak 1 vertrekt behalve de eigen straling $E_1$ ook de gereflecteerde straling afkomstig van oppervlak 2. Evenzo geldt voor oppervlak 2, dat de totale uitgezonden straling de eigen straling $E_2$ plus de gereflecteerde straling afkomstig van 1 is.
Noem de totale uitgezonden straling van de oppervlakken respectievelijk: $B_1$ en $B_2$.
De netto-straling tussen de oppervlakken is dan gelijk aan

$$q_s = B_1 - B_2. \tag{1}$$

Nu is:

$$B_1 = E_1 + (1- \varepsilon_1)\, B_2 \tag{1a}$$

$$B_2 = E_2 + (1- \varepsilon_2)\, B_1. \tag{1b}$$

Substitutie van 1b in 1a geeft :
$B_1 = E_1 + (1- \varepsilon_1)\, E_2 + (1-\varepsilon)\,(1-\varepsilon_2)\, B_1$

Of:

$$B_1 = \frac{E_1 + (1-\varepsilon_1)E_2}{1-(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)}$$

Evenzo:

$$B_2 = \frac{E_2 + (1-\varepsilon_2)E_1}{1-(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)}$$

Substitutie in (1) levert: $q_s = \dfrac{E_1 + (1-\varepsilon_1)E_2 - E_2 + (1-\varepsilon_2)E_1}{1-(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)}$

Na enig rekenwerk volgt: $q_s = \dfrac{\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma T_1^4 - \varepsilon_1\varepsilon_2\sigma T_2^4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2}$

Of :

$$q_s = \varepsilon_{res}\sigma(T_1^4 - T_2^4) \qquad (2a)$$

Waarin:

$\varepsilon_{res}$ resulterende emissiecoëfficiënt

$$\frac{1}{\varepsilon_{res}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \qquad (2b)$$

Veel bouwmaterialen zijn thermisch (langgolvige straling) als bijna “zwart” te beschouwen en hebben een emissiecoëfficiënt $\varepsilon > 0.9$. De uitdrukking voor de resulterende emissiecoëfficiënt $\varepsilon_{res}$ vereenvoudigt zich dan tot

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_1.\varepsilon_2 \qquad (2c)$$

Bij kleine temperatuurverschillen kan (2a) worden gelineariseerd tot:

$$q_s = \alpha_s(T_1 - T_2) \qquad (3)$$

In (3) is in analogie met de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha_c$ een warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling $\alpha_s$ geïntroduceerd, die de waarde heeft:

$$\alpha_s = 4.\varepsilon_{res}.\sigma.T_{gem}^3 \qquad (4)$$

Met:

$$T_{gem} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Linearisatie is alleen toegestaan bij kleine temperatuurverschillen en de grootte van $\alpha_s$ is afhankelijk van het temperatuurniveau $T_{gem}$.

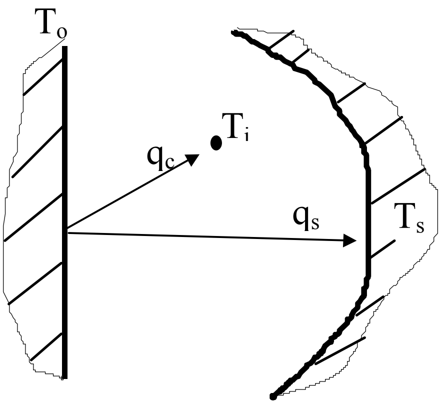
## 4 Convectie en straling

In veel gevallen zijn de warmteoverdrachtscoëfficiënten voor convectie en straling samen te voegen tot één warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha$. Dit doet zich voor bij de warmteoverdrachtscoëfficiënten $\alpha_i$ aan de binnenzijde en $\alpha_e$ aan de buitenzijde van een constructie, die de scheiding vormt tussen binnen en buiten. De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenzijde $\alpha_e$ komt in een andere module aan de orde. In deze module wordt de warmteoverdrachtscoëfficiënt alleen aan de binnenzijde $\alpha_i$ beschouwd. In figuur 3 wordt de gevel geschematiseerd tot een vlak met een temperatuur $T_o$ en de wanden, vloer en plafond, waarvan gemakshalve is aangenomen dat zij allemaal dezelfde temperatuur bezitten tot een vlak met temperatuur $T_s$.

Tussen de oppervlakken met temperaturen $T_o$ en $T_s$ heeft warmteoverdracht door straling plaats, terwijl tussen het oppervlak met $T_o$ en de lucht met $T_i$ convectieve warmteoverdracht optreedt.
De totale warmtestroomdichtheid die het vlak met $T_o$ verlaat, kan worden geschreven als:

$$q_{i,tot} = q_c + q_s = \alpha_c (T_o - T_i) + \alpha_s (T_o - T_s) \qquad (5)$$

De warmtetransmissie door straling kan ook worden uitgedrukt als functie van het temperatuurverschil $T_o$ tussen en de luchttemperatuur $T_i$ met: $q_s = \alpha_s^{eff} (T_o - T_i)$.




figuur 3. convectieve- en stralingsoverdracht tussen twee oppervlakken

Hierin is een effectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling ingevoerd, die gelijk is aan:

$$\alpha_s^{eff} = \alpha_s \frac{T_o - T_s}{T_o - T_i}$$

Indien $T_s$ gelijk is aan $T_i$ dan wordt $\alpha_s^{eff} = \alpha_s$.

De uitdrukking voor de totale warmtestroomdichtheid, die het oppervlak verlaat, luidt dus:

$$q_{i,tot} = \alpha_c (T_o - T_i) + \alpha_s^{eff} (T_o - T_i)$$

Of:

$$q_{i,tot} = \alpha_i (T_o - T_i) \qquad (6)$$

Met:

$$\alpha_i = \alpha_c + \alpha_s^{eff}$$

Wanneer het oppervlak met de temperatuur $T_o$ wordt omsloten door vlakken die elk een andere temperatuur bezitten, moet worden gewerkt met een gemiddelde stralingstemperatuur $T_{s,gem}$. Het zou te ver voeren om in deze module hierop in te gaan. Een eerste benadering voor de waarde van de gemiddelde stralingstemperatuur wordt verkregen door de temperaturen over de oppervlakken te middelen.

Dus:

$$T_{s,gem} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i . T_i}{A_{totaal}}$$