

# Stationair warmtetransport via geleiding, convectie en straling; niveau A

Kennisbank Bouwfysica

Samensteller: ir. Peter Erdsieck, uit:

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

## 1 Inleiding

Warmte kan worden gezien als “inwendige energie”.

Inwendige energie die in alle materie is opgeslagen, is de som van de kinetische en de potentiële energie van de moleculen. Als de temperatuur van een lichaam stijgt, stijgt ook de inwendige energie:

- De kinetische energie van de moleculen neemt toe. In een vaste stof gaan de moleculen intenser trillen. In een vloeistof of gas, waar ze niet aan hun plaats gebonden zijn, neemt ook de snelheid van de moleculen toe.
- De potentiële energie neemt toe. De afstand tussen de moleculen wordt groter, wat vooral telt in een vaste stof omdat daar de aantrekkingskracht tussen de moleculen groot is. Vergroting van de potentiële energie betekent dat het lichaam uitzet.

De intensiteit waarmee moleculen trillen, is een maat voor de temperatuur van het betreffende lichaam. Bepalen we met een kwikthermometer de temperatuur van een lichaam, dan wordt een deel van de inwendige energie van het lichaam overgedragen op het kwik. De kwikmoleculen gaan intenser trillen en de potentiële energie neemt toe: het kwik zet uit. De mate van uitzetting is af te lezen van een schaal en geeft de temperatuur ( $T$ ) aan, bij voorbeeld in graden Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Deze eenheid wordt in het vervolg gebruikt om de temperatuur aan te geven. In navolging van internationale afspraken wordt voor de aanduiding van temperatuurverschillen de eenheid Kelvin gebruikt ( $\text{K}$ ).

### 1.1 Warmtetransport tussen voorwerpen, vlakken enzovoort.

Tussen twee voorwerpen, zoals vlakken, is voortdurend sprake van warmte-uitwisseling (warmtetransport). Er is sprake van warmte-uitwisseling tussen de mens en zijn omgeving, maar bij voorbeeld ook tussen een gebouw en de omgeving. Het transport van warmte heeft gewoonlijk tegelijkertijd op drie verschillende wijzen plaats: door geleiding, door convectie en door straling.

Warmtetransport heeft alleen plaats als er een temperatuurverschil is. De richting waarin de warmte zich beweegt, is hierbij altijd van een hogere naar een lagere temperatuur (Tweede wet van de thermodynamica). De eenheid waarmee de hoeveelheid energie, in dit geval warmte, wordt uitgedrukt is de joule ( $\text{J}$ ). De warmtestroom (warmtehoeveelheid per tijdseenheid) wordt uitgedrukt met  $\text{J/s}$  wat gelijk is aan watt ( $\text{W}$ ).

In deze module wordt alleen ingegaan op warmtetransport onder stationaire (gelijkblijvende) omstandigheden. Het gaat hierbij bij voorbeeld om het warmtetransport door een constructie, waarbij de externe omstandigheden langdurig hetzelfde zijn. Er wordt hierbij geen rekening gehouden met de opslag van warmte in een constructie of met een tijdelijke zonbelasting van een constructie.

## 2 Warmtetransport door geleiding

Transport van warmte kan plaatshebben doordat moleculen elkaar aanstoten en zo inwendige energie doorgeven. Dit gebeurt in vaste stoffen waar de moleculen op hun plaats blijven, maar ook in gas of vloeistof waar de moleculen niet aan hun plaats gebonden zijn. Deze vorm van warmtetransport noemen we geleiding.

In een vaste stof is geleiding de enige vorm van warmtetransport. Geleiding komen we in het dagelijks leven overal tegen. Als de vloer waarop we staan koud is, dan zullen onze voeten op den duur ook afkoelen, zelfs als we schoenen dragen. De warmte stroomt van onze voeten door de zool van onze schoenen (geleiding) naar de koude vloer.

Bij gas en vloeistof treedt bij temperatuurverschil naast geleiding ook altijd convectie op (stromingstransport). Vergelijken met het warmtetransport door convectie is in lucht het warmtetransport door geleiding klein. Over het algemeen zelfs zo klein dat warmtetransport door geleiding in lucht wordt verwaarloosd.

### 2.1 Rekenregels voor de praktijk

Zoals bij alle vormen van warmtetransport stroomt warmte door geleiding van een plaats met een hogere naar een plaats met een lagere temperatuur. De grootte van de warmtestroom is evenredig met het temperatuurverschil tussen de punten (of vlakken) waartussen de warmte stroomt. Daarnaast wordt de grootte van de warmtestroom bepaald door de geleiding en de dikte van het materiaal tussen de beide punten. De warmteoverdracht wordt weergegeven door de warmtestroomdichtheid voor geleiding ( $q_g$ ). In formulevorm:

$$q_g = (\lambda / d) \cdot (T_1 - T_2) \quad [W/m^2]$$

Hierbij is:

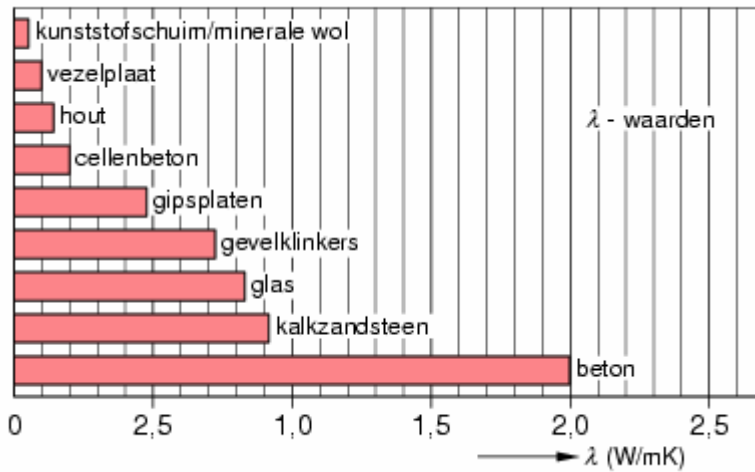
|             |  |
|-------------|--|
| $q_g$       | warmtestroomdichtheid voor geleiding [ $W/m^2$ ] |
| $\lambda$   | warmtegeleidingscoëfficiënt [ $W/mK$ ]           |
| $d$         | afstand waarover de warmtestroom plaatsheeft     |
| $T_1 - T_2$ | temperatuurverschil tussen de punten [ $K$ ]     |

De warmtegeleidingcoëfficiënt ( $\lambda = \text{lambda}$ ) geeft de mate aan waarin een materiaal warmte geleidt. Hoe hoger de  $\lambda$ , des te beter geleidt het materiaal warmte. Een grote  $\lambda$  betekent dat het materiaal een slechte warmte-isolator is. Hout heeft bij voorbeeld een lage  $\lambda$ , dus geleidt slecht en is een goede warmte-isolator. In tegenstelling tot metaal, dat een hoge  $\lambda$  heeft en dus een slechte warmte-isolator is. De dimensie van  $\lambda$  is  $W/mK$ .

De betekenis van deze grootte wordt hierdoor duidelijker: De hoeveelheid warmte die per seconde per vierkante meter bij een temperatuurverschil van 1 Kelvin over een lengte van 1 meter wordt getransporteerd. De warmtegeleidingcoëfficiënt geeft dus aan hoe groot het vermogen van een materiaal is om warmte te geleiden.

De warmtegeleidingcoëfficiënt van een materiaal kan in een laboratorium worden bepaald. De warmtegeleidingcoëfficiënten blijken enigszins temperatuurafhankelijk. Voor het temperatuurbereik waarmee we in de bouwfysica rekenen, wordt  $\lambda$  over het algemeen temperatuurafhankelijk aangenomen. De warmtegeleidingcoëfficiënten van bouwmaterialen lopen zeer sterk uiteen. Zo bedraagt de  $\lambda$  voor aluminium circa  $200 W/mK$ , voor gewapend beton  $2 W/mK$ , voor hout  $0,15 W/mK$  en voor isolatiemateriaal  $0,03$  à  $0,04 W/mK$ . De warmtegeleidingcoëfficiënt van beton is dus ruim tienmaal zo groot als die van hout en ruim

vijftigmaal zo groot als die van de meeste isolatiematerialen. De warmtegeleidingcoëfficiënt van aluminium is 5000 maal zo groot als die van de meeste isolatiematerialen.



figuur 1. enkele materialen met bijbehorende λ

### 3 Warmtetransport door convectie

Wanneer een voorwerp van plaats verandert, heeft hierdoor transport plaats van de warmte die in dat voorwerp is opgeslagen. We spreken dan van warmtetransport door convectie. Deze vorm van warmtetransport komen we vooral tegen in gassen en vloeistoffen. De moleculen kunnen zich hierin vrij bewegen en met dat bewegen wordt warmte getransporteerd. Als de bewegingen willekeurig zijn en de gemiddelde snelheid gelijk is aan nul, heeft er geen warmtetransport door convectie plaats. Als sprake is van een duidelijke stromingsrichting, dan heeft per saldo warmtetransport plaats. In de bouwfysica speelt met name warmtetransport door de stroming van lucht een belangrijke rol.

#### 3.1 Rekenregels voor de praktijk

In deze module wordt alleen ingegaan op warmtetransport door convectie, voor zover dat van belang is om het warmtetransport door een constructie te kunnen berekenen.

Warmtetransport door convectie komt bij een constructie voor ter plaatse van de overgang van lucht en constructie. Stel, de oppervlaktetemperatuur van een wand is hoger dan de temperatuur van de omringende lucht. De lucht vlakbij de wand (het grensvlak) zal door geleiding warmer worden. Als deze lucht vervolgens wordt afgevoerd, heeft daarmee warmtetransport plaats. De grootte van de warmtestroom (warmtestroomdichtheid) wordt bepaald door het temperatuurverschil tussen de constructie en door de snelheid van de langstromende lucht. We spreken van de warmtestroomdichtheid door convectie ( $q_c$ ). In formulevorm:

$$q_c = \alpha_c \cdot (T_1 - T_2) \quad [W/m^2]$$

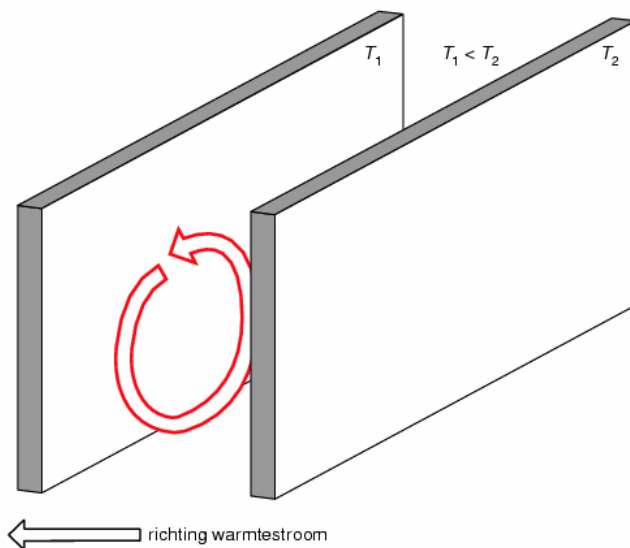
Hierbij is:

- $q_c$  warmtestroomdichtheid door convectie  $[W/m^2]$
- $\alpha_c$  warmteovergangcoëfficiënt voor convectie  $[W/m^2 K]$
- $T_1 - T_2$  temperatuurverschil tussen de langstromende lucht en de muur  $[K]$

De gegeven formule voor de warmtestroomdichtheid door convectie ( $q_c$ ), is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Niettemin kan de formule goed gebruikt worden voor het berekenen van bij voorbeeld de warmteweerstand van een constructie.

De warmteovergangscoefficiënt ( $\alpha_c$ ) in de formule geeft de warmteovergang aan.  $\alpha_c$  is met name afhankelijk van de snelheid van de langsstromende lucht. Voor buiten, waar de luchtsnelheid langs de constructie in het algemeen groot is, wordt bij eenvoudige berekeningen uitgegaan van  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$  voor de winterperiode en  $15 \text{ W/m}^2\text{K}$  voor de zomerperiode. Een temperatuurverschil tussen de constructie en de langsstromende lucht van  $5 \text{ K}$  zorgt in de winter voor een warmtestroomdichtheid van  $100 \text{ W/m}^2$ . Voor binnen kan bij eenvoudige berekeningen uitgegaan worden van een  $\alpha_c$  van  $2$  à  $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

De warmteovergangscoefficiënt wordt uitgedrukt in  $\text{W/m}^2\text{K}$ . In woorden: de warmtestroom ( $W$ ) per  $\text{m}^2$  oppervlak bij een temperatuurverschil van  $1 \text{ K}$ .



figuur 2. warmtetransport van het ene oppervlak naar het andere

#### 4 Warmtetransport door straling

Behalve door geleiding en convectie kan warmteoverdracht ook plaatshebben door straling. Aan het oppervlak van elk voorwerp warmer dan  $0 \text{ K}$  ( $-273 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wordt inwendige energie omgezet in elektromagnetische stralingsenergie. De energiestroom die op deze wijze een voorwerp verlaat (zgn. emissie = uitstraling), neemt toe als de temperatuur van het betreffende lichaamsoppervlak toe neemt. Door de emissie van straling wordt warmte aan het oppervlak onttrokken. De mate van emissie wordt bepaald door de oppervlaktetemperatuur van het voorwerp dat straalt en de zogenaamde emissiefactor ( $\epsilon = \text{epsilon}$ ). De emissiefactor heeft een waarde groter dan  $0$  en kleiner dan  $1$ . Hoe kleiner de emissiefactor, hoe kleiner de stralingsuitwisseling.

De meeste materialen hebben een emissiefactor die in de buurt van de  $0,9$  ligt. Gladde metaaloppervlakken kunnen een veel lagere emissiefactor hebben. Zo hebben bij voorbeeld gepolijst aluminium of metaal een emissiefactor van circa  $0,05$ . Hiervan wordt gebruik gemaakt in zogenaamde HR-beglazing. Dit is dubbele beglazing, waarop aan de spouwzijde van de binnenste glasplaat een uiterst dunne laag metaal is opgedampt. Door deze metaallaag (lage emissiefactor) wordt de stralingsuitwisseling tussen de beide glasbladen verminderd.

#### 4.1 Absorptie van stralingsenergie

De straling die door gebouwdelen wordt geëmitteerd, ligt in het infrarood gebied en is dus onzichtbaar. Dit warmtetransport is niet materiaalgebonden 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 plaatshebben. De stralingsenergie wordt bij absorptie in warmte omgezet.

Zoals blijkt uit het voorgaande is voor warmteoverdracht via straling zowel emissies als absorptie nodig. De mate waarin opvallende straling wordt geabsorbeerd, wordt uitgedrukt met de absorptiefactor ( $\alpha$ ). De absorptiefactor ( $\alpha$ ) is gelijk aan de emissiefactor ( $\epsilon$ ).

#### 4.2 Rekenregels voor de praktijk

Warmtetransport door straling komt bij een constructie voor ter plaatse van de overgang van lucht en constructie. Stel, de oppervlaktetemperatuur van een scheidingsconstructie is lager dan de oppervlaktetemperatuur van een ander oppervlak waarmee het vlak straling uitwisselt. De constructie zal dan minder straling emitteren dan absorberen. Er is sprake van een warmtestroom naar het oppervlak van de constructie. De warmtestroom is evenredig met het temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken. Analoog met de overdracht bij warmteoverdracht door convectie, spreken we van de warmtestroomdichtheid door straling ( $q_s$ ).

In formulevorm:

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \quad [W/m^2]$$

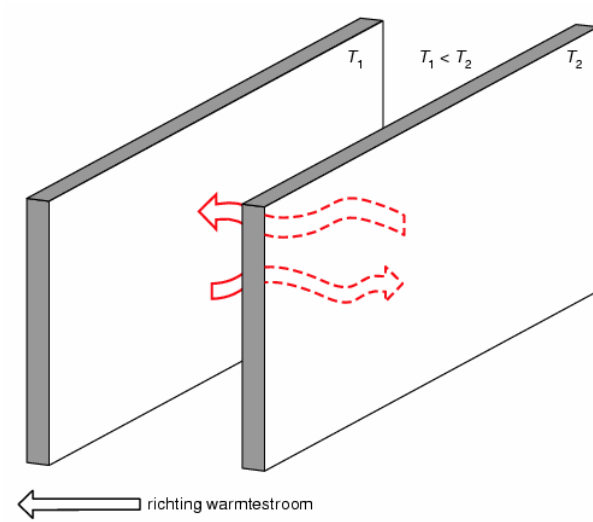
Hierbij is:

$q_s$  warmtestroomdichtheid door straling [ $W/m^2$ ]

$\alpha_s$  warmteovergangscoefficiënt voor straling [ $W/m^2 K$ ]

$T_1 - T_2$  temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken [K]

De gegeven formule voor de warmtestroomdichtheid door straling ( $q_s$ ), is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Niettemin kan de formule (evenals de formule bij convectie) goed gebruikt worden voor het berekenen van bij voorbeeld de warmteweerstand van een constructie. De warmteovergangscoefficiënt ( $\alpha_s$ ) in de formule is afhankelijk van de emissiefactor van het oppervlak en van de temperatuur. Voor eenvoudige berekeningen wordt uitgegaan van  $5 W/m^2K$ .



figuur 3. warmtetransport van het ene oppervlak naar het andere

De stof die in deze module wordt behandeld vormt de basis voor het berekenen van de warmteweerstand en de warmtedoorgangscoefficient van een constructie.