

Deel 2. WARMTEOVERDRACHT

- Warmteoverdrachtsmechanismen
- Stationaire warmtegeleiding
- Transiënte warmtegeleiding
- Gedwongen convectie
- Natuurlijke convectie
- Warmtewisselaars

Hfdst 8:

Warmteoverdrachtsmechanismen

1. Inleiding
2. Geleiding
3. Convectie
4. Straling
5. Simultane warmteoverdrachtsmechanismen

1. Inleiding

- **Warmte** = vorm van energie die overgedragen kan worden van ene naar andere systeem ten gevolge van een *temperatuursverschil*.
- **Thermodynamische analyse**: betrekking op de *warmteHOEVEELHEID* die overgedragen wordt als het systeem een proces ondergaat van de ene evenwichtstoestand naar de andere.
- Wetenschap die zich bezighoudt met de *SNELHEID* van zo'n energieoverdracht: **warmteoverdracht**.

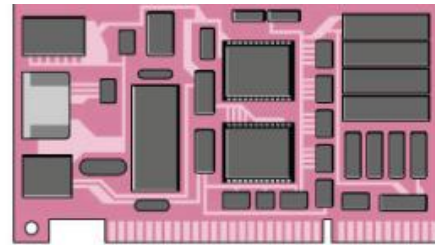
- Energieoverdracht als warmte: altijd van hoge T naar lage T
- Warmteoverdracht stopt als de 2 media gelijke T hebben bereikt
- Warmte kan op 3 manieren overgedragen worden
Geleiding, convectie, straling



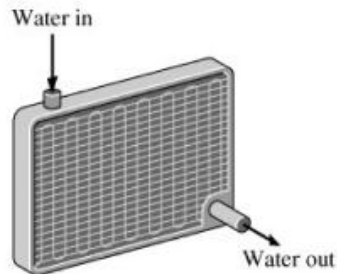
The human body



Air-conditioning systems



Circuit boards



Car radiators



Power plants



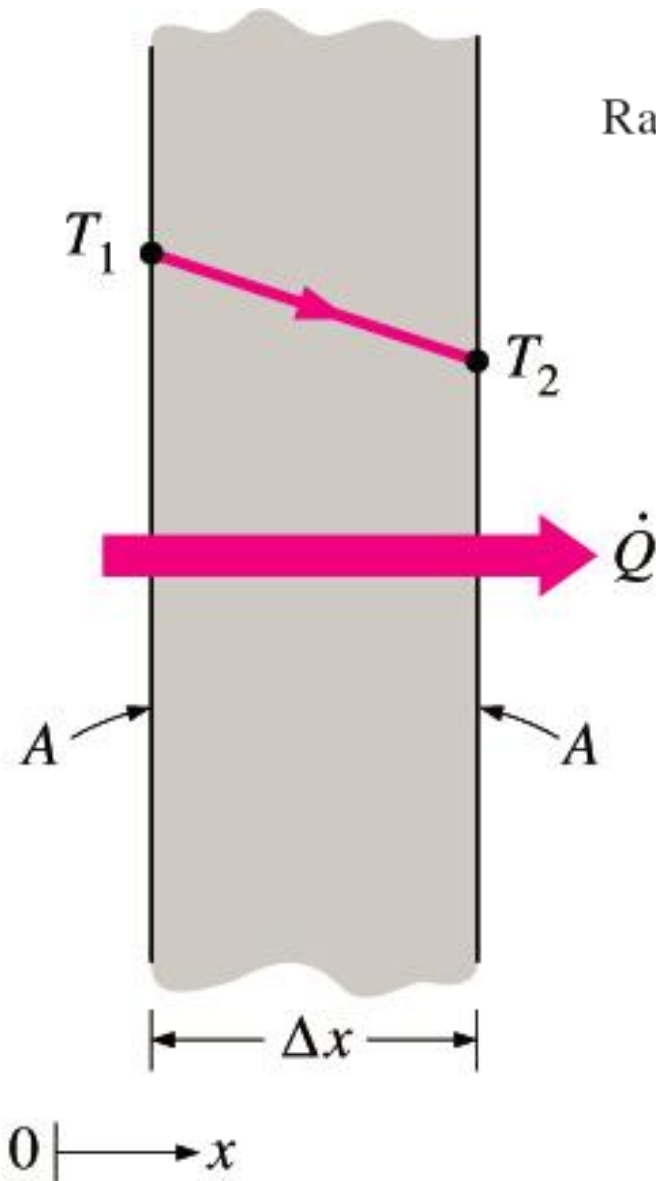
Refrigeration systems

2. Geleiding

- **Conductie**: energietransfer van de meer energetische deeltjes van een materie naar de aangrenzende minder energetische deeltjes ten gevolge van interacties tussen de deeltjes.
- In **gassen en vloeistoffen**: door **botsingen** en **diffusie** van moleculen
- In **vast stoffen**: combinatie van **vibraties** in een rooster en energietransport door **vrije elektronen**.
- Het warmtedebiet is afh. van medium en temperatuursverschil

$$\text{Rate of heat conduction} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Temperature difference})}{\text{Thickness}}$$

• Wet van Fourier



Rate of heat conduction $\propto \frac{(\text{Area})(\text{Temperature difference})}{\text{Thickness}}$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W})$$

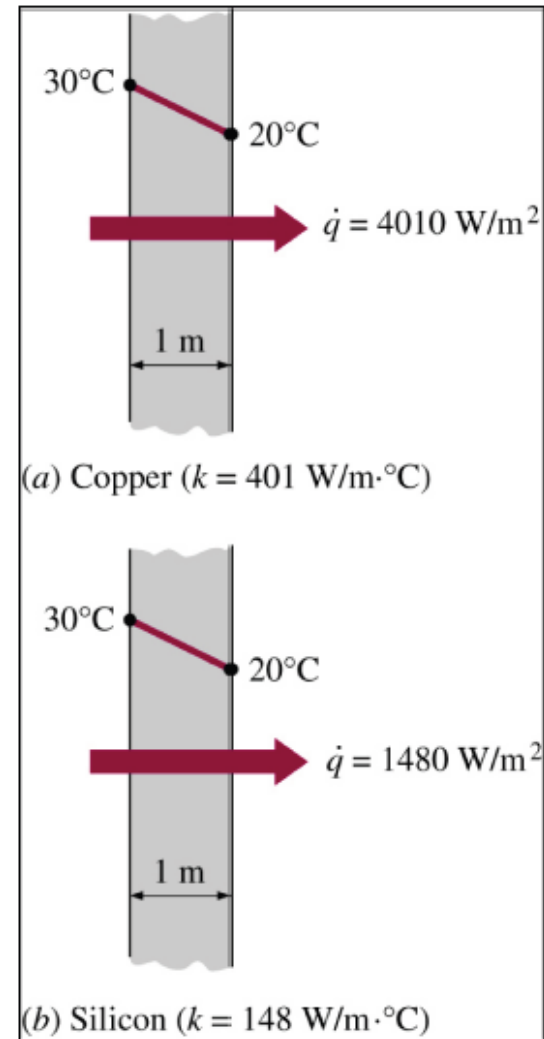
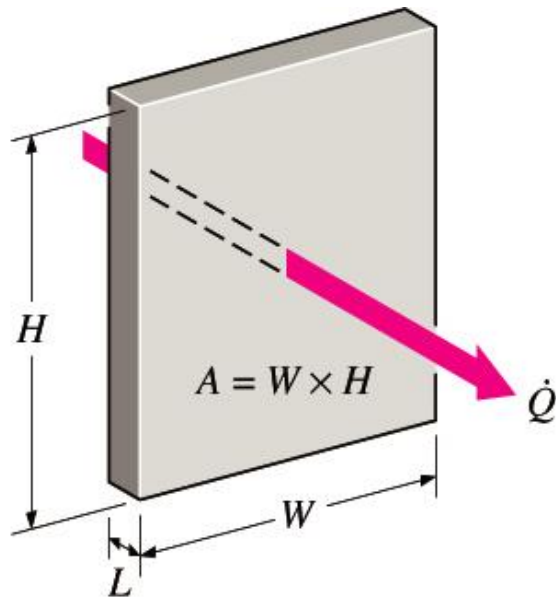
Als $x \rightarrow 0$:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}$$

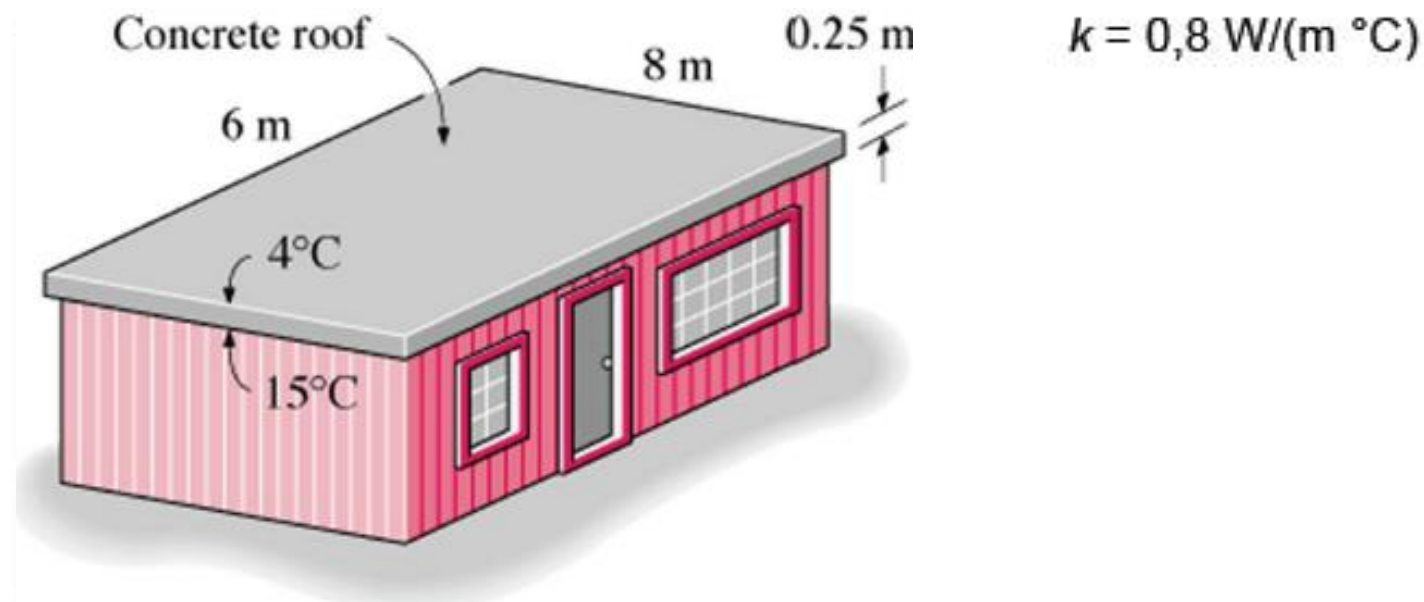
Geleidbaarheidscoeff. k : een maat voor de mogelijkheid om warmte te geleiden.

Temperatuursgradiënt dT/dx : de helling van de temperatuurscurve op een T - x – diagram.

- Negatief teken zodat warmteoverdracht een positieve hoeveelheid is in de positieve x-richting.
- Warmteflux of warmte debiet $\propto k$
- Oppervlakte A staat loodrecht op de warmteoverdrachtsrichting



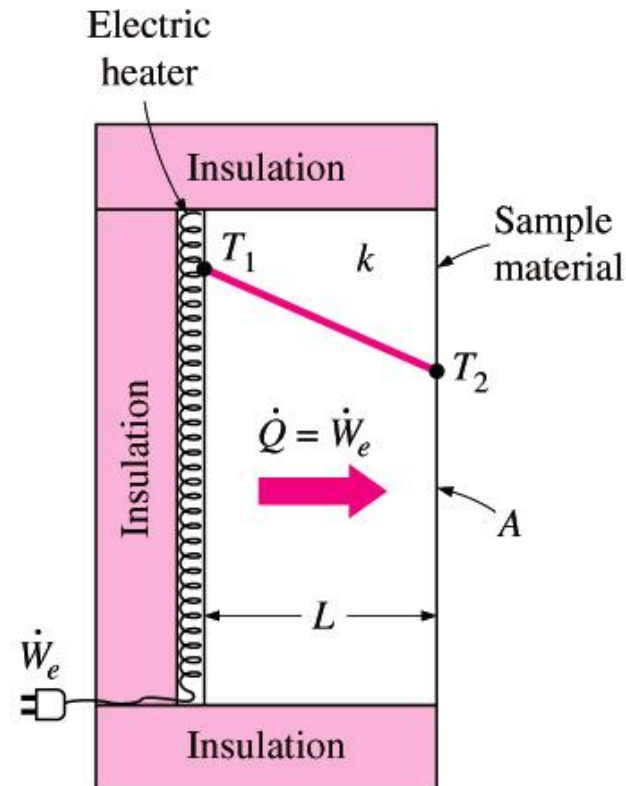
- Voorbeeld: warmteverlies door een dak



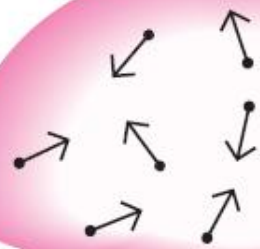
Bepaal het warmteverlies (debiet).

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C})(48 \text{ m}^2) \frac{(15 - 4)^\circ\text{C}}{0.25 \text{ m}} = 1690 \text{ W}$$

- De **thermische geleidbaarheid** van een materiaal is een maat voor het vermogen van het materiaal om warmte te geleiden.
 - Hoge waarde: goede warmtegeleiding
 - Lage waarde: isolator



$$k = \frac{L}{A(T_1 - T_2)} \dot{Q}$$



GAS

- * Molecular collisions
- * Molecular diffusion

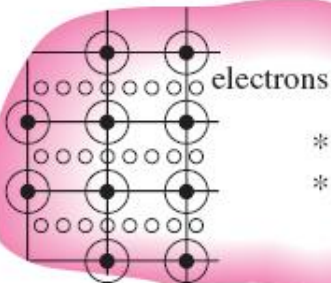
Geleiding: De overdracht van energie van meer energetische deeltjes van een substantie naar de nabijgelegen deeltjes met minder energie ten gevolge van de interactie tussen de deeltjes.



LIQUID

- * Molecular collisions
- * Molecular diffusion

In **gassen en vloeistoffen**, is de geleiding te wijten aan de **botsingen** en **diffusie** van de moleculen gedurende hun willekeurige beweging.



SOLID

- * Lattice vibrations
- * Flow of free electrons

In **vaste stoffen** is de energietoeverdracht te wijten aan een combinatie van **vibraties** van de moleculen in een rooster en de energietransport door **vrije elektronen**.

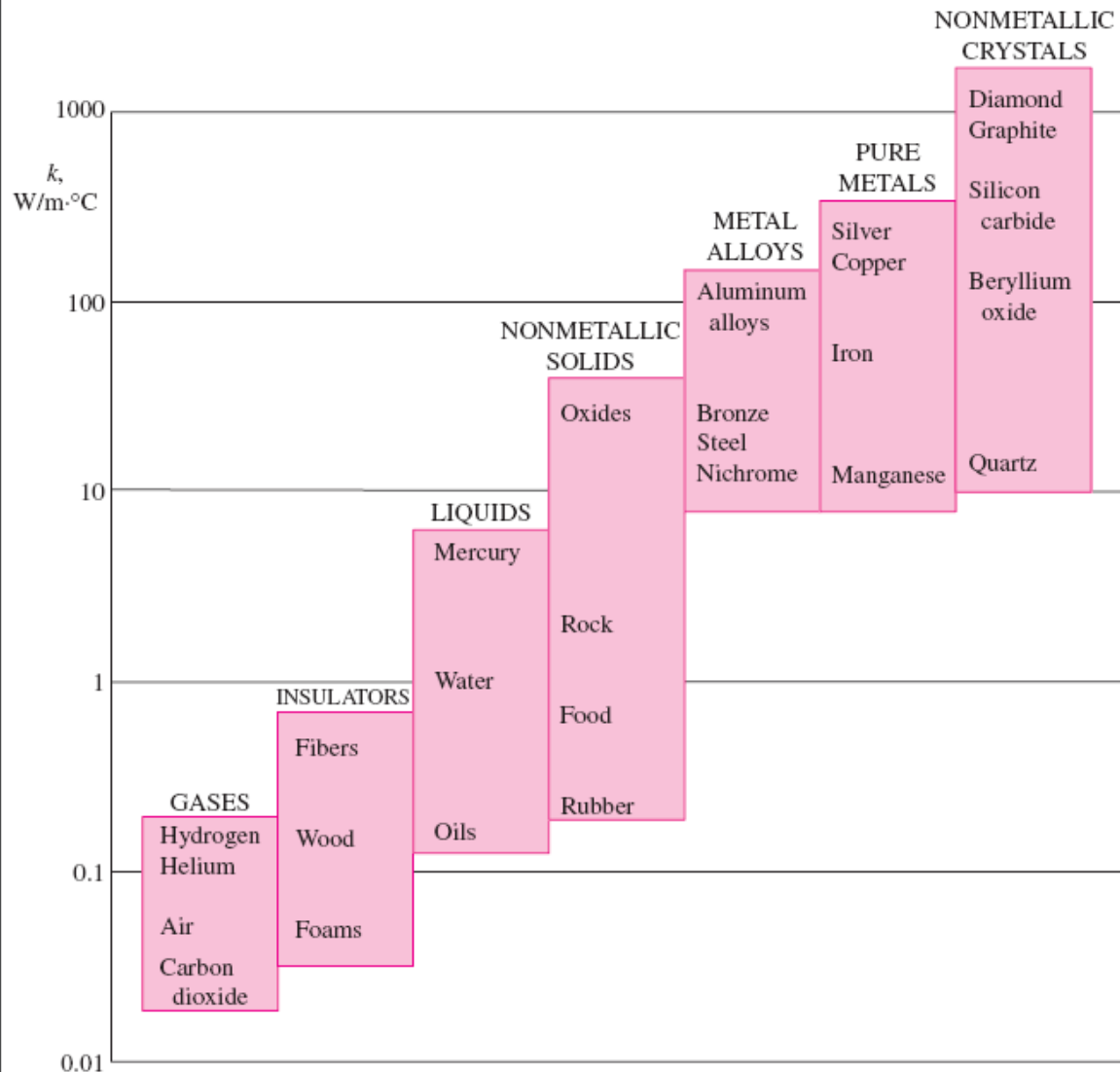
• Thermische geleidbaarheidscoëfficiënt k

TABLE 16-1

The thermal conductivities of some materials at room temperature

| Material | k , W/m · °C* |
|----------------------|-----------------|
| Diamond | 2300 |
| Silver | 429 |
| Copper | 401 |
| Gold | 317 |
| Aluminum | 237 |
| Iron | 80.2 |
| Mercury (l) | 8.54 |
| Glass | 0.78 |
| Brick | 0.72 |
| Water (l) | 0.613 |
| Human skin | 0.37 |
| Wood (oak) | 0.17 |
| Helium (g) | 0.152 |
| Soft rubber | 0.13 |
| Glass fiber | 0.043 |
| Air (g) | 0.026 |
| Urethane, rigid foam | 0.026 |

*Multiply by 0.5778 to convert to Btu/h · ft · °F.

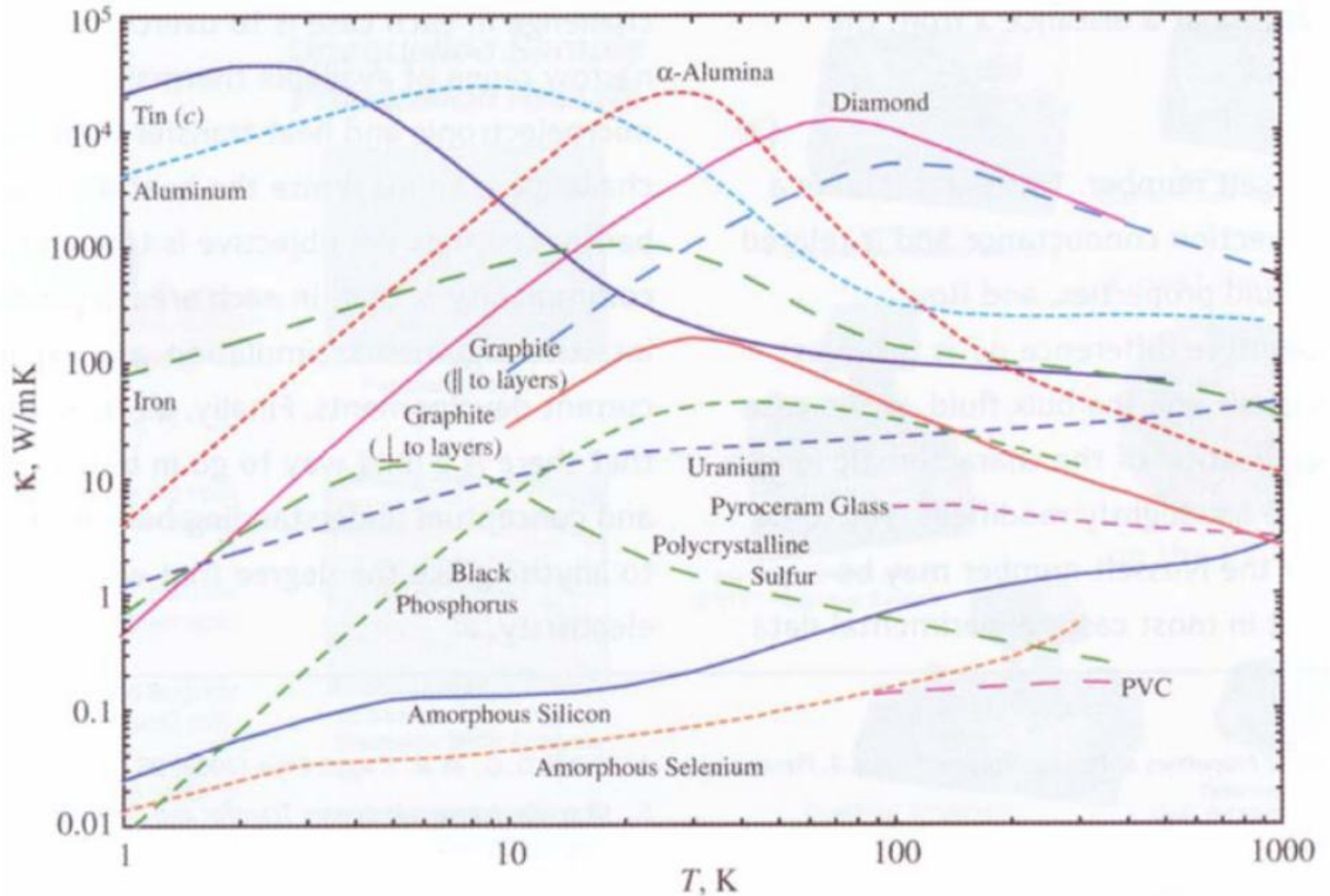


De warmtegeleidbaarheid van een legering is veel lager dan die van de afzonderlijke metalen.

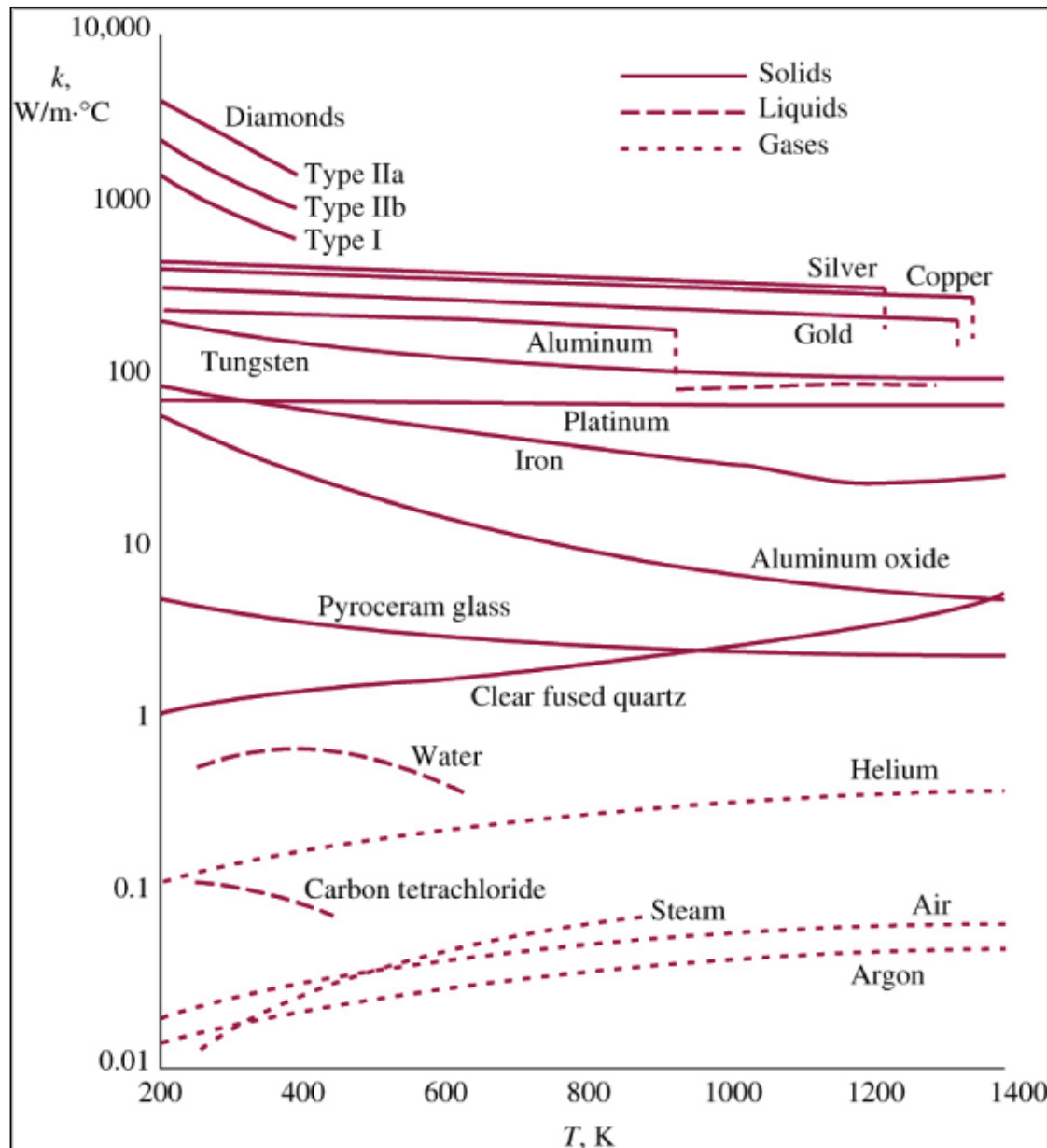
The thermal conductivity of an alloy is usually much lower than the thermal conductivity of either metal of which it is composed

| Pure metal or alloy | k , W/m · °C, at 300 K |
|--|--------------------------|
| Copper | 401 |
| Nickel | 91 |
| <i>Constantan</i> (55% Cu, 45% Ni) | 23 |
| Copper | 401 |
| Aluminum | 237 |
| <i>Commercial bronze</i> (90% Cu, 10% Al) | 52 |

Thermische geleidbaarheid bij lage T



● Invloed van de temperatuur op k

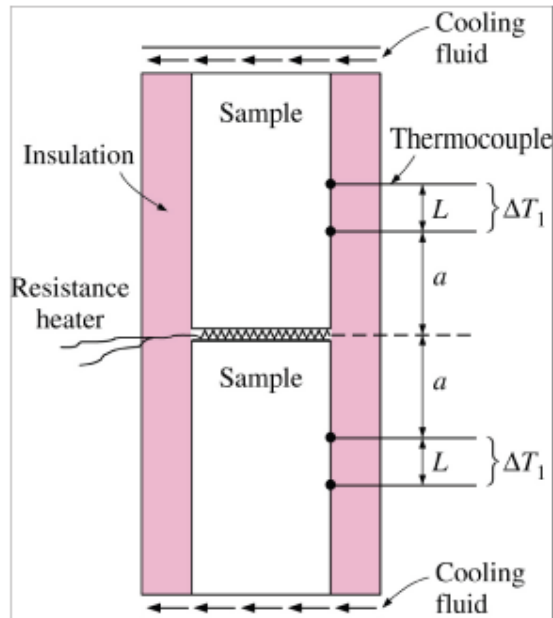


Thermal conductivities of materials vary with temperature

| T, K | $k, \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ | |
|---------------|--------------------------------------|----------|
| | Copper | Aluminum |
| 100 | 482 | 302 |
| 200 | 413 | 237 |
| 300 | 401 | 237 |
| 400 | 393 | 240 |
| 600 | 379 | 231 |
| 800 | 366 | 218 |

Kristallijne vaste stoffen (bvb. diamant of halfgeleiders (silicium)) geleiden goed de warmte maar zijn slechte elektrische geleiders.

• Voorbeeld: Bepaling van de thermische geleidbaarheid van een materiaal



- cilindrische stalen: diameter = 5 cm en lengte = 10 cm
- stalen staan 3 cm van elkaar
- elektrische verwarmers: 0,4 A, 110 V
- beide differentiële thermometers geven een temperatuurverschil van 15°C

Bepaal de thermische geleidbaarheid van het staal.

$$\dot{W}_e = VI = (110 \text{ V})(0.4 \text{ A}) = 44 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \dot{W}_e = \frac{1}{2} \times (44 \text{ W}) = 22 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{L} \rightarrow k = \frac{\dot{Q}L}{A \Delta T} = \frac{(22 \text{ W})(0.03 \text{ m})}{(0.00196 \text{ m}^2)(15^\circ\text{C})} = 22.4 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

- Thermische diffusiviteit

c_p Specifieke warmte, J/kg · °C:

Warmtecapaciteit per eenheid massa

ρc_p Warmtecapaciteit, J/m³ · °C:

Warmtecapaciteit per eenheid volume

α Thermische diffusiviteit, m²/s: Hoe snel warmte door materiaal kan diffunderen

$$\alpha = \frac{\text{warmtegeleiding}}{\text{warmte opgeslagen}} = \frac{k}{\rho C_p}$$

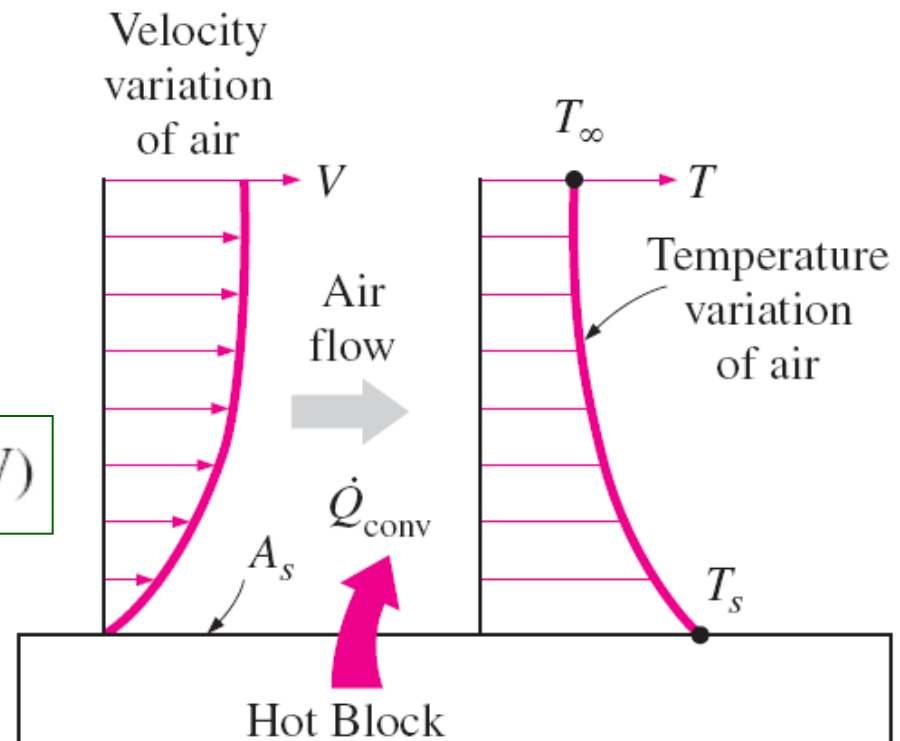
The thermal diffusivities of some materials at room temperature

| Material | α , m ² /s* |
|------------------|-------------------------------|
| Silver | 149×10^{-6} |
| Gold | 127×10^{-6} |
| Copper | 113×10^{-6} |
| Aluminum | 97.5×10^{-6} |
| Iron | 22.8×10^{-6} |
| Mercury (l) | 4.7×10^{-6} |
| Marble | 1.2×10^{-6} |
| Ice | 1.2×10^{-6} |
| Concrete | 0.75×10^{-6} |
| Brick | 0.52×10^{-6} |
| Heavy soil (dry) | 0.52×10^{-6} |
| Glass | 0.34×10^{-6} |
| Glass wool | 0.23×10^{-6} |
| Water (l) | 0.14×10^{-6} |
| Beef | 0.14×10^{-6} |
| Wood (oak) | 0.13×10^{-6} |

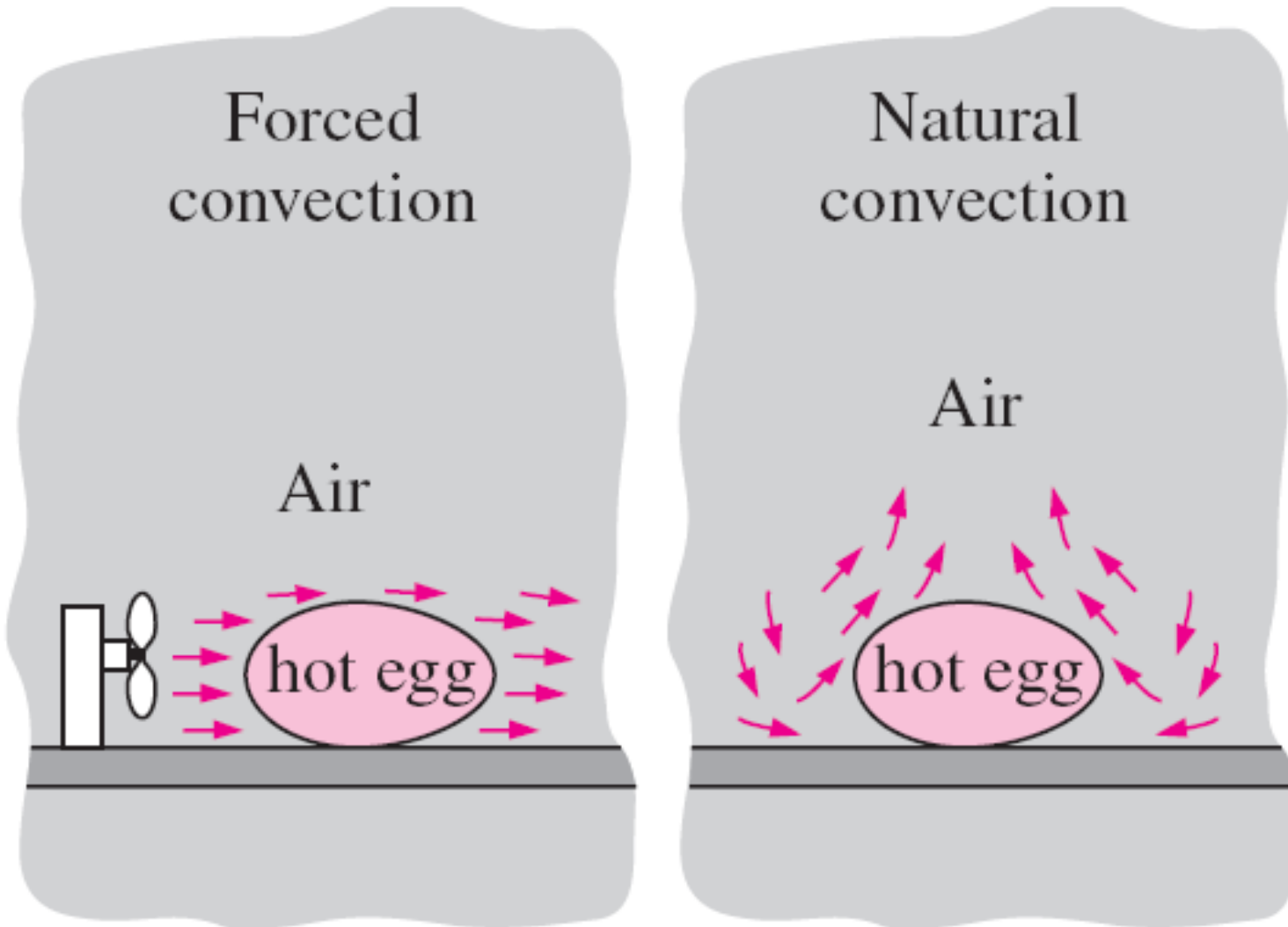
3. Convection

- Convection = geleiding + stroming
- Warmteoverdrachtsprocessen met faseverandering worden ook als convection beschouwd (wegens fluidumbewegingen geïnduceerd tijdens het proces)
- **Wet van Newton:**
(voor koeling)

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{W})$$



- Gedwongen en natuurlijke convector



Densiteitsverschillen in het fluïdum wegens temperatuursverschillen.

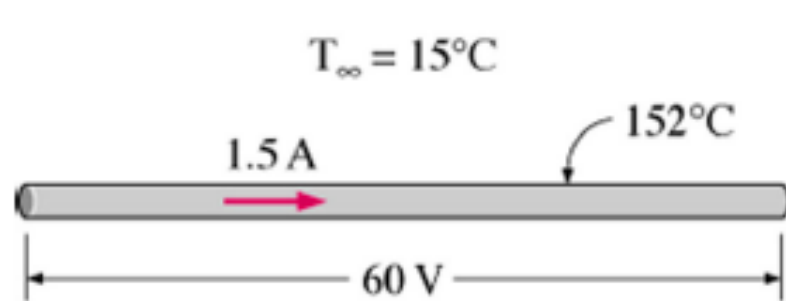
• Warmteoverdrachtscoëfficiënt h

- Experimenteel te bepalen.
- Hangt van variabelen af die een invloed hebben op de convectie:
 - de geometrie van de oppervlakte,
 - de natuur van de stroming,
 - eigenschappen van het fluïdum,
 - de snelheid van het fluïdum ver van het oppervlak.

Typical values of convection heat transfer coefficient

| Type of convection | h , W/m ² · °C* |
|------------------------------|------------------------------|
| Free convection of gases | 2–25 |
| Free convection of liquids | 10–1000 |
| Forced convection of gases | 25–250 |
| Forced convection of liquids | 50–20,000 |
| Boiling and condensation | 2500–100,000 |

- Voorbeeld: Bepalen van de warmteoverdrachtscoëfficiënt



Electrische draad:

- 2 m lang
- diameter = 0,3 cm

Bepaal de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor warmteoverdracht tussen de draad en de lucht in de ruimte.

$$\dot{Q} = \dot{E}_{\text{generated}} = VI = (60 \text{ V})(1.5 \text{ A}) = 90 \text{ W}$$

$$h = \frac{\dot{Q}_{\text{conv}}}{A_s(T_s - T_{\infty})} = \frac{90 \text{ W}}{(0.01885 \text{ m}^2)(152 - 15)^{\circ}\text{C}} = 34.9 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

4.Straling

- Straling = energie-emissie in de vorm van **elektromagnetische golven** als gevolg van verandering in de elektronische configuratie van atomen of moleculen
- Geen medium nodig om warmte over te dragen
- Warmteoverdracht is snelst (zonne-energie)
- Geïnteresseerd in **thermische straling**. Is vorm van straling geëmitteerd door lichamen wegens hun temperatuur
- **Alle lichamen met een temperatuur boven het absolute nulpunt emitteren straling.**

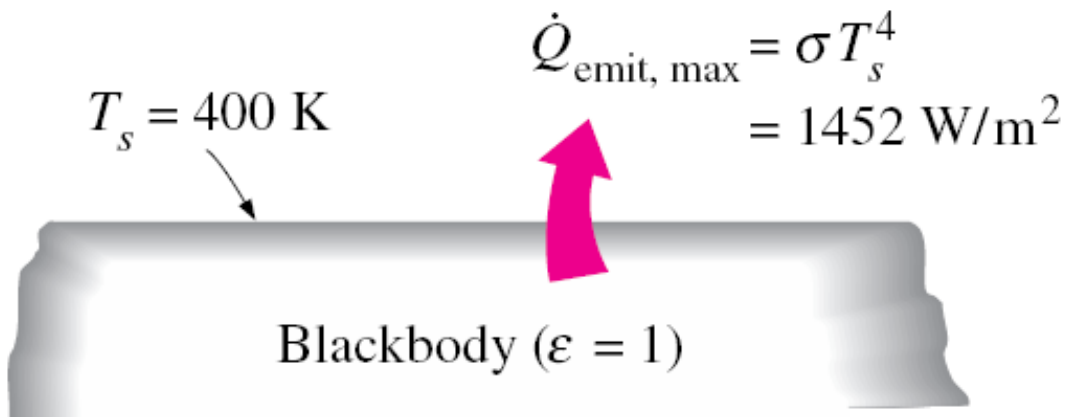
- Wet van Stefan-Boltzmann: $\dot{Q}_{\text{emit, max}} = \sigma A_s T_s^4$ (W)

- T_s in Kelvin! (absolute temperatuur)
- Stefan-Boltzmannconstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- Zwart-lichaam-emissiviteit $\varepsilon = 1$

Zwart-lichaam: de geïdealiseerde opp. die straling emitteert aan maximaal debiet

Emissiviteit ε : maat voor hoe dicht opp. een zwart-lichaam benadert; $0 \leq \varepsilon \leq 1$

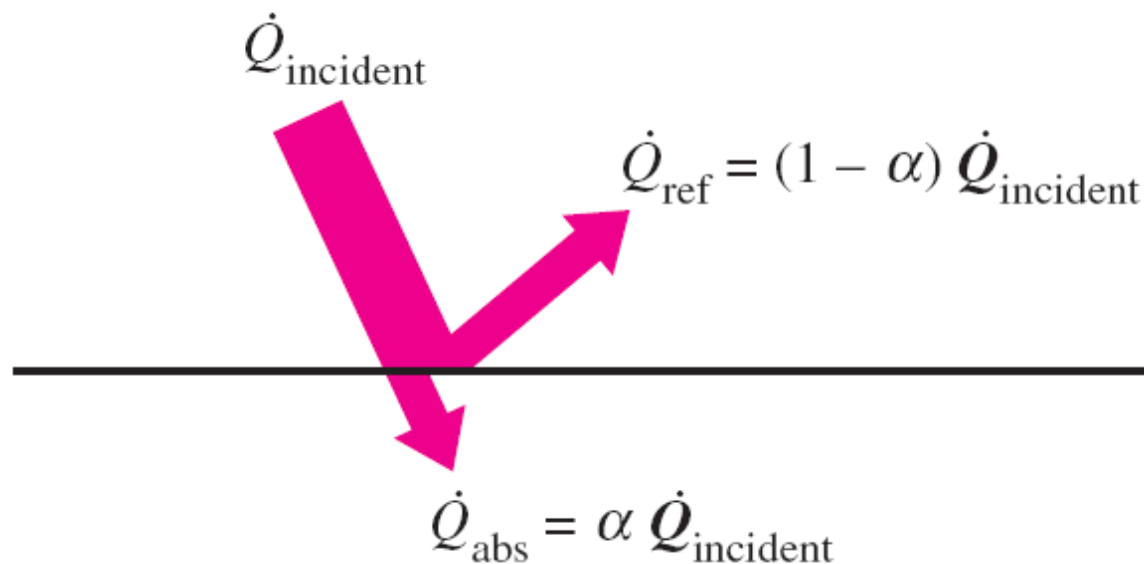
$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W})$$



Emissivities of some materials at 300 K

| Material | Emissivity |
|--------------------------|------------|
| Aluminum foil | 0.07 |
| Anodized aluminum | 0.82 |
| Polished copper | 0.03 |
| Polished gold | 0.03 |
| Polished silver | 0.02 |
| Polished stainless steel | 0.17 |
| Black paint | 0.98 |
| White paint | 0.90 |
| White paper | 0.92–0.97 |
| Asphalt pavement | 0.85–0.93 |
| Red brick | 0.93–0.96 |
| Human skin | 0.95 |
| Wood | 0.82–0.92 |
| Soil | 0.93–0.96 |
| Water | 0.96 |
| Vegetation | 0.92–0.96 |

- Absorptie en reflectie
 - Absorptiviteit α : de fractie van de invallende stralingsenergie op een oppervlak die geabsorbeerd wordt door de oppervlakte; $0 \leq \alpha \leq 1$
 - Zwart-lichaam: perfecte absorber: $\alpha = 1$
 - Wet van Kirchhoff: $\varepsilon = \alpha$ De emissiviteit en de absorptiviteit van een oppervlak bij een bepaalde temperatuur en golflengte zijn gelijk.

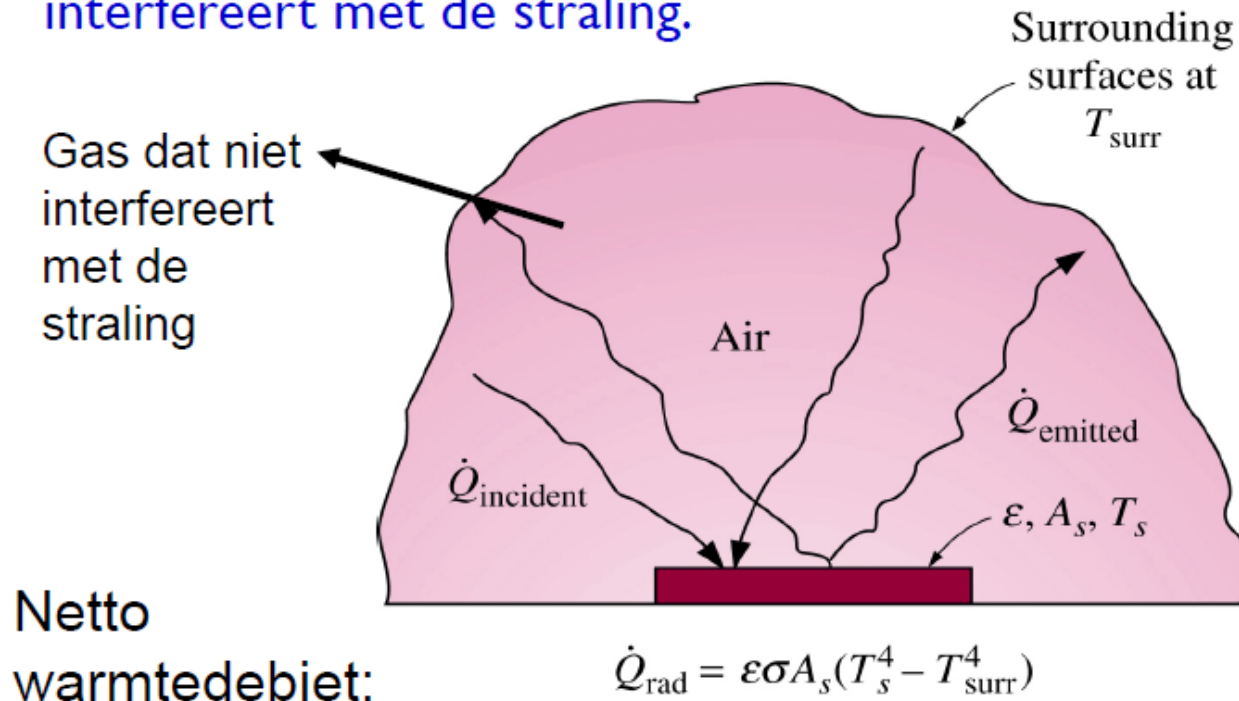


De absorptie van straling invallend op een niet-transparant ("opaque") oppervlak met een absorptiviteit α : een gedeelte van de invallende straling wordt gereflecteerd.

Netto-stralingswarmteoverdracht: het verschil tussen het stralingsdebiet geëmitteerd door de oppervlakte en diegene die geabsorbeerd wordt.

Wamteoverdracht door straling tussen een oppervlak en omgevende oppervlakken:

- oppervlak A_s volledig omgeven door veel groter (of zwart) oppervlak
- oppervlakken gescheiden door een gas (zoals lucht) dat niet interfereert met de straling.



- **Gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt:**
 - Straling en geleiding in parallel
 - Straling en convectie (beweging van het fluïdum) in parallel

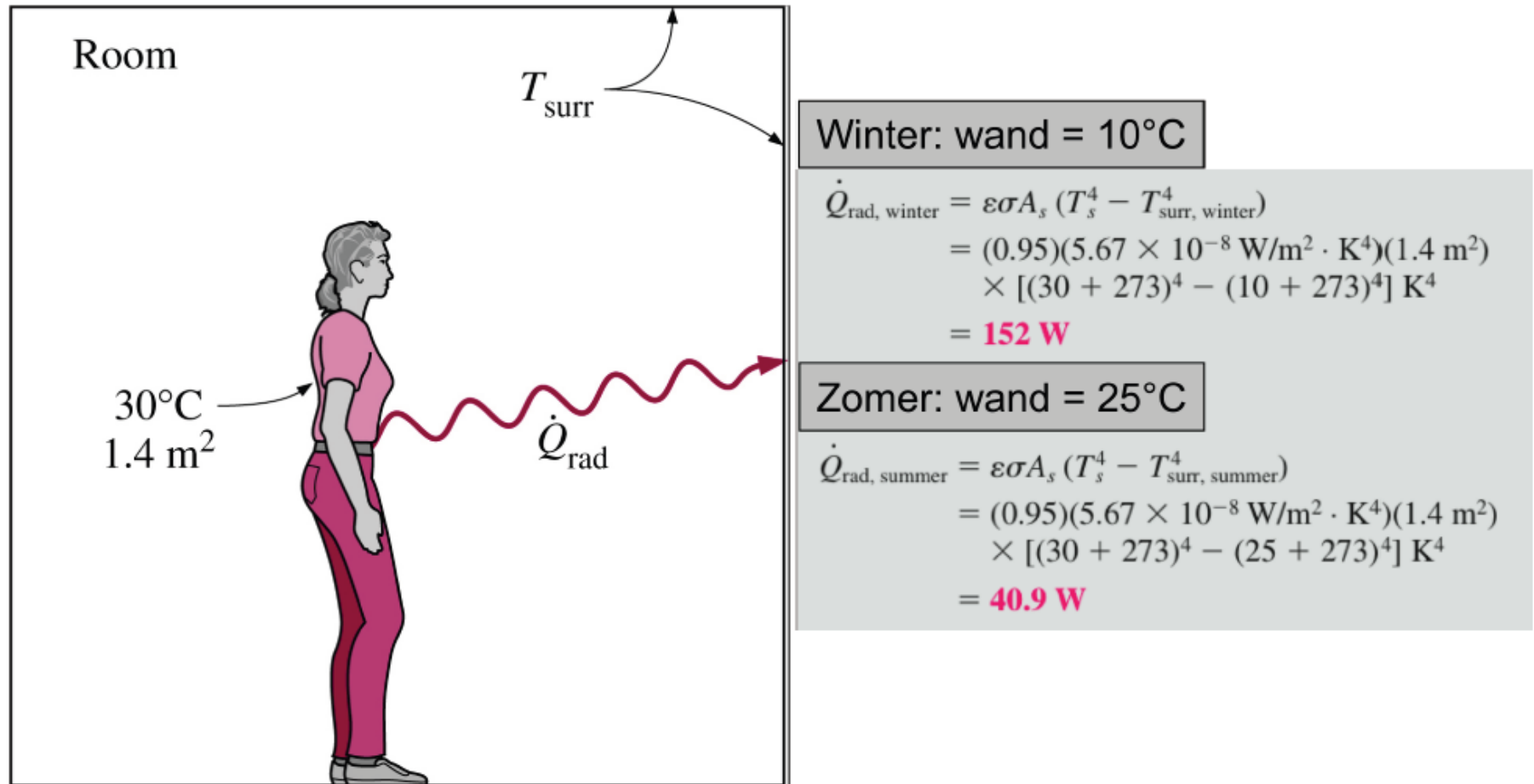
- **Totale warmtedebiet:**

$$\dot{Q}_{totaal} = h_{gecombineerd} A_s (T_s - T_{\infty})$$

De gecombineerde warmteoverdrachtscoëfficiënt $h_{gecombineerd}$ bevat de effecten van convectie (of geleiding) en straling.

- Straling is meestal significant t.o.v. geleiding of natuurlijke convectie, maar verwaarloosbaar t.o.v. gedwongen convectie.

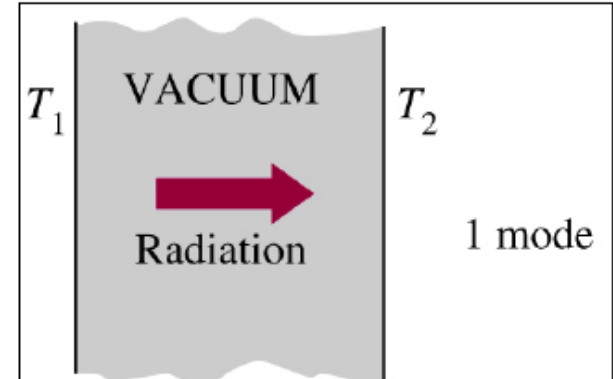
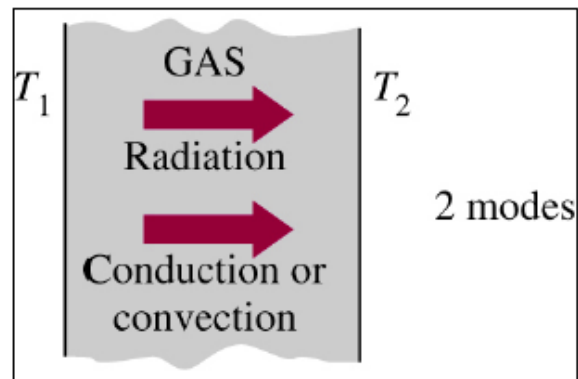
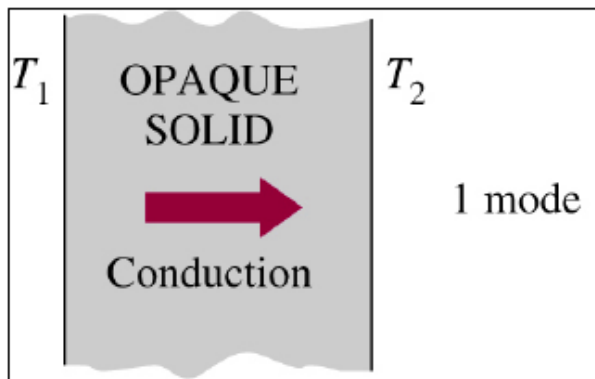
- **Voorbeeld:** Stralingseffect op thermisch comfort



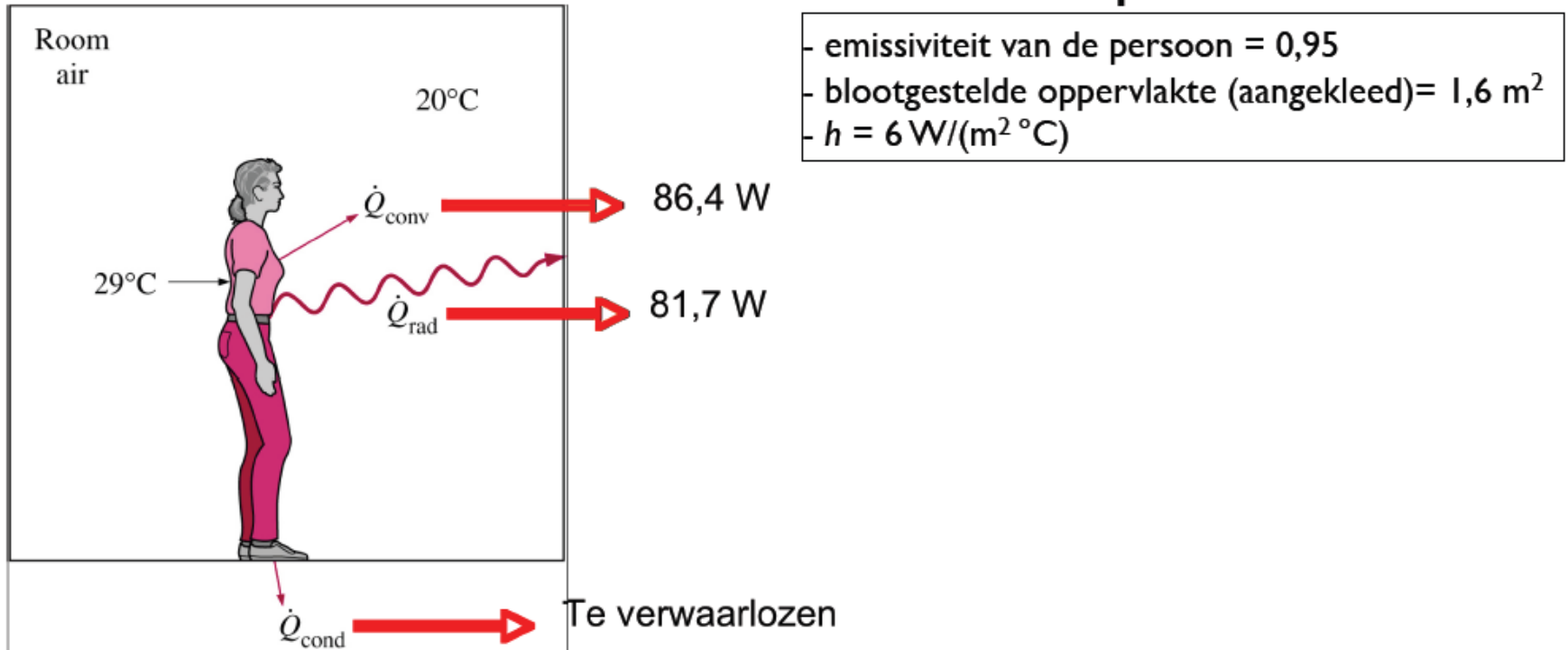
=> Warmteverlies in de winter bijna 4x groter
(koude gevoel in de winter).

5. Simultane warmteoverdrachtsmechanismen

- Er zijn 3 warmteoverdrachtsmechanismen,
enkel 2 kunnen tezamen voorkomen.



• Voorbeeld I: Warmteverlies van een persoon



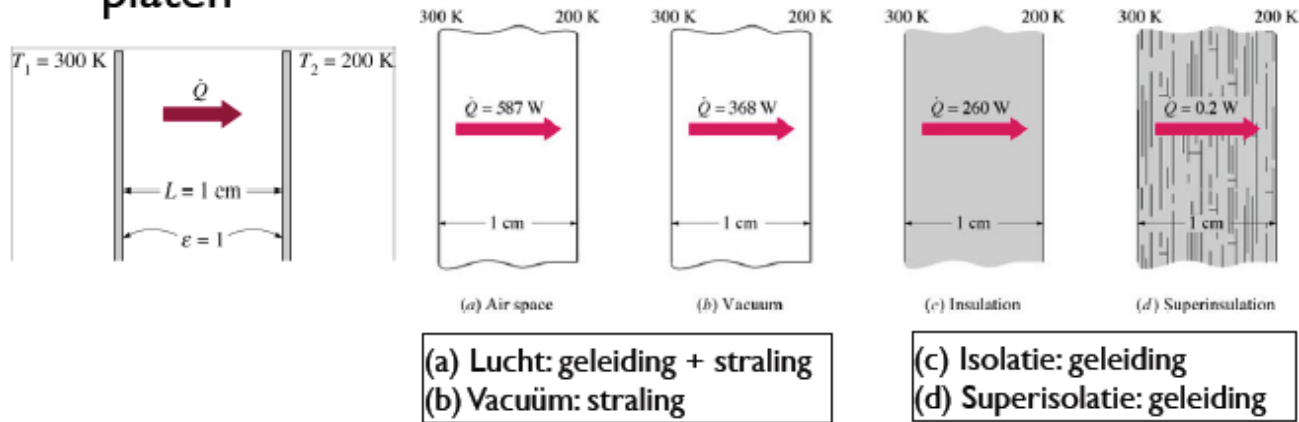
Bepaal het totale warmtedebiet afgestaan door een persoon.

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4)$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = (86.4 + 81.7) \text{ W} = \mathbf{168.1 \text{ W}}$$

- Voorbeeld 2: Warmteoverdracht tussen 2 isotherme platen**



Bepaal het warmtedebiet voor de 4 gevallen.

(a)

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.0219 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C})(1 \text{ m}^2) \frac{(300 - 200)^\circ\text{C}}{0.01 \text{ m}} = 219 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

$$= (1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1 \text{ m}^2)[(300 \text{ K})^4 - (200 \text{ K})^4] = 368 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = 219 + 368 = \mathbf{587 \text{ W}}$$

(b)

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{rad}} = \mathbf{368 \text{ W}}$$

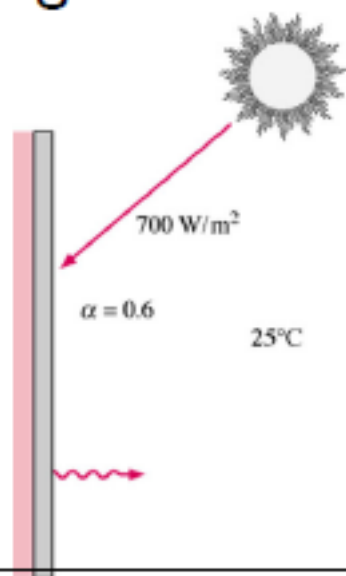
(c)

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.026 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C})(1 \text{ m}^2) \frac{(300 - 200)^\circ\text{C}}{0.01 \text{ m}} = \mathbf{260 \text{ W}}$$

(d)

$$\dot{Q}_{\text{total}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = (0.00002 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C})(1 \text{ m}^2) \frac{(300 - 200)^\circ\text{C}}{0.01 \text{ m}} = \mathbf{0.2 \text{ W}}$$

- Voorbeeld 3: Opwarming van een plaat door zonne-energie



$$h_{\text{gecombineerd}} = 50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Bepaal de oppervlaktetemperatuur van de plaat als het warmteverlies door convection en straling gelijk is aan de geabsorbeerde zonneënergie.

$$\dot{E}_{\text{gained}} = \dot{E}_{\text{lost}} \quad \text{or} \quad \alpha A_s \dot{q}_{\text{incident, solar}} = h_{\text{combined}} A_s (T_s - T_\infty)$$

$$T_s = T_\infty + \alpha \frac{\dot{q}_{\text{incident, solar}}}{h_{\text{combined}}} = 25^\circ\text{C} + \frac{0.6 \times (700 \text{ W/m}^2)}{50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = \mathbf{33.4^\circ\text{C}}$$