

### Varmetransport

(Y&F 17.7+39.5, H&S 13, L&H&L 18.1+2+4)

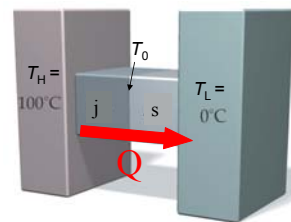
2. hovedsetning: Varme fra varmt til kaldt legeme (og fra varm til kald del av et legeme)

Avhengig av typen transport og materialegenskaper:

1. Varmeledning, Fouriers lov
2. Konveksjon (strømning)
3. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov

### Varmeledning, Eks. 1

∞ stort reservoar ∞ stort reservoar



$$\dot{Q} = \dot{Q}_j = \frac{A\kappa_j}{l_j}(T_H - T_0)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s = \frac{A\kappa_s}{l_s}(T_0 - T_L)$$

gir

$$\dot{Q} = \frac{T_H - T_0}{R_{tot}} = \frac{100 \text{ K}}{1,07 \text{ K/W}} = 94 \text{ W}$$

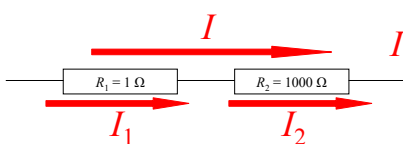
der varmeresistans =

$$R_{tot} = R_j + R_s = \frac{l_j}{A\kappa_j} + \frac{l_s}{A\kappa_s} = 1,07 \text{ K/W}$$

$A = 6,0 \text{ cm}^2$   
 $l_j = 4,0 \text{ cm}$   
 $l_s = 6,0 \text{ cm}$   
 $\kappa_j = 80 \text{ W/(K·m)}$   
 $\kappa_s = 429 \text{ W/(K·m)}$

### Strøm i serie

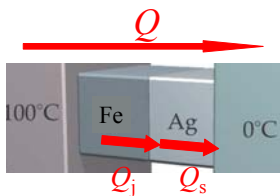
Elektrisk strøm



$$I = I_1 = I_2 !$$

Potensialfall  
 $\Delta V_i = R_i I$  ulik

Varmestrøm



$$Q = Q_j = Q_s !$$

Temperaturfall  
 $\Delta T = R_i Q$  ulik

### Varmetransport

1. Varmeledning, Fouriers lov  $\dot{Q} = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{R}$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = j = \kappa \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

strømtetthetsvektor:  $\vec{j} = \kappa \vec{\nabla} T$

2. Konveksjon (strømning).  
 Varmeovergang (vegg/luft):  $j = \alpha \Delta T$

3. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov

## Konveksjon

Fluid circulates by heating from through the surface

Heat input

Viktig for atmosfæren og vær

Towering Cumulus Stage    Mature Stage    Dissipating Stage

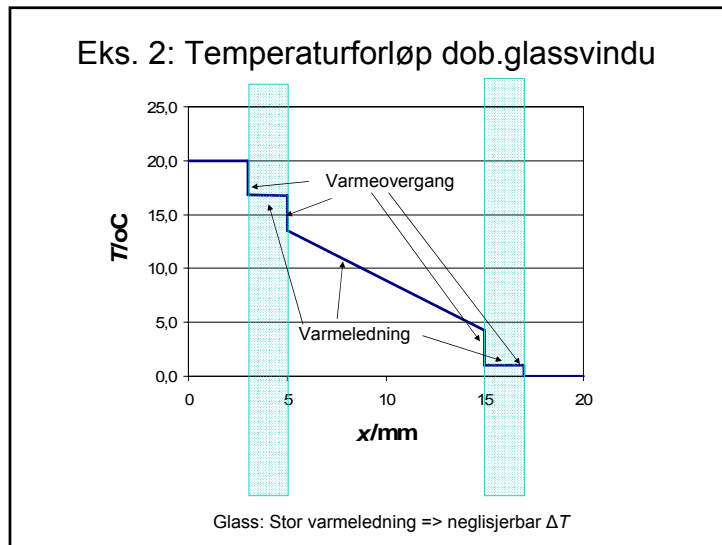
### Varmeledningsevne, $(k = ) \kappa$

For ulike materialer ved romtemp

Varmeovergangstall:  
 $\alpha_{\text{ute}} = 25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$   
 $\alpha_{\text{inne}} = 7,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$   
 $i \quad j = \alpha \Delta T$

Substance	$k \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$
<b>Metals</b>	
Aluminum	205.0
Brass	109.0
Copper	385.0
Lead	34.7
Mercury	8.3
Silver	406.0
Steel	50.2
<b>Solids (representative values)</b>	
Brick, insulating	0.15
Brick, red	0.6
Concrete	0.8
Cork	0.04
Felt	0.04
Fiberglass	0.04
Glass	0.8
Ice	1.6
Rock wool	0.04
Styrofoam	0.027
Wood	0.12-0.04
<b>Gases</b>	
Air	0.024
Argon	0.016
Helium	0.14
Hydrogen	0.14
Oxygen	0.023

Tipler & Mosca Tab. 20-3      © 2012 Pearson Education, Inc. Y&F Tab 17.5



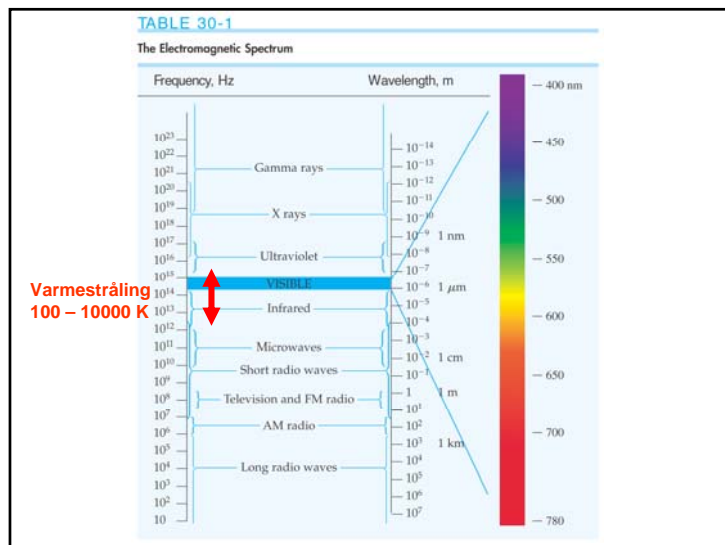
## Varmetransport

1. Varmeledning, Fouriers lov
2. Konveksjon (strømning).  
Varmeovergang vegg/luft
3. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov  
(Y&F 17.7+39.5, H&S 13.3, L&H&L 18.4)

Alle legemer sender ut e.m.stråling:  
Infrarødt ved romtemp, rødt - hvitt ved høyere temperaturer

Årsak: termiske vibrasjoner i molekyler = akselererende elektroner

Infrarød varmestråling:



## Emissivitet $e$ for ulike materialer

Materiale	$e$
Omhyggelig polert gull	0,02 - 0,03
Omhyggelig polert sølv	0,02 - 0,03
Omhyggelig polert messing	0,03
Oksydert messing	0,6
Polert aluminium og -folie	0,04 - 0,06
Upolert aluminium	0,06 - 0,07
Sterkt oksydert aluminium	0,2 - 0,3
Karbon: grafit	0,7 - 0,8
Karbon: sot på overflate	0,96
Glasert porselen	0,92
Gummi	0,85 - 0,95
Gips	0,93
Vann	0,95 - 0,96
Betong	0,85
Wolfram (glødetråd)	0,4 - 0,5

$$j = e \sigma T^4$$

Liten

Emissivitet  $e$   
=  
absorpsjonsevne  $a$

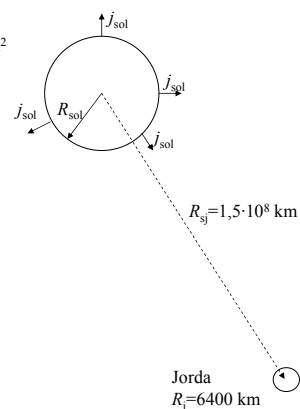
Stor

Fra Handbook og Physics & Chemistry og [www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)

## Eks. 3 Termisk stråling fra sola

$$j_{sol} = e \sigma T_{sol}^4 = 1,5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (5800)^4 \text{ W/m}^2 = 64 \text{ MW/m}^2$$

$$j_{sol} \text{ i alle retninger} \Rightarrow \text{total effekt: } P_{sol} = j_{sol} \cdot \pi R_{sol}^2 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



### Varmestråling:

- Alle legemer/overflater stråler ut el.magn.stråling:
- Stefan-Boltzmanns lov:  $j = e \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$

### Eks. 4: Menneskekroppen:

$$T = 32 \text{ }^\circ\text{C} = 305 \text{ K}, e = 0,8 \quad A = 1,8 \text{ m}^2$$

- $P_{ut} = e \sigma (305 \text{ K})^4 \cdot 1,8 \text{ m}^2 = 707 \text{ W}$  (naken kropp)
- 20 °C omgivelser:  
 $P_{inn} = e \sigma (293 \text{ K})^4 = 602 \text{ W}$       $P_{netto} = 105 \text{ W}$  (ut)
- 0 °C omgivelser:  
 $P_{inn} = e \sigma (273 \text{ K})^4 = 454 \text{ W}$       $P_{netto} = 253 \text{ W}$  (ut)
- Steikende sol 1,0 kW/m<sup>2</sup> :  
 $P_{inn} = e \cdot 1,0 \text{ kW/m}^2 \cdot 0,5 \text{ m}^2 + e \sigma (293 \text{ K})^4 \cdot 1,8 \text{ m}^2 = 1002 \text{ W}$   
 $P_{netto} = 295 \text{ W}$  (inn)

### Max Planck (1858 – 1947)

- Grunnlegger kvantemekanikk: 1900: Strålingens bølgelengdefordeling
- 1918: Nobelpris fysikk
- Plancks strålingslov:

$$I(\lambda) = \frac{dj}{d\lambda} = 2\pi hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1}$$

$\lambda_{\max}$  øker når  $T$  avtar  
 $\lambda_{\max} = 2898 \mu\text{m K} / T$

Y&F Figure 39.32



### Spør Adressa

Kontakt: INGRID BRISSACH  
 spor.adressa@adresseavisen.no

Intensitet (MW/m<sup>2</sup>/μm)  
 Bølgelengde (μm)  
 1 μm = 1000 nm

5773 K

Sola, som har en overflattetemperatur på ca. 5500 °C, sender ut mesteparten av sin stråling som grønt lys. Den sender også ut ganske mye blått og gult lys, mens intensiteten er vesentlig mindre i andre farger. I sum blir sola tilnærmet hvit.

Stjerner med overflattetemperatur på ca. 2500–3000 °C sender ut veldig mye av sin energi som varmestråling. Kun litt av energien sendes ut som lys, men mesteparten av denne andelen er rødt lys, mye mindre er gult og grønt lys og svært lite er blått. I sum ser en slik stjerne oransje eller rød ut.

Stjerner med overflattetemperatur på over 10 000 °C sender derimot ut mesteparten av sin energi som ultrafiolett stråling. Mesteparten av lyset fra så varme stjerner er fiolett og blått, litt er grønt og gult, mens kun en liten andel er rødt. Slike stjerner ser derfor i sum blå eller blåhvite ut.

http://phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum

Illustrasjon: http://phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum

BIRGER ANDRESEN  
 Leder, Tidsskrift Astronomiske Forening

### Eks 5: Temperaturforløp dob.glassvindu

varmeledning:  $j_1 = (T_H - T_1) / A \Sigma R_p$ ,  $A \Sigma R_i = A(R_{\text{overgang}} + R_{\text{glass}} + R_{\text{luft}}) = 0,83 \text{ m}^2\text{K/W}$

varmestråling:  $j_s = j_{\text{ut}} - j_{\text{inn}} = f\sigma T_H^4 - f\sigma T_L^4 \approx f\sigma 4T_m^3 (T_H - T_L) = 3,70 \text{ W/m}^2\text{K} (T_H - T_L)$   
 $f = (1-r)/(1+r) = 0,72$  der  $r = \text{refleksjonskoeffisient} \approx 0,16$

Totalt:  $j = (1,2 + 3,7) \text{ W/m}^2\text{K} (T_H - T_L)$  Stråling vesentlig bidrag!

### Varmetransport

- Varmedledning (Fouriers lov)**
  - Varmerstrøm (W):  $dQ/dt = \kappa A \Delta T / \Delta l = \Delta T / R$  er lik for alle lag gjennom f.eks. vindu.
  - Varmerstrømtetthet (W/m<sup>2</sup>):  $j = dQ/dt / A = -\kappa dT/dx$
- Konveksjon (materietransport) i gasser og væsker**
  - Varmerovergang:  $j = -\alpha \Delta T$  avhengig av konveksjon i overgangen
- Varmerstråling**
  - Alle legemer/overflater stråler ut el. magn. stråling, som øker sterkt med temperaturen  $T$ :  
 Stefan-Boltzmanns lov:  $j = e \sigma T^4$   $e = a$   
 $e = 1$  helt sorte overflater;  $e = 0$  helt blanke overflater
  - Linearisering:  $j = \sigma (T_H^4 - T_L^4) \approx \sigma 4T_m^3 (T_H - T_L)$ ,  $T_m$  mellom  $T_H$  og  $T_L$
  - Plancks strålingslov:
    - Bølgelengdefordelingen for strålingsintensiteten:  $j(\lambda, T)$ .
    - Wiens forskyvningslov:  $\lambda_{\max} T = 2898 \text{ nm K}$