

Varmetransport

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

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

Ulike typer transport:

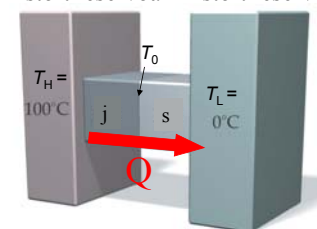
Innen et legeme:

1. Varmeledning, Fouriers lov
2. Konveksjon (strømning)

Mellom legemer:

3. Varmeovergang (mellom ulike legemer)
4. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov.

Varmeledning, Eks. 1



∞ stort reservoar ∞ stort reservoar

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

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

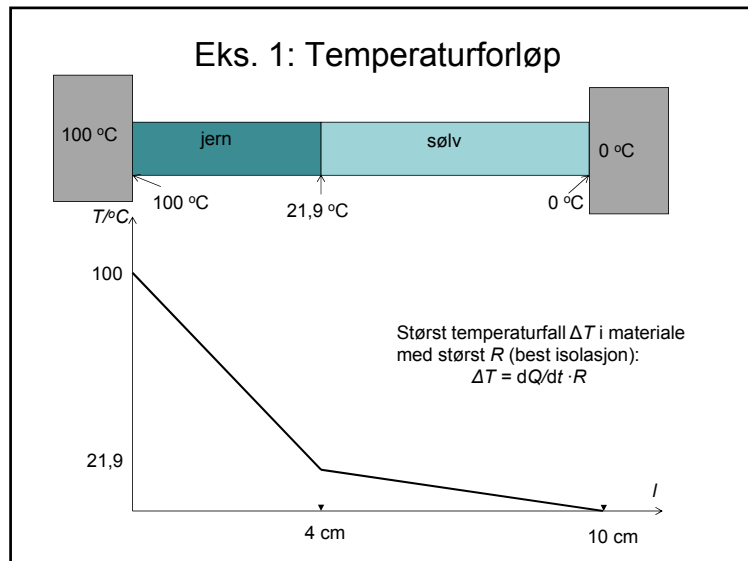
gir

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

der varmeresistans =

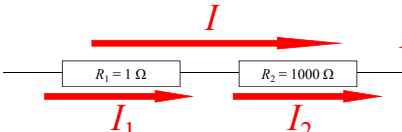
$$R_{\text{tot}} = R_j + R_s = \frac{l_j}{A\kappa_j} + \frac{l_s}{A\kappa_s} = 1,07 \text{ K/W}$$

$A = 6,0 \text{ cm}^2 = 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
 $l_j = 4,0 \text{ cm}$
 $l_s = 6,0 \text{ cm}$
 $\kappa_j = 80 \text{ W/(Km)}$
 $\kappa_s = 429 \text{ W/(Km)}$



Strøm i serie

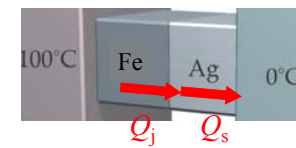
Elektrisk strøm



$I = I_1 = I_2 !$

Potensialfall $\Delta V_i = R_i I$ ulik

Varmestrøm



$Q = Q_j = Q_s !$

Temperaturfall $\Delta T = R_i Q$ ulik

Fouriers varmeledningslov, ulike former

$$\dot{Q} = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{1}{R} \Delta T$$

$$j = \frac{\dot{Q}}{A} = -\kappa \frac{dT}{dx}$$

$$\vec{j} = -\kappa \vec{\nabla} T$$

Ohms lov, ulike former

$$I = \sigma A \frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{1}{R} \Delta V$$

$$j = \frac{I}{A} = -\sigma \frac{dV}{dx}$$

$$\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla} V = \sigma \vec{E}$$

Strømtetthetsvektor: \vec{j}

Konduktivitet: κ og σ

Gradient(drivkraft): $-\vec{\nabla} T$ og $-\vec{\nabla} V = \vec{E}$

Apropos spørsmål forrige time om isokorer og isobarer i TS-diagram:

Prosesskurver i pV og i TS-diagram:

isotherm: $p \propto V^{-1}$
isentrop (adiabat): $p \propto V^{-\gamma}$

isochor: $T \propto \exp(S/nC_V)$
isobar: $T \propto \exp(S/nC_p)$

Konveksjon

Fluid cools by losing heat through the surface

Heat input

Viktig for atmosfæren og vær

Towering Cumulus Stage Mature Stage Dissipating Stage

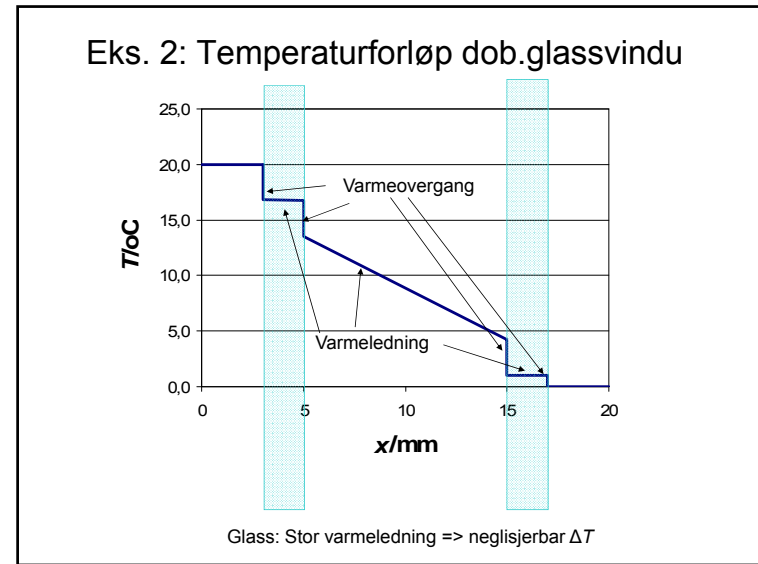
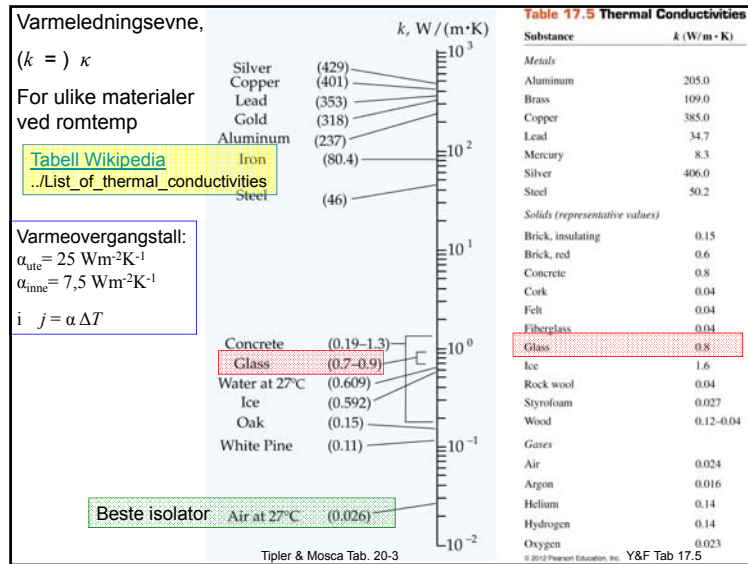
Varmetransport

1. Varmeledning, Fouriers lov

$$\dot{Q} = \kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{1}{R} \Delta T$$

$$j = \frac{\dot{Q}}{A} = -\kappa \frac{dT}{dx}$$

$$\vec{j} = -\kappa \vec{\nabla} T$$
2. Konveksjon (strømning).
3. Varmeovergang (vegg/luft)
4. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov.



Varmetransport

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

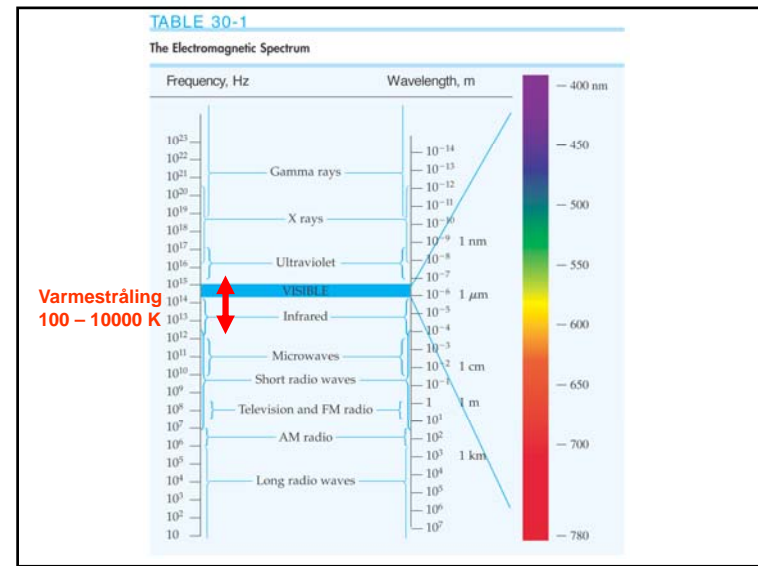
Josef Stefan,
eksperimenter 1879

Ludvig Boltzmann,
teori 1884

$j = e \sigma T^4$

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

Årsak: termiske vibrasjoner i molekyler = akselererende elektroner.



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: grafitt	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

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} i alle retninger => total effekt:
 $P_{sol} = j_{sol} \cdot 4\pi R_{sol}^2 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$

Soloverflata:
 $T_{sol} = 5800 \text{ K}$
 (5500 – 6000 K)

$R_{sj} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$

Jorda
 $R_j = 6400 \text{ km}$

- **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:
 $P_{inn} = e \sigma (293 \text{ K})^4 = 602 \text{ W} \quad P_{netto} = 105 \text{ W}$ (ut)
- 0 °C omgivelser:
 $P_{inn} = e \sigma (273 \text{ K})^4 = 454 \text{ W} \quad P_{netto} = 253 \text{ W}$ (ut)
- Steikende sol 1,0 kW/m² :
 $P_{inn} = e \cdot 1,0 \text{ kW/m}^2 \cdot 0,5 \text{ m}^2 + e \sigma (293 \text{ K})^4 \cdot 1,8 \text{ m}^2 = 1002 \text{ W}$
 $P_{netto} = 295 \text{ W}$ (inn)

Max Planck (1858 – 1947)

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

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

Interaktiv graf:
phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum

Spør Adressa

Kontakt INGRID BRISSACH Høst 2012
 spor.adressa@adresseavisen.no

Intensitet (MW/m²/μm) vs Bølgelengde (μm). T(K) = 5773. 1 μm = 1000 nm.

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.

Fra jordoverflaten oppfatter vi den imidlertid som gul når den står høyt på himmelen og ofte oransje eller rød når den står lavt på himmelen. Årsaken er i hovedsak at jordas atmosfære spres lys i den blå delen av spekteret mest og i den røde delen minst. Dette er årsaken til at himmelen er blå.

Jo nærmere horisonten sola står, desto mer atmosfære passerer solstrålene gjennom. Når sola står høyt på himmelen, er så mye blått og grønt lys spredd at den ser gul ut. Når horisonten kan så mye blått, grønt og gult lys være spredd i atmosfæren vår at sola kan se oransje eller rød ut.

Tillegg til lysspredning i jordas atmosfære spiller også øyets evne til å oppfatte ulike farger inn på hvilken farge vi synes sola har når vi ser på den.

Stjerner med overflattetemperatur på ca. 2500–3000 °C sender ut veldig mye av sin energi som varmestraling. 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>

Hvorfor er ikke sola blå?

Hvorfor er ikke sola blå? Den varmeste delen av flammer er jo blå! Sola er jo kjempevarm.

BIRGER ANDRESEN
 Leder, Trondheim Astronomiske Forening

Plancks strålingslov

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

$I(\lambda)$ (10¹¹ W/m³) vs λ (μm). Curves for 2000 K, 1750 K, and 1250 K.

λ_{\max} øker når T avtar

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

Wiens forskyvningslov (Wilhelm Wien 1893, fra termodyn.)

$f \lambda = c = \text{lysfart}$

$$I(f) = \frac{dj}{df} = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1}$$

Y&F Figure 39.32

Integralregning

155 Rottmann

43) $\int_0^{\infty} \frac{x^{2n}}{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}} dx = \frac{E_n}{2} \left(\frac{\pi}{2\alpha}\right)^{2n+1}, \alpha > 0, n = 0, 1, 2, \dots *$

44) $\int_0^{\infty} \frac{x^{2n-1}}{e^{\alpha x} - 1} dx = \frac{|B_{2n}|}{4n} \left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)^{2n}, \alpha > 0, n = 1, 2, \dots *$

$n=2$
 $\alpha=1$
 Bernoullital
 $B_4 = 1/30$
 $\Rightarrow \pi^4/15$

45) $\int_0^{\infty} \frac{x}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^2}{6}$

46) $\int_0^{\infty} \frac{x^{2n-1}}{e^{\alpha x} + 1} dx = \frac{2^{2n-1} - 1}{2n} |B_{2n}| \left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^{2n}, \alpha > 0, n = 1, 2, \dots *$

47) $\int_0^{\infty} \frac{x}{e^x + 1} dx = \frac{\pi^2}{12}$

48) $\int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$

Eks 5: Temperaturforløp dob.glassvindu

T_H vs T_L

ledning: j_1

stråling: $j_{\text{inn}} = f\sigma T_L^4$, $j_{\text{ut}} = f\sigma T_H^4$

$f = (1-r)/(1+r) = 0,72$ der $r = \text{refleksjonskoeffisient} \approx 0,16$

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

varmestraling: $j_s = j_{\text{ut}} - j_{\text{inn}} = f\sigma T_H^4 - f\sigma T_L^4 \approx f\sigma 4T_m^3 (T_H - T_L) = 3,70 \text{ W/m}^2\text{K} (T_H - T_L)$

$f = (1-r)/(1+r) = 0,72$ 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!

Vinduer og vegger: U -verdi (tidligere k -verdi)

Def: $j = U \Delta T$ Enhet: W/m^2K

$$j = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\Delta T}{R} \frac{1}{A} = U \cdot \Delta T \Rightarrow U = \frac{1}{AR}$$

der R = varmeresistansen (K/W)

www.enova.no:	U-verdi
Enkelt glass i ramme	5,0
To glass i koblet vindu	2,4
Tolags isolerrute	2,4
Tolags isolerrute med ett belagt glass og luft	1,6
Tolags isolerrute med ett belagt glass og argongass	1,4
Tolags isolerrute med belagt glass, argongass, varmkant, ny ramme og karm	1,2 - 1,1
Trelags isolerrute med to belagte glass, argongass, varmkant, ny ramme og karm	1,1 - 0,9
Trelags isolerrute med to belagte glass, argongass, varmkant, isolert ramme og karm	0,9 - 0,7

Vårt vindu i Eks. 5 med varmeledning+stråling:

$$U = (1,2+3,7) W/m^2K = 4,9 W/m^2K \text{ (svært dårlig)}$$

Varmetransport

▪ Varmeledning (Fouriers lov)

• Varmestrøm (W): $dQ/dt = \kappa A \Delta T/\Delta l = \Delta T/R$
er lik for alle lag gjennom f.eks. vindu.

• Varmestrømtetthet (W/m^2): $j = dQ/dt/A = -\kappa dT/dx$

▪ Konveksjon (materietransport) i gasser og væsker

• Varmeovergang mellom to materialer $j = -\alpha \Delta T$

▪ Varmestråling

• Alle legemer/overflater stråler ut el. magn. stråling, som øker sterkt med temperaturen T :

$$\text{Stefan-Boltzmanns lov: } j = e \sigma T^4 \quad e = a$$

$e = 1$ 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: $\lambda_{\max} T = 2898 \mu m K$