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:

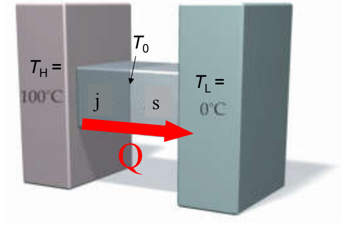
1. Varmeledning, Fouriers lov
2. Konveksjon (strømning)

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

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

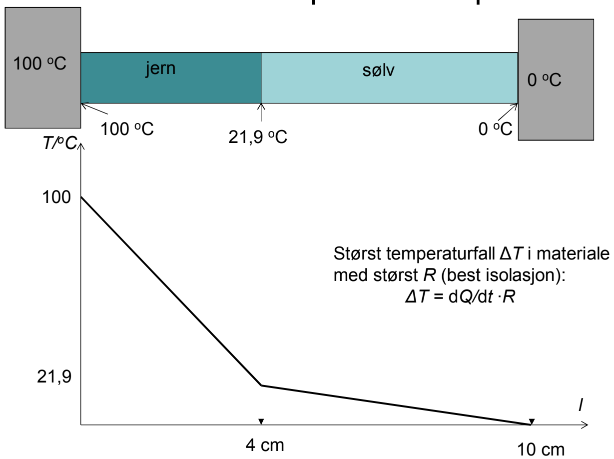
$A = 6{,}0 \text{ cm}^2 = 6{,}0 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$
$l_j = 4{,}0$ cm
$l_s = 6{,}0$ cm
$\kappa_j = 80$ W/(Km)
$\kappa_s = 429$ W/(Km)

der varmeresistans =

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

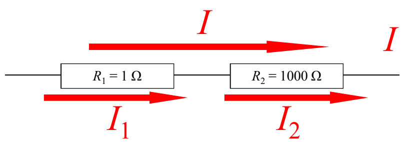
Eksempel utregning: $R_j = \frac{l_j}{A\kappa_j} = \frac{0{,}04 \text{m}}{6{,}0 \cdot (10^{-2} \text{m})^2 \cdot 80 \text{W/mK}} = 0{,}833 \text{ K/W}$

Eks. 1: Temperaturforløp



Strøm i serie

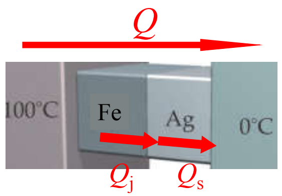
Elektrisk strøm



$I = I_1 = I_2$!

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

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

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

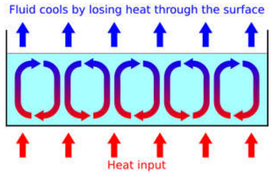
$$\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla} V = \sigma \vec{E}$$

Strømtetthetsvektor: $\vec{j}$

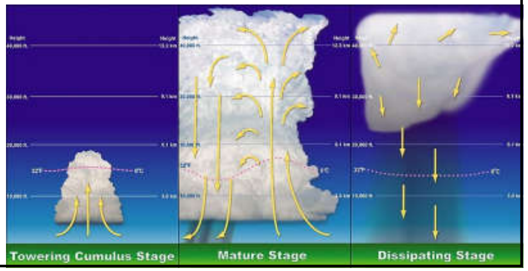
Konduktivitet: κ og σ

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

Konveksjon



Viktig for atmosfæren og vær



Varmetransport

1. Varmeledning, Fouriers lov

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

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

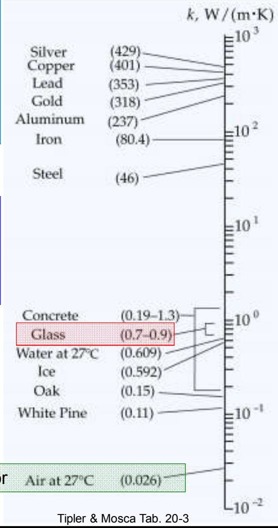
$$\vec{j} = -\kappa \vec{\nabla} T$$

2. Konveksjon (strømning).
3. Varmeovergang (vegg/luft)
4. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov.

Varmeledningsevne, $(k =)\ \kappa$ i $j = \kappa \cdot \Delta T / \Delta x$ for ulike materialer ved romtemp

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

med $j = \frac{\dot{Q}}{A}$



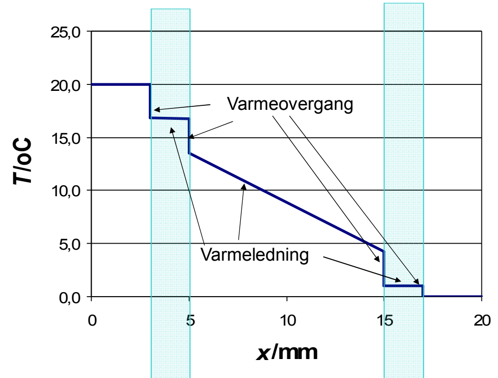
Tipler & Mosca Tab. 20-3

Table 17.5 Thermal Conductivities

Substance	k (W/m · K)
Metals	
Aluminum	205.0
Brass	109.0
Copper	385.0
Lead	34.7
Mercury	8.3
Silver	406.0
Steel	50.2
Solids (representative values)	
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
Gases	
Air	0.024
Argon	0.016
Helium	0.14
Hydrogen	0.14
Oxygen	0.023

 Y&F Tab 17.5

Eks. 2: Temperaturforløp dob.glassvindu



Hva hvis konveksjon mellom rutene gjør seg gjeldende?

$l_l/\kappa_l \to R_{konv} A$, mye mindre enn 0,385 => j større => T_4-T_5 mindre

Varmetransport

1. Varmeledning, Fouriers lov
2. Konveksjon (strømning)
3. Varmeovergang (vegg/luft)
4. Varmestråling, Stefan-Boltzmanns lov

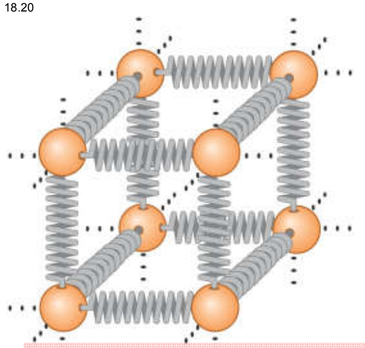
Josef Stefan, eksperimenter 1879

Ludvig Botzmann, teori 1884

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

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

Figure 18.20



Atomer vibrerer, kraftigere jo høyere temperatur

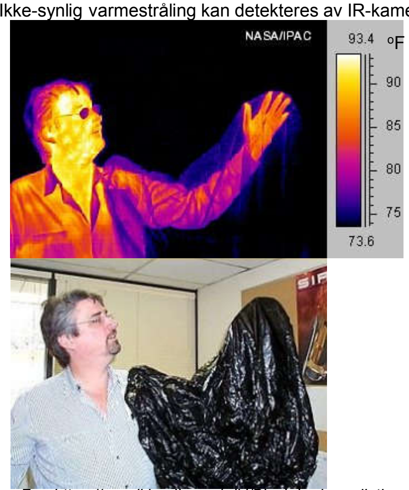
Vibrasjon = akselerasjon

Akselererende elektroner sender ut ems

Alle legemer sender ut ems (elektromagnetisk stråling): Infrarødt ved romtemp, rødt - hvitt ved høyere temperaturer

Årsak: termiske vibrasjoner i molekyler = akselererende elektroner.

Ikke-synlig varmestråling kan detekteres av IR-kamera



Fra: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation

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

Liten

Stor

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

Emissivitet e = absorpsjonsevne a

Fra Handbook og Physics & Chemistry: www.hbcpnetbase.com/ og www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html

Eks. 3 Termisk stråling fra sola

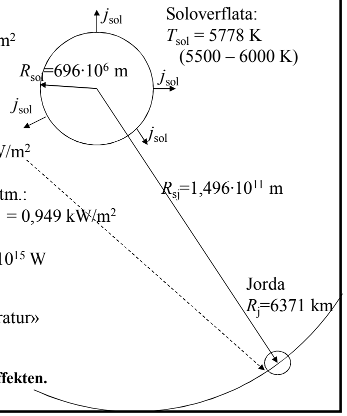
$j_{sol} = e\sigma T_{sol}^4$
$= 1\cdot 5,67\cdot 10^{-8}\cdot(5778)^4$ W/m² = 63,2 MW/m²

j_{sol} i alle retninger => total effekt:
$P_{sol} = j_{sol}\cdot 4\pi R_{sol}^2 = 3,85\cdot 10^{26}$ W

$j_{inn,jord} = P_{sol}/4\pi R_{sj}^2 = 1,37$ kW/m²

Andel $r = 0,306$ reflekteres i atm.:
$j_{jordoverflate} = (1-r)\cdot 1,37$ kW/m² = 0,949 kW/m²

$P_{inn} = j_{jordoverflate}\cdot \pi R_j^2 = 121\cdot 10^{15}$ W



Energibalanse gir jordas «svartstrålingstemperatur»
T_j = -18,8 °C (ikke + 7 °C som forrige forel.)

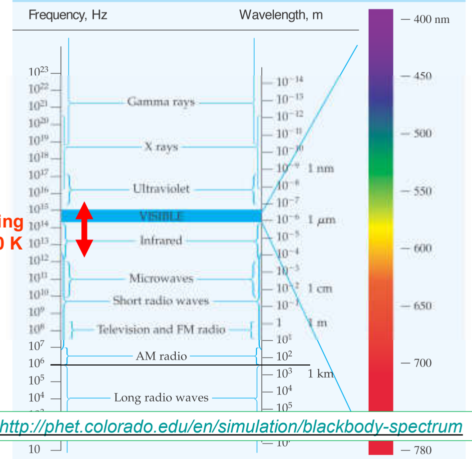
Avvik til jordas snittemp. +14 °C skyldes **drivhuseffekten.**

- **Varmestråling:**
  - Alle legemer/overflater stråler ut el.magn.stråling:
  - Stefan-Boltzmanns lov: $j = e\ \sigma\ T^4$ (W/m²)

Eks. 4: Menneskekroppen:
T = 32 °C = 305 K , e = 0,8 A = 1,8 m²

- $P_{ut} = e\ \sigma\ (305\text{ K})^4 \cdot 1,8\text{ m}^2 = 707$ W (naken kropp)
- 20 °C omgivelser:
  $P_{inn} = e\ \sigma\ (293\text{ K})^4 = 602$ W $P_{netto} = 105$ W (ut)
- 0 °C omgivelser:
  $P_{inn} = e\ \sigma\ (273\text{ K})^4 = 454$ W $P_{netto} = 253$ W (ut)
- Steikende sol 1,0 kW/m² :
  $P_{inn} = e\cdot 1,0\text{ kW/m}^2\cdot 0,5\text{ m}^2 + e\ \sigma\ (293\text{ K})^4\cdot 1,8\text{ m}^2 = 1002$ W
  P_{netto} = 295 W (inn)

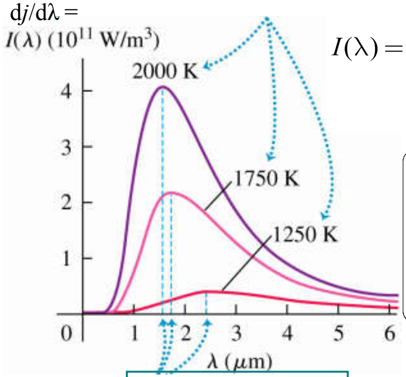
TABLE 30-1
The Electromagnetic Spectrum



Varmestråling
100 – 10000 K

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

Plancks strålingslov



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

$f\,\lambda = c$ = lysfart

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

λ_{max} øker når T avtar

λ_{max} = 2898 μm K / T

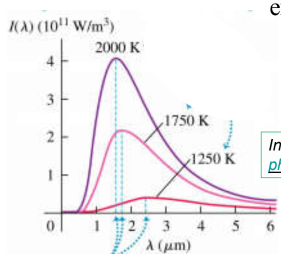
Wiens forskyvningslov
(Wilhelm Wien 1893, fra termodyn.)

Y&F Figure 39.32

Max Planck (1858 – 1947)

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

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



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

Integralregning 155

Rottmann

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

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

$n = 2$
$\alpha = 1$
Bernoullitall
$B_4 = 1/30$

=> $\pi^4/15$

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

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

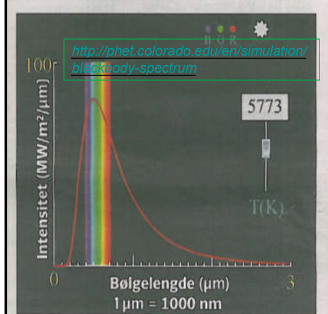
47) $\displaystyle\int_0^\infty \frac{x}{e^x+1}dx = \frac{\pi^2}{12}$

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

Spør Adressa

Kontakt **INGRID BRISSACH**
spor.adressa@adresseavisen.no

Høst 2012



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

Sollyset (5500 °C) har størst intensitet av grønt lys. Summen blir nesten hvitt lys (stjernen øverst), men etter å ha passert gjennom jordas atmosfære ser den gul, oransje eller rød ut. Illustrasjon: 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.

HENRIK 8 år

Sola, som har en overflatetemperatur 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 sprer 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. Nær horisonten kan så mye blått, grønt og gult lys være spredd i atmosfæren vår at sola kan se oransje eller rød ut.

I 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.

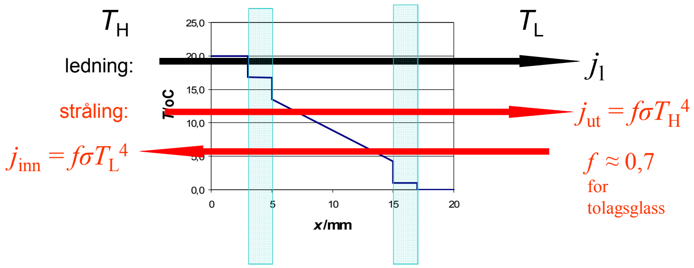
Stjerner med overflatetemperatur på ca. 2500–3000 °C sender ut veldig mye av sin energi som varmestråling. Kun litt av energien sendes ut som lys, men mesteparten av denne andelen er rødt lys, mye mindre er gult og grønt lys og svært lite er blått. I sum ser en slik stjerne oransje eller rød ut.

Stjerner med overflatetemperatur 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 illustrerer strålingen fra sola eller andre objekter godt. Her kan du sette inn ønsket temperatur og se hvor stor andel av stråling som havner i de ulike delene av det elektromagnetiske spekteret inkl. lys. Du ser også objektets faktiske farge (uten effekten av lysspredning i jordas atmosfære).

BIRGER ANDRESEN
Leder Trondheim Astronomiske Forening

Eks 5: Temperaturforløp dob.glassvindu



varmeledning: $j_l = (T_H - T_L) / A\Sigma R_i$, $A\Sigma R_i = A(R_{overgang} + R_{glass} + R_{luft}) = 0{,}83$ m²K/W

varmestråling: $j_s = j_{ut} - j_{inn} = f\sigma T_H^4 - f\sigma T_L^4 \approx f\sigma 4T_m^3 (T_H - T_L) = 3{,}60$ W/m²K $(T_H - T_L)$

$f \approx 0{,}7$ inkluderer, transmisjon, refleksjon, absorpsjon og emisjon

Totalt: $j = (1{,}2 + 3{,}6)$ W/m²K $(T_H - T_L)$ Stråling vesentlig bidrag!

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

Def: $j = U\Delta T$ Enhet: W/m²K

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

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/m²K = 4,9 W/m²K (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/m²): $j = dQ/dt\, /A = -\kappa\, dT/dx$
- **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:
    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: $\lambda_{max}\, T = 2898$ µm K