Luftfuktighet

[LHL 17.10]

Totalt lufttrykk = sum av partialtrykk:

$$p = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2} + p_{H_2O} + \ldots$$

Damptrykket = p_d = partialtrykket pga H_2O i lufta når vi har termodynamisk likevekt mellom vanndampen i lufta og vann i væskeform (som vi typisk har til stede, i hvert fall utendørs!), dvs når vi er på $v+g$ koeksistenslinjen.

Hvis mengden vanndamp i lufta blir større enn dette, har vi ikke lenger likevekt, og vanndamp vil kondensere inntil likevekt gjenopprettes og $p_{H_2O} = p_d$.

Da innser vi at

p_d = maksimalt partialtrykk av H_2O i lufta ved den aktuelle temperatur T; lufta er mettet med vanndamp, og p_d kalles derfor også metningstrykket

Dersom luft inneholder mindre H_2O enn det som tilsvarer at $p_{H_2O} = p_d$, har vi en relativ luftfuktighet ϕ som er mindre enn 100%:

$$\boxed{\phi = \frac{p_{H_2O}}{p_d} \cdot 100\%}$$

Clausius - Clapeyrons ligning

Formen på koeksistenslinjene kan utledes fra termodynamikkens 1. og 2. lov (som vi kommer til senere).
[Kort fortalt baserer utledningen seg på at den såkalte Gibbs frie energi (evt. kjemisk potensial) må være den samme for de to involverte fasene.]

Resultatet er:

$$\boxed{\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T \cdot \Delta V}}$$

der ΔV = volumendringen i faseovergangen, f.eks. $V_g - V_v$ ved fordamping

L = den latente varmen i faseovergangen, f.eks. L_f ved fordamping

Siden både L og ΔV er proporsjonale med stoffmengden, blir $L/T\Delta V$ uavhengig av stoffmengden.

Hvis vanndamp er den ene fasen, kan vi gjøre tilnærmelsen

$$\Delta V = V_g - V \approx V_g$$

siden $V \ll V_g$, enten vi har $V = V_v$ eller $V = V_f$.
Dernest kan vi anta at vanndampen i lufta oppfører seg som en ideell gass:

$$V_g = nRT/p_d$$

Endelig antar vi (for enkelhets skyld) at $L = n \cdot \ell$ er uavhengig av T; her er $\ell = L/n$ = molar latent varme.

Da har vi ~~ett~~ en løsbar ligning for damptrykket p_d:

$$\frac{dp_d}{dT} = \frac{L}{T\Delta V} \approx \frac{n\cdot\ell}{T\cdot nRT/p_d} = \frac{\ell\cdot p_d}{RT^2}$$

$$\Rightarrow \int_{p_d(T_0)}^{p_d(T)} \frac{dp_d}{p_d} = \frac{\ell}{R}\int_{T_0}^{T}\frac{dT}{T^2}$$

der T_0 og $p_d(T_0)$ representerer et valgt (og kjent) referansepunkt på koeksistenslinjen. Et naturlig valg er trippelpunktet:

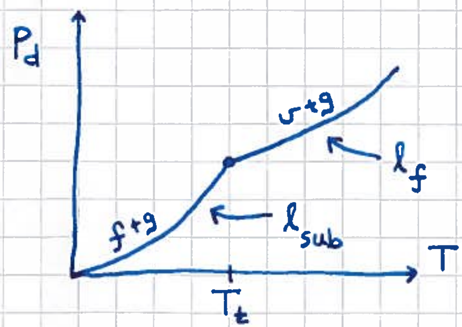
$$T_0 = T_t = 273.16\ \text{K}, \qquad p_d(T_t) = 612\ \text{Pa} = p_t$$

Dermed:

$$\ln\left\{\frac{p_d(T)}{p_t}\right\} = \frac{\ell}{R}\left\{\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T}\right\}$$

$$\Rightarrow \boxed{p_d(T) = p_t\cdot\exp\left\{\frac{\ell}{R}\left(\frac{1}{T_t}-\frac{1}{T}\right)\right\}}$$

som er <u>damptrykk-kurven</u>



$T > T_t$: $\ell = \ell_f = 598\ \frac{\text{cal}}{\text{g}} = 0.598\ \frac{\text{kcal}}{\text{g}}\cdot 4.184\ \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}}\cdot 18\ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \approx 45\ \text{kJ/mol}$

$T < T_t$: $\ell = \ell_{sub} = 678\ \frac{\text{cal}}{\text{g}} = 0.678\ \frac{\text{kcal}}{\text{g}}\cdot$ ——— " ——— $\approx 51\ \text{kJ/mol}$

Eks: Hva er relativ luftfuktighet i luft som i 20 kuldegrader er mettet med vanndamp, etter oppvarming til 20 varmegrader?

Løsn: Partialtrykket pga H_2O tilsvarer damptrykket ved 253 K,

$$P_{H_2O} = P_d(253) = P_t \cdot \exp\left\{ \frac{\ell_{sub}}{R}\left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{253}\right)\right\},$$

som med $T_t = 273.16\ K$ og $\ell_{sub} = 51\ kJ/mol$ gir

$$P_{H_2O} = 0.167\ P_t .$$

Ved 293 K er damptrykket (metningstrykket)

$$P_d(293) = P_t \cdot \exp\left\{ \frac{\ell_f}{R}\left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{293}\right)\right\} \qquad (\ell_f = 45\ kJ/mol)$$

$$= 3.826\ P_t$$

Dermed er

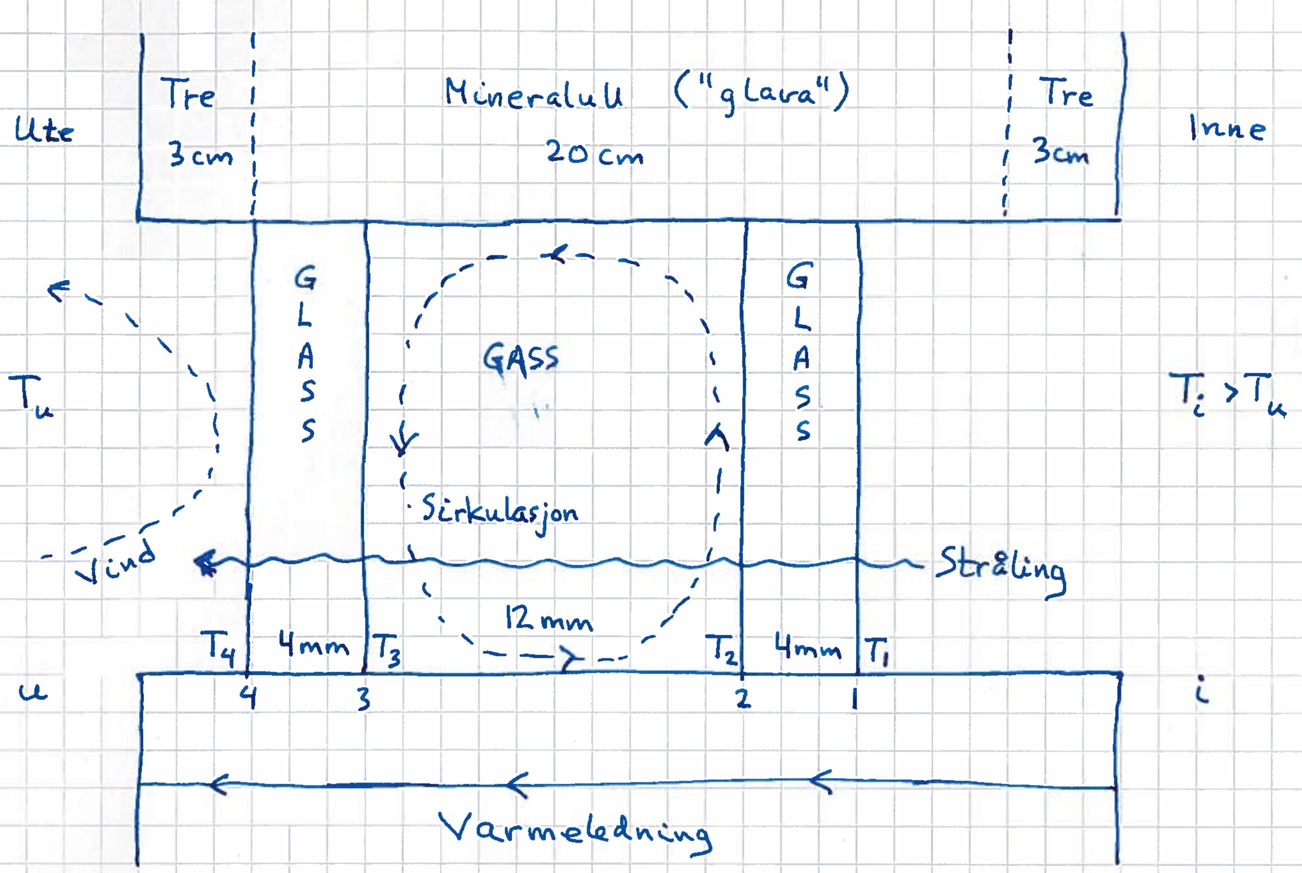
$$\phi = \frac{0.167}{3.826} \cdot 100\% = \underline{\underline{4\ \%}}$$

Ekstraspm:

Hvor mange mL (evt. g) vann må nå fordampe for å gi mettet luft i et rom med volum 25 m^3?

Varmetransport [YF 17 ; LHL 18]

Se på f.eks. en vegg med et dobbeltvindu :



Ulike mekanismer for varmeoverføring :

- Konveksjon : Strømning gir varmeoverføring.
- Varmeledning : Forplantning av kinetisk energi på mikroskopisk nivå
- Stråling : Legeme med temperatur T sender ut energi i form av elektromagnetiske bølger

Konveksjon [YF 17.7 ; LHL 18.2]

$T_2 > T_3$ ⇒ gassen mellom vindusglassene utvider seg og stiger ved 2 ; avkjøles og trekker seg sammen og faller ved 3

⇒ sirkulasjon, og netto varmeoverføring fra 2 til 3

Vind (ute) ⇒ øker varmeoverføringen fra 4 til u

Antar "grovt sett" at overført varme pr tids- og flateenhet, dvs <u>varmestrømtettheten</u>, pga konveksjon er proporsjonal med temperaturforskjellen.

Ute: $j_u = \alpha_u (T_4 - T_u)$

Inne: $j_i = \alpha_i (T_i - T_1)$

$[j] = W/m^2 \Rightarrow [\alpha] = \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (varmeovergangstall)

Vanskelig å beregne; byggeforskriftene angir "typiske verdier":

$\alpha_u = 25 \; W/m^2K$ (dvs <u>med</u> vind, 5–6 m/s i snitt)

$\alpha_i = 7.5 \; W/m^2K$ (<u>uten</u> vind)

Eks: Hvilken temp. oppleves like behagelig med vind på 5 m/s som 25°C uten vind? (Hudens overflate: ca 30°C)

Løsn: Ønsker samme varmestrøm j som ved 25°C uten vind.

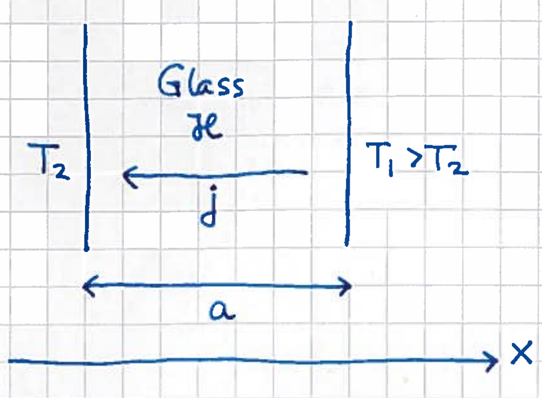
$$j = \alpha_i \cdot \Delta T_{stille} = 7.5 \frac{W}{m^2 K} \cdot 5 K = 37.5 \; W/m^2$$

$$\Rightarrow T_{vind} = 30°C - \frac{37.5}{25} °C = \underline{\underline{28.5°C}}$$

$$[\alpha_i \Delta T_{stille} = \alpha_u \Delta T_{vind}]$$

Varmeledning

[YF 17.7 ; LHL 18.1]



Eksperimenter gir, som ventet,

- $|j| \sim \Delta T = T_1 - T_2$, og fra høy mot lavere T
- $|j| \sim \frac{1}{a}$

$\Rightarrow \quad j = -\varkappa \cdot \frac{\Delta T}{a}$; $\varkappa$ = materialets varmeledningsevne

$[\varkappa] = W/m \cdot K$

→ Vi skal bare se på stasjonære (tidsuavhengige) forhold.

Da er j like stor gjennom hele glasset ; hvis ikke er det en netto varmestrøm inn i eller ut av ei "skive" mellom x og $x + dx$, og da er T ikke konstant der, og da er det ikke stasjonært!

Dermed : $\Delta T / a = dT/dx$

$$\Rightarrow \quad \boxed{j = -\varkappa \frac{dT}{dx}}$$

Fouriers lov for 1D varmeledning

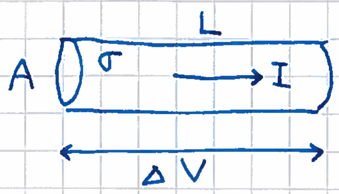
3D : $\vec{j} = -\varkappa \nabla T$; $\nabla T = \hat{x} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial T}{\partial z}$

Tallverdier for $\varkappa$:

	Luft	Glava	Vann	Is	Glass	Stål	Tre
$\varkappa \left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	0.026	0.035	0.61	2.2	0.7 – 1.1	43	0.1 – 0.2

Analogi mellom Fouriers lov og Ohms lov:

Elektrisk motstand:

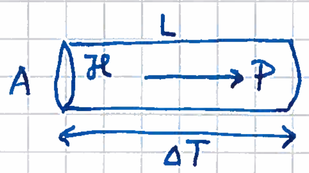


σ = elektrisk ledningsevne

$$j = \frac{I}{A} = \sigma E = \sigma\, \Delta V / L$$

$$\Rightarrow \quad \Delta V = I \cdot R \quad \text{med} \quad R = \frac{L}{\sigma A} \qquad [R] = \frac{V}{A} = \Omega \ \text{(ohm)}$$

Varmemotstand:



$\varkappa$ = varmeledningsevne

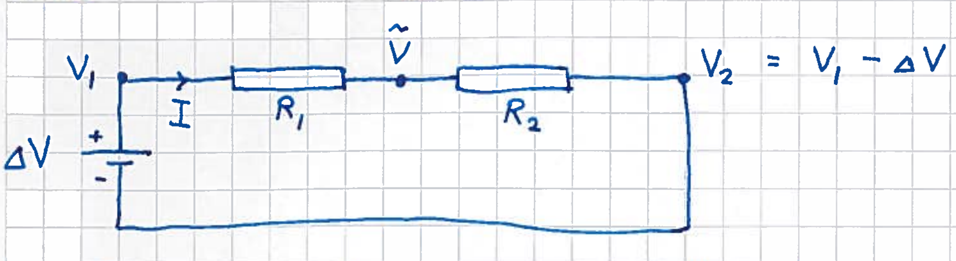
$$j = \frac{P}{A} = \varkappa\, \Delta T / L$$

$$\Rightarrow \quad \Delta T = P \cdot R_Q \quad \text{med} \quad R_Q = \frac{L}{\varkappa A} \qquad [R_Q] = \frac{K}{W}$$

	Fouriers lov	Ohms lov
drivkraft	ΔT (K)	ΔV (V)
strøm	P ($J/s = W$)	I ($C/s = A$)
resistans	$R_Q = \frac{L}{\varkappa A}$ (K/W)	$R = \frac{L}{\sigma A}$ (V/A)
konduktans	$1/R_Q = \varkappa A/L$ (W/K)	$1/R = \sigma A/L$ (A/V)
resistivitet	$1/\varkappa$	$1/\sigma$

Seriekobling.

Elektriske motstander:



Pga ladningsbevarelse går samme strøm I gjennom R_1 og R_2

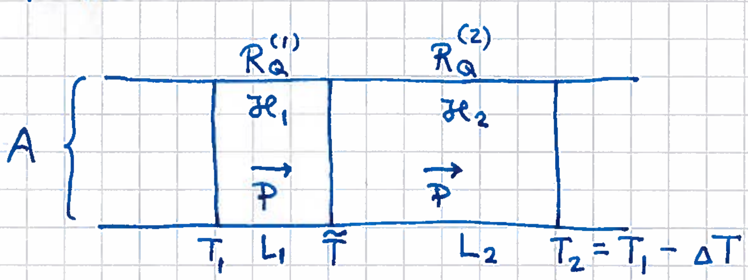
Ohms lov $\Rightarrow$ $V_1 - \tilde{V} = R_1 I$

$$\tilde{V} - V_2 = R_2 I$$

$$\Rightarrow \Delta V = V_1 - V_2 = (R_1 + R_2) I$$

$$\Rightarrow R = R_1 + R_2$$

Varmemotstander:



Pga energibevarelse går samme varmestrøm P gjennom begge lag

Fouriers lov $\Rightarrow$ $T_1 - \tilde{T} = R_Q^{(1)} P$

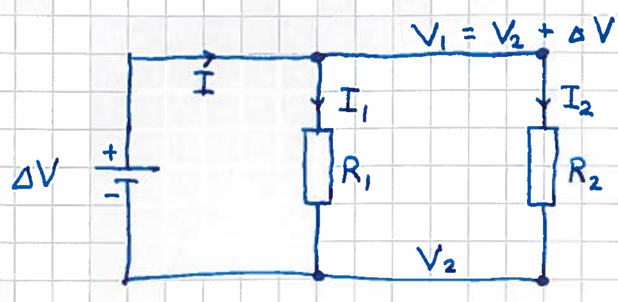
$$\tilde{T} - T_2 = R_Q^{(2)} P$$

$$\Rightarrow \Delta T = T_1 - T_2 = \left(R_Q^{(1)} + R_Q^{(2)}\right) P$$

$$\Rightarrow R_Q = R_Q^{(1)} + R_Q^{(2)}$$

Parallellkobling.

Elektriske motstander:



Pga <u>energibevarelse</u> er det <u>lik spenning</u> ΔV over R_1 og R_2

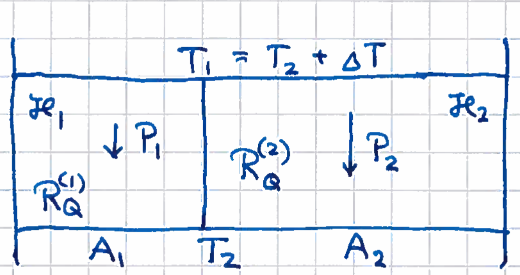
Ohms lov $\Rightarrow$ $\Delta V = R_1 I_1 = R_2 I_2$

Pga <u>ladningsbevarelse</u> er $I = I_1 + I_2$

$$\Rightarrow \quad I = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\Delta V = \frac{1}{R}\Delta V$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Varmemotstander:



Pga <u>termisk likevekt</u> på hver side er det <u>lik ΔT</u> over begge lag

Fouriers lov $\Rightarrow$ $\Delta T = R_Q^{(1)} P_1 = R_Q^{(2)} P_2$

Pga <u>energibevarelse</u> er $P = P_1 + P_2$

$$\Rightarrow \quad P = \frac{\Delta T}{R_Q^{(1)}} + \frac{\Delta T}{R_Q^{(2)}} = \left(\frac{1}{R_Q^{(1)}} + \frac{1}{R_Q^{(2)}}\right)\Delta T = \frac{1}{R_Q}\Delta T$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{R_Q} = \frac{1}{R_Q^{(1)}} + \frac{1}{R_Q^{(2)}}$$

Eks: Husvegg.

Seriekobling av 3 cm panel og 20 cm glava og 3 cm panel,

$\kappa_p = 0.12$ W/Km, $\kappa_g = 0.035$ W/Km. Sett $A = 1\,m^2$.

Total varmemotstand: $R_Q = 2R_Q^p + R_Q^g$, med

$R_Q^p = L_p/\kappa_p A = 0.03\,m/(0.12\,\frac{W}{Km}\cdot 1m^2) = 0.25$ K/W

$R_Q^g = L_g/\kappa_g A = 0.20\,m/(0.035\,\frac{W}{Km}\cdot 1m^2) = 5.71$ K/W

$\Rightarrow \underline{R_Q = 6.21 \text{ K/W}}$

Anta $T_i = 20°C$ og $T_u = -10°C$. Da er

$P = \Delta T/R_Q = 30K/6.21$ K/W $= 4.83$ W (pr m^2 vegg)

Temp. fall gjennom hvert panellag:

$\Delta T_p = P\cdot R_Q^p = 4.83\,W\cdot 0.25\,K/W = 1.2\,K$

Gjennom isolasjonslaget:

$\Delta T_g = P\cdot R_Q^g = 27.6\,K$

Dvs: Størst temp. gradient $\Delta T/\Delta x$ gjennom materialet med minst κ, dvs det som isolerer best.

Uten glava (dvs bare luft): Varmetap pga konveksjon og stråling.