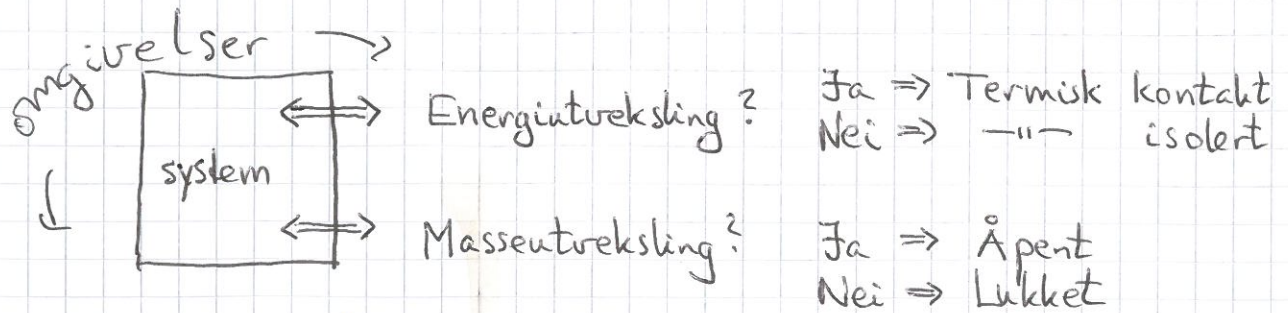


System og omgivelser



En kaffekopp utveksler både energi (varme) og masse (molekyler) med omgivelsene, dvs et åpent system i termisk kontakt.

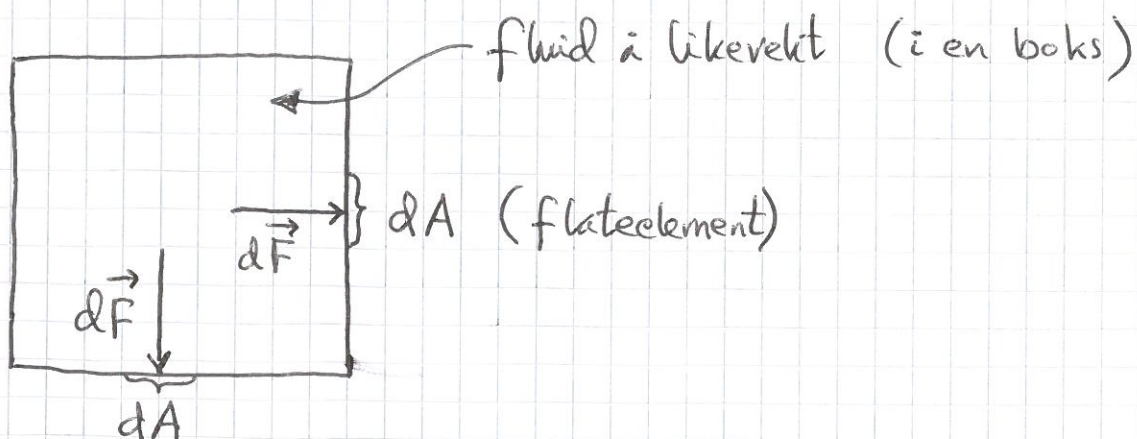
En god termos utveksler verken energi eller masse, dvs lukket system, termisk isolert fra omgivelsene.

~ ~ ~ ~ ~

Sentrale størrelser er trykk og temperatur!

~ ~ ~ ~ ~

Trykk [YF 11.4, 12.2, 12.3; ~~LL~~ LL 7.2, 8.1-8.4]



$p = dF/dA = \text{trykket i fluidet (skalar, isotrop)}$

$[ d\vec{F} = -p d\vec{A} \quad \begin{matrix} d\vec{F} \uparrow \\ \text{-----} \\ d\vec{A} \downarrow \end{matrix} ]$

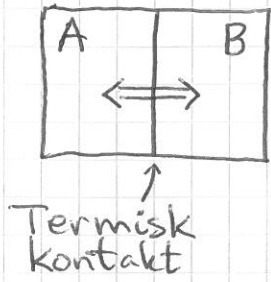
[p] = N/m<sup>2</sup> ≡ Pa (pascal)

1 atm = 1.01325 · 10<sup>5</sup> Pa (≈ 10<sup>5</sup> Pa)

1 bar = 10<sup>5</sup> Pa

1 psi ("pound pr square inch") =  $\frac{0.454 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2}{(25.4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} \approx 6.9 \text{ kPa}$

Temperatur. Termisk likevekt [YF 17.1; LHL 13.1]



Hvis null netto energistrom mellom A og B, så er A og B i termisk likevekt, og har samme temperatur,  $T_A = T_B$

Metoder for måling av T (dvs termometre):

Endring i T gir endring i væskevolum, gasstrykk, lengde av fast stoff, elektrisk motstand etc,

Tallfesting av T (Celsius og andre):

H<sub>2</sub>O fryser ved 1 atm : 0 °C

H<sub>2</sub>O koker —"—" : 100 °C

Måling av  $p(T)$  for ulike gasser (lav tetthet; konstant volum) (96)



Dvs:  $p$  er prop. med temp., og ekstrapolering til  $p=0$  gir  $-273.15$  °C for alle gasser

Innfører absolutt temperatur  $T$ , med enhet K (kelvin) slik at  $0$  K tilsvarer  $-273.15$  °C (det absolute nullpunkt). Lar  $\Delta T = 1$  K tilsvare  $\Delta T = 1$  °C.

$\Rightarrow$   $H_2O$  fryser ved  $273.15$  K, koker ved  $373.15$  K.

Standard referansesystem:

$H_2O$  med damptrykk  $p_t = 612$  Pa og temperatur  $T_t = 273.16$  K. Kalles trippelpunktet for  $H_2O$ , fordi is, vann og vanndamp kan være i samtidig likevekt ved  $p_t$  og  $T_t$ .

(Ikke mulig ved andre kombinasjoner av  $p$  og  $T$ )

# Ideell gass [YF 18.1; LHL 13.3]

(97)

Empirisk, for gasser med lav tetthet: [Senere: Mikroskopisk utledning]

$$pV = nRT$$

Tilstandsligning for ideell gass

Tilstandsvariable:  $p = \text{trykk}$  ( $\text{N/m}^2 = \text{J/m}^3$ )

$V = \text{volum}$  ( $\text{m}^3$ )

$T = \text{temperatur}$  (K)

$n = \text{stoffmengde}$  (mol)

Gasskonstanten:  $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

1 mol =  $6.022 \cdot 10^{23}$  molekyler (partikler)  
=  $N_A$  (Avogadros tall)

$\Rightarrow N = n \cdot N_A$  (antall molekyler)

$[n] = \text{mol}$

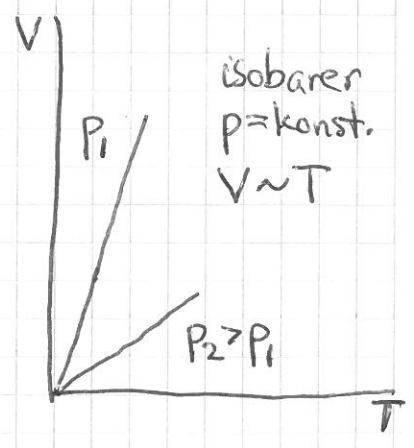
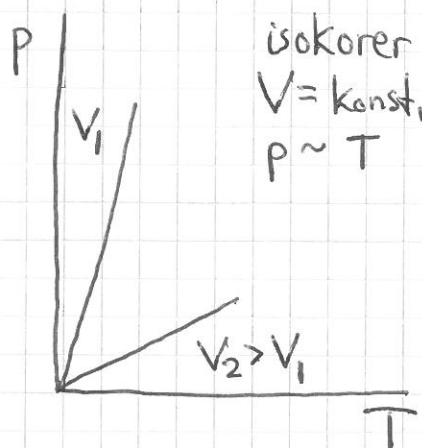
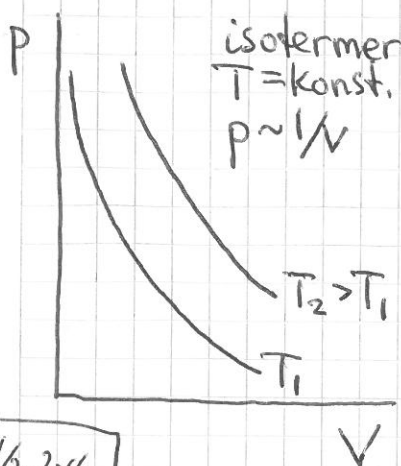
$[N] = 1$

$\rightarrow [N_A] = 1/\text{mol}$

$\Rightarrow pV = \frac{N}{N_A} RT = Nk_B T$

$k_B = R/N_A = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  (Boltzmanns konstant)

Grafisk, med konstant stoffmengde ( $n$ ):



17.03.16

## Noen termodynamiske koeffisienter [YF 7.4; LHL 13.2] (98)

Volumutvidelseskoeff:

$$\beta = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta V/V}{\Delta T} \right\}_{p=\text{konst.}} = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

Lineær utvidelseskoeff: (kun faste stoffer)

$$\alpha = \frac{1}{L} \left( \frac{\partial L}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{3} \beta \quad (\text{da } L = V^{1/3})$$

Kompressibilitet; bulkmodul: (isoterm)

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = B^{-1}$$

Trykk-koeff:

$$\gamma = \frac{1}{p} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V$$

Eks 1:  $\beta(\text{H}_2\text{O}) < 0$  for  $0^\circ\text{C} < T < 4^\circ\text{C}$

$\Rightarrow \rho(4^\circ\text{C}) > \rho(0^\circ\text{C}) \Rightarrow$  (dype) innsjøer bunnfryser ikke  
[ $\rho = m/v = \text{masse tettheten}$ ]

Eks 2: Hva er  $\beta$ ,  $B$  og  $\gamma$  for ideell gass?

Løsning:  $\beta = \frac{1}{V} \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{Nk_B T}{p} \right)_p = \frac{Nk_B}{pV} = \frac{1}{T}$

$$B = -V \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T = -V \frac{\partial}{\partial V} \left( \frac{Nk_B T}{V} \right)_T = \frac{Nk_B T}{V} = p$$

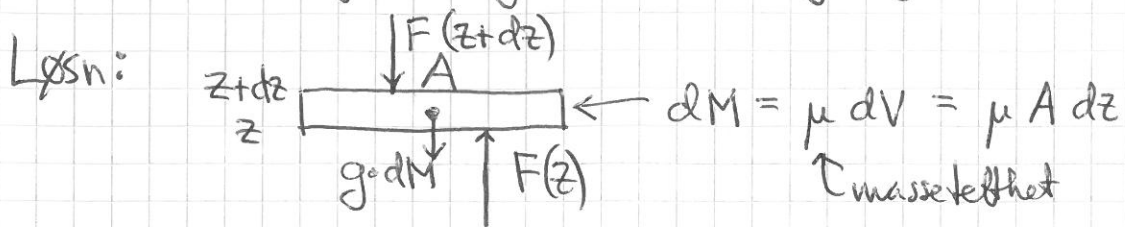
$$\gamma = \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{Nk_B T}{V} \right)_V = \frac{Nk_B}{pV} = \frac{1}{T} = \beta$$

Eks 3: Hvorfor stiger spritzøylen i termometeret når  $T$  øker?

Svar: Fordi  $\beta(\text{glass}) \approx 2.7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \ll \beta(\text{etanol}) \approx 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Eks: Hvordan avtar trykket oppover i atmosfæren? (99)

Anta ideell gass, og konstant  $g$  og  $T$ .



Likevekt for  $dM$  (N1):  $F(z+dz) - F(z) + g dM = 0$

$$\underbrace{[p(z+dz) - p(z)] A}_{dp} \quad \underbrace{mg A dz}_{\mu g A dz}$$

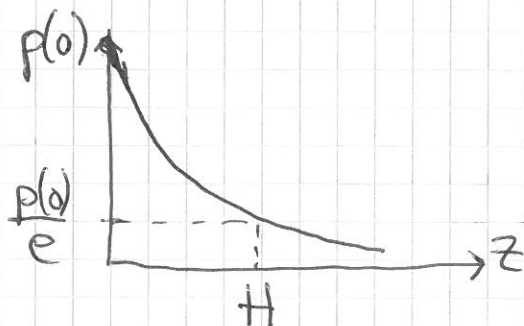
$\mu = \langle m \rangle N/V$ ;  $\langle m \rangle =$  midlere molekylmasse  $\approx 4.8 \cdot 10^{-26}$  kg  
(tilsvarende ca 29 g/mol)

$N/V = p/k_B T$  (ideell gass)

$\Rightarrow dp = - \langle m \rangle \frac{p}{k_B T} g dz$

$\Rightarrow \int_{p(0)}^{p(z)} \frac{dp}{p} = - \frac{\langle m \rangle g}{k_B T} \int_0^z dz \Rightarrow \ln \frac{p(z)}{p(0)} = - \frac{z}{H}; H = \frac{k_B T}{\langle m \rangle g}$

$\Rightarrow p(z) = p(0) e^{-z/H}$ ; med  $T=260$  K er  $H \approx 7.6$  km



Øving 10/nr 3:

Numerisk løsning  
med  $z$ -avhengig  
temperatur  $T$

# Varme. Varmekapasitet [YF 17.5; LHL 13.2]

(100)

Kun to typer energioverføring i termisk fysikk:

Varme = energi som overføres pga. temperatursforskjeller

Andre former for energioverføring er arbeid.

Hvor mye varme  $\Delta Q$  må tilføres et system for å øke temperaturen fra  $T$  til  $T + \Delta T$ ?

Svar:  $\Delta Q = C \cdot \Delta T$ ;  $C$  = systemets varmekapasitet

$$\Rightarrow \boxed{C = \Delta Q / \Delta T} \Rightarrow [C] = \text{J/K}$$

$C$  måles ved å måle sammenhengende  $\Delta Q$  og  $\Delta T$ , typisk med konstant trykk  $p$  eller konstant volum  $V$ :

$$C_p = \left( \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_p ; \quad C_V = \left( \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_V$$

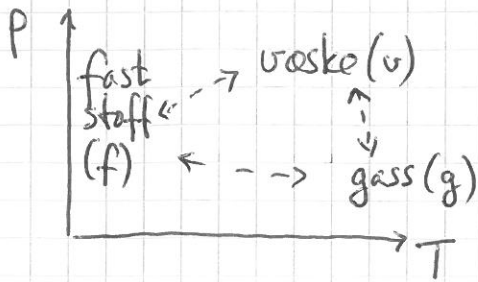
For tabulering er materiaspesifikke størrelser hensiktsmessig:

$$c = C/M = \text{varmekap. pr masseenh.} \Rightarrow [c] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

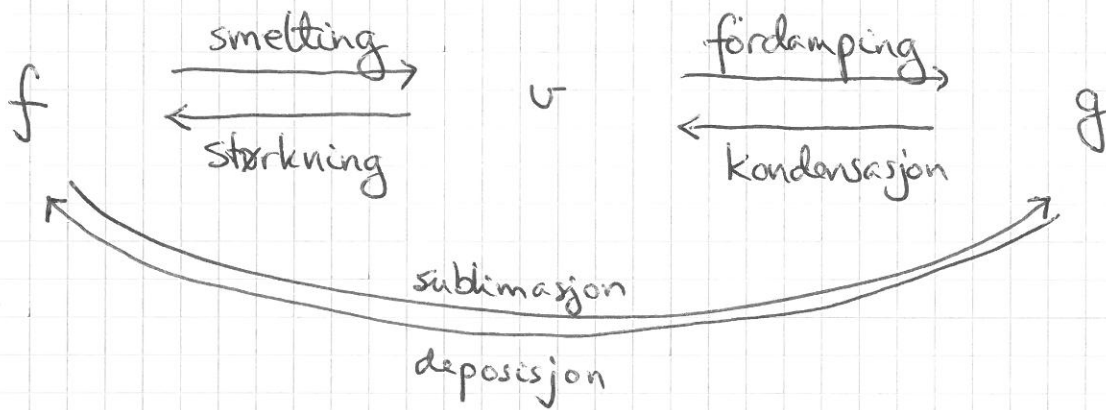
$$c_m = C/n = \text{varmekap. pr mol (et molers varmekap.)} \\ \Rightarrow [c_m] = \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Faseoverganger. Latent varme [YF 17,6 ; LHL 17,10] (101)

Kvalitativt pT-diagram:



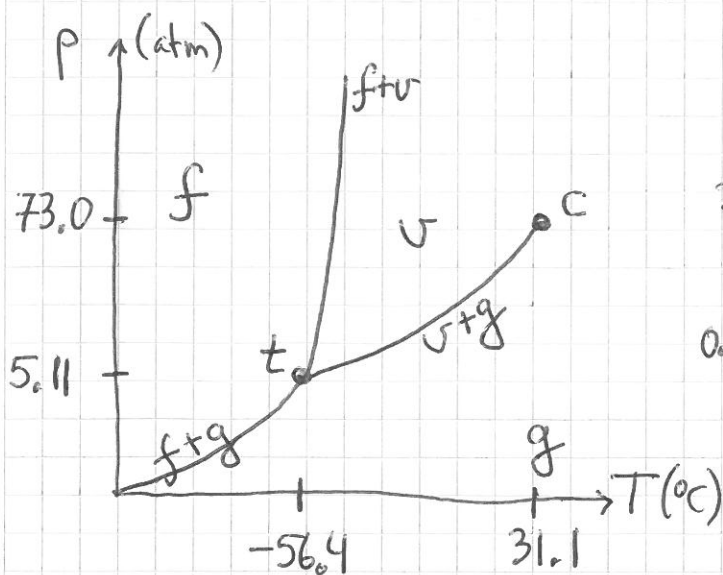
Koeksistenslinjer i (p,T)-diagram markerer faseoverganger:



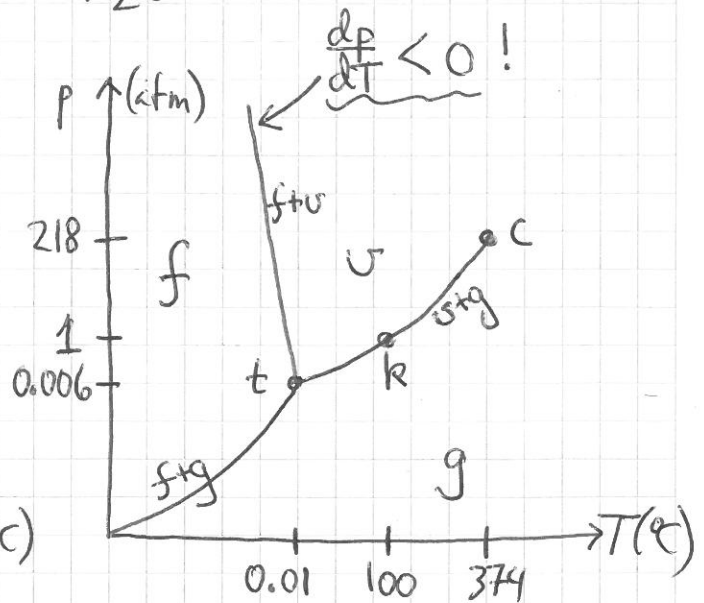
Eks: CO<sub>2</sub> v/1atm, -78.5°C ; tørris

Is → Vanndamp i kuldegrader ; frysetørring

Fasediagram for CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O:



CO<sub>2</sub>



H<sub>2</sub>O



Koeksistensligner: Likevekt mellom to faser, (102)  
 $f+u$ ,  $u+g$  eller  $f+g$

Kokepunkt: (k) "Voldsom fordamping" når damptrykket er like stort som det omgivende lufttrykket.

Det dannes dampbobler i væsken når  $T \rightarrow T_k$  (=  $100^\circ\text{C}$  for  $\text{H}_2\text{O}$  ved  $1 \text{ atm}$ ).

Hvis høyt til fjells: Lavere lufttrykk  
 $\Rightarrow$  Kommer til  $u+g$  likevektslinjen nedenfor k  
 $\Rightarrow$  Koker ved lavere temperatur  
 $\Rightarrow$  Eggene våre koke litt lenger tid enn hjemme...

Trippelpunkt (t): Samtidig likevekt  $f$ ,  $u$  og  $g$

Kritisk punkt (c): Enden av  $u+g$  koeksistenslinjen.

Her opphører forskjellen på væske og gass! Hvis  $p > p_c$  og  $T > T_c$ , har vi bare en fluid fase, et såkalt supercritisk fluid.

# Latent varme:

$L$  = varmen som trengs for å smelte ( $L_{sm}$ ),  
 fordampe ( $L_f$ ) eller sublimere ( $L_{sub}$ )  
 en viss mengde stoff, ved gitt temperatur. Dvs:  
 $\Delta T = 0$ , selv om varme tilføres! Energien  
 tilført går med til å bytte bindinger mellom  
 atomer/molekyler.

Eks:  $H_2O$ . Nær trippelpunktet er  $L_{sm} \approx 80 \text{ cal/g}$ ,  
 $L_f \approx 600 \text{ cal/g}$ ,  $L_{sub} = L_{sm} + L_f \approx 680 \text{ cal/g}$ .

Her er 1 cal (kalori) = varmemengden som øker  $T$   
 fra  $14.5^\circ C$  til  $15.5^\circ C$  i 1 g  $H_2O$  ved  $p = 1 \text{ atm}$ .  
 $1 \text{ cal} \approx 4.184 \text{ J}$ . Anta konstant tilførsel av varme:

