

Svevning [YF 16.7; LL 10.7]

(86)

$$S_1 \cdot \left. \begin{array}{l} \lambda_1 \\ \lambda_2 + \lambda_1 \end{array} \right\} \rightarrow \xi_1(x,t) = \xi_0 \cos(k_1 x - \omega_1 t)$$

$$S_2 \cdot \left. \begin{array}{l} \lambda_2 \\ \lambda_2 + \lambda_1 \end{array} \right\} \rightarrow \xi_2(x,t) = \xi_0 \cos(k_2 x - \omega_2 t)$$

$$\begin{array}{c} \circ \\ \bullet \\ \uparrow \end{array} \xi(x,t) = ?$$

$$\uparrow x = x_0 = 0$$

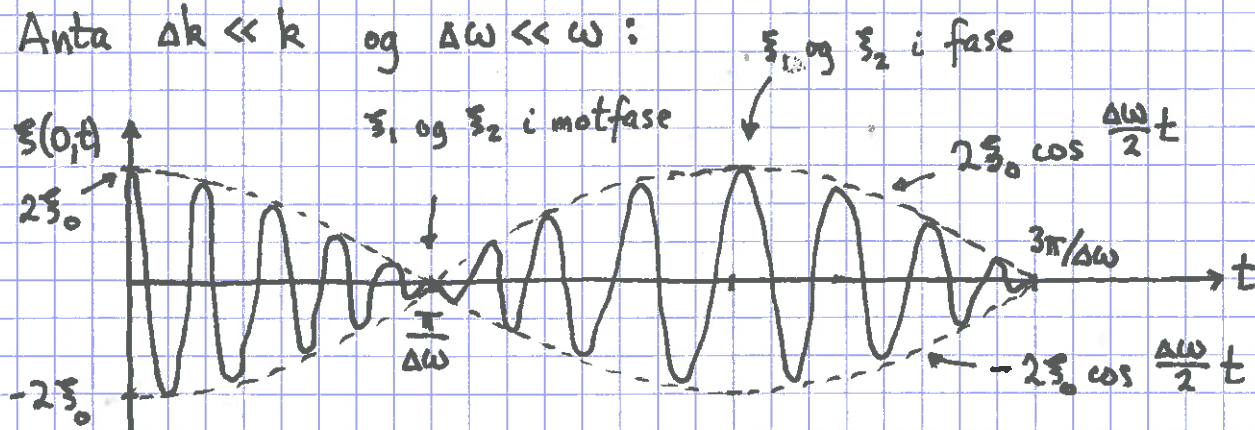
Lydbølge målt (hørt; observeret) av $\circ$:

$$\xi(x,t) = \xi_1(x,t) + \xi_2(x,t) \quad \left[\cos a + \cos b = 2 \cos \frac{a+b}{2} \cos \frac{a-b}{2} \right]$$

$$= 2\xi_0 \cos\left(\frac{\Delta k}{2} x - \frac{\Delta \omega}{2} t\right) \cdot \cos(kx - \omega t)$$

der $\Delta k = k_1 - k_2$, $\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2$, $k = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$, $\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$

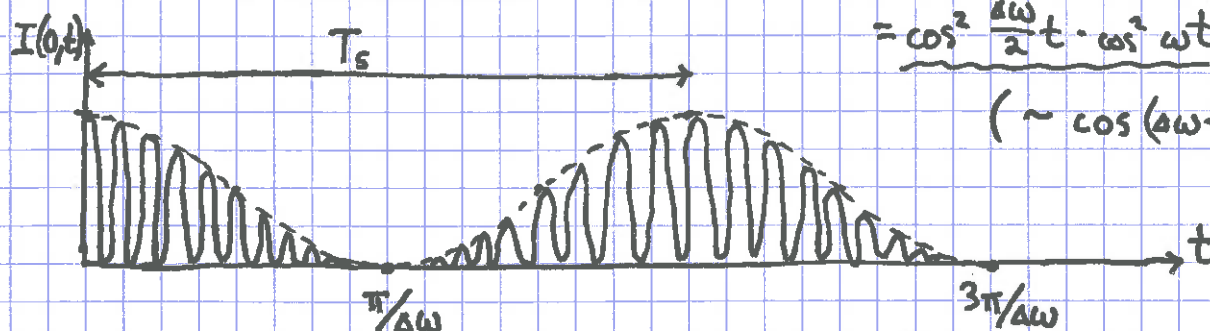
Anta $\Delta k \ll k$ og $\Delta \omega \ll \omega$:



Intensiteten: $I(0,t) \sim |\xi(0,t)|^2 \sim \left\{ \cos^2\left(\frac{\Delta k}{2} x - \frac{\Delta \omega}{2} t\right) \cdot \cos^2(kx - \omega t) \right\}$

$$= \cos^2 \frac{\Delta \omega}{2} t \cdot \cos^2 \omega t$$

$$(\sim \cos(\Delta \omega t) + 1)$$

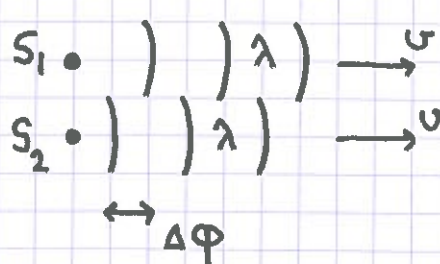


$\Rightarrow$ Hører tonen (frekvensen) $f = \omega/2\pi = (f_1 + f_2)/2$, med "modulert" intensitet, svevning, med svevrefrekvens $f_s = 1/T_s = \Delta \omega/2\pi$. Anvendelse: Instrumentstemning.

Interferens [YF 15.6, 16.6; LL 10.7]

(87)

"flere bølger på samme sted til samme tid"



$$y_1(x,t) = y_0 \cos(kx - \omega t + \phi_1)$$

$$y_2(x,t) = y_0 \cos(kx - \omega t + \phi_2)$$

$y = ?$

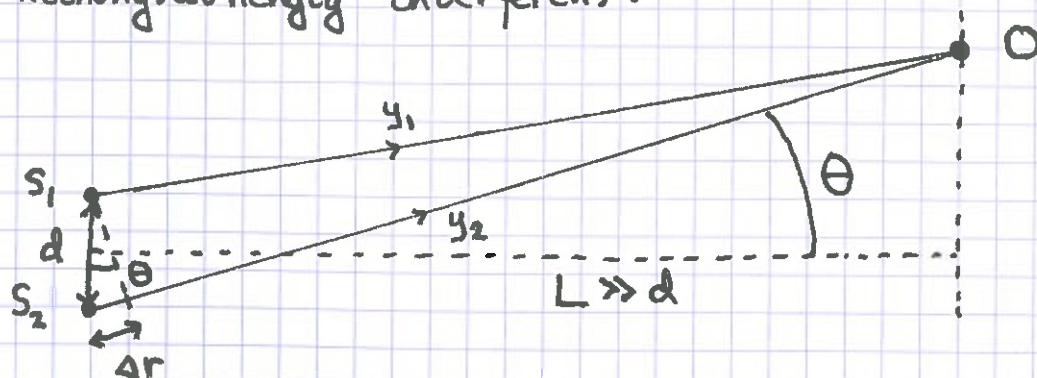
Bølge observert ved O: [Øving 8, oppg 2]

$$y(x,t) = 2y_0 \cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \cos\left(kx - \omega t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)$$

$\Rightarrow$ Konstruktiv interferens, max amplitude $2y_0$, når $\phi_1 - \phi_2 = 0$, dvs når y_1 og y_2 er i fase

Destruktiv interferens, min amplitude 0, når $\phi_1 - \phi_2 = \pi$, dvs når y_1 og y_2 er i motfase

Retningsavhengig interferens:



Anta $L \gg d$, og S_1 og S_2 to bølgekilder i fase.

Veilengdeforskjell: $\Delta r \approx d \cdot \sin\theta$

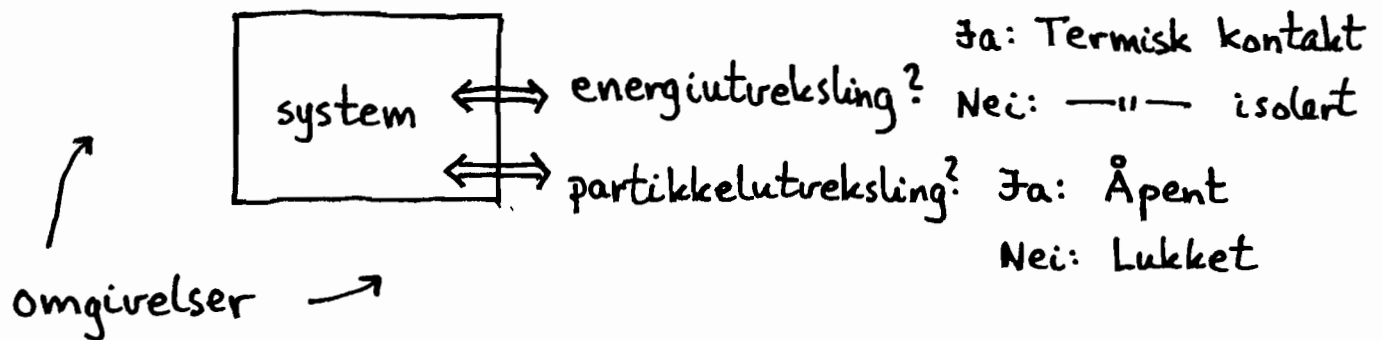
$\Rightarrow$ max I ved O når $d \sin\theta = n \cdot \lambda$

min I ved O når $d \sin\theta = (n + 1/2) \cdot \lambda$

$n = 0, 1, 2, \dots$

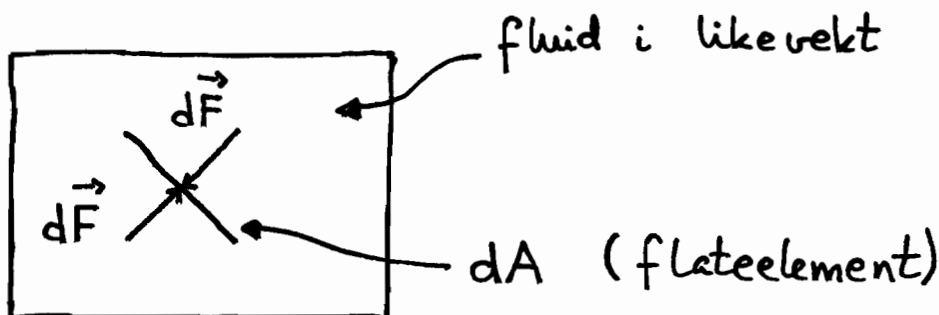
Innledning

System og omgivelser



Eks: Kaffekopp : Termisk kontakt. Åpen
 Termos ^m/lokk: —||— isolert. Lukket

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



$p = dF/dA =$ trykket i fluidet, en skalar og isotrop størrelse (uavhengig av flatens orientering)



$$d\vec{F} = -p d\vec{A} = -p dA \hat{n}$$

SI : $[p] = \text{N/m}^2 = \text{Pa}$

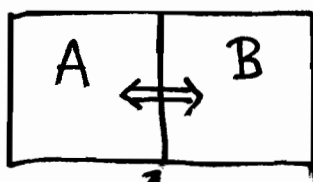
(89)

$1 \text{ atm} = 1.01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1.01325 \text{ bar}$

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

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

Temperatur og termisk likevekt [YF 17.1; LHL 13.1]



Lukket,
men termisk kontakt

Hvis netto energistrøm mellom A og B er lik null:

- A og B er i termisk likevekt
- A og B har lik temperatur: $T_A = T_B$

T måles med termometer.

Endring i $T \Rightarrow$ Endring i

- væskevolum
- gasstrykk
- lengde av fast stoff
- elektrisk motstand osv.

Kalibrering (Celsius m. flere):

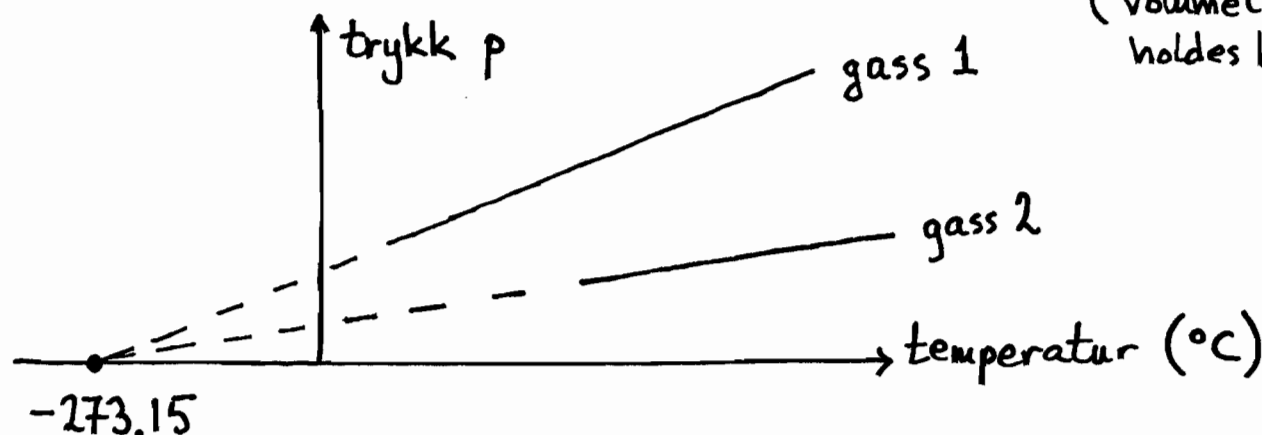
0°C når H_2O fryser ved $p = 1 \text{ atm}$

100°C — " — koker — " —

Absolutt temperatur:

Måling av trykk og temperatur for ulike fortynnede gasser:

(Volumet V holdes konstant.)



Dvs: Trykket er prop. med temp. for alle gassene.
Ekstrapolering til $p = 0$ gir -273.15°C for alle.

$\Rightarrow$ Vi innfører absolutt temperatur T , slik at

$T = 0\text{ K}$ (kelvin) tilsvarer -273.15°C ;

"det absolutte nullpunkt". Dessuten slik at
endring på 1°C = endring på 1 K .

$\Rightarrow \text{H}_2\text{O}$ fryser ved $T = 273.15\text{ K}$, koker ved $T = 373.15\text{ K}$.

Standard referanse (siden 1954):

Trippelpunktet for H_2O , dvs der is, vann og
vann damp er i termisk likevekt, har

(damp-)trykk $p_t = 612\text{ Pa} \approx 0.006\text{ atm}$

temp. $T_t = 273.16\text{ K}$ (0.01°C)

23.10.14

Tilstandsligning for ideell gass [YF 18.1; ^{LHL} 13.3] (91)

Eksperimenter med gasser med lav tetthet gir:

$$\boxed{pV = nRT} \quad \text{Ideell gass tilstandsligning}$$

[Utleides senere med mikroskopisk teori: Kinetisk gassteori]

Knytter tilstandsvariablene trykk p , volum V og temperatur T sammen med ligningen $f(p, V, T) = 0$.

$$[\text{Ideell gass: } f(p, V, T) = pV - nRT = 0]$$

n = antall mol ; $1 \text{ mol} = 6.022 \cdot 10^{23}$ partikler/molekyler

$R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ = gasskonstanten ("åttekomma pi"!))

Alternativt:

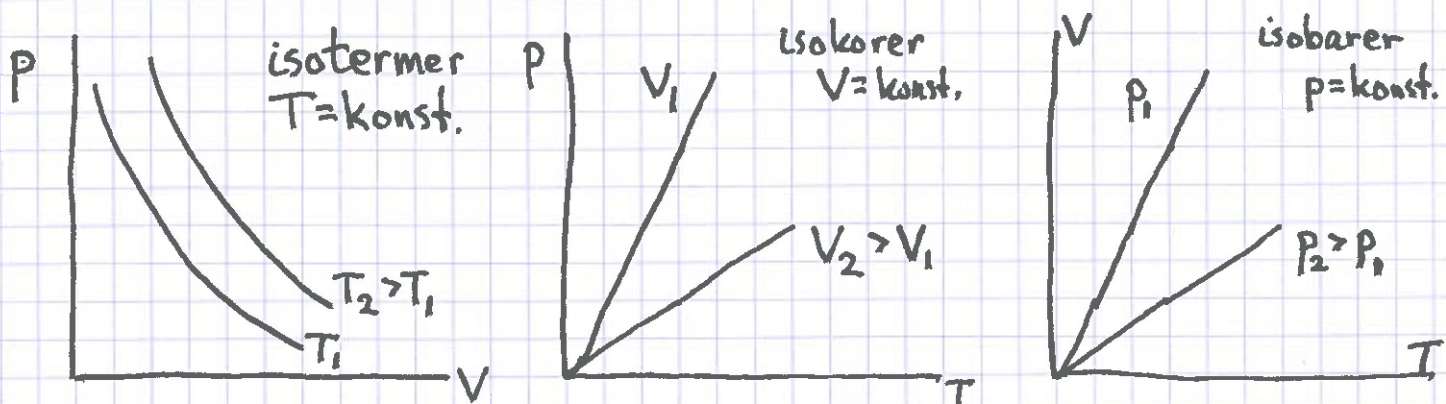
$N = n \cdot N_A$ = antall molekyler ; $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ = Avogadros tall

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

$$\Rightarrow n \cdot R = \frac{N}{N_A} \cdot k_B N_A = N k_B$$

$$\Rightarrow \boxed{pV = N k_B T} \quad \Rightarrow p(V, T) = \frac{N k_B T}{V} ; V(p, T) = \frac{N k_B T}{p} ; T(p, V) = \frac{pV}{N k_B}$$

Grafisk, med $n = \text{konstant}$:



Termodynamiske koeffisienter [YF 17.4; LHL 13.2]

92

Volumutvidelseskoeffisient:

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

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

$\Rightarrow$ spritsøylen i termometeret stiger når T øker

Eks 2: $\beta(\text{H}_2\text{O}) < 0$ mellom 0°C og 4°C

$\Rightarrow$ massetettheten større ved 4°C enn ved 0°C

$\Rightarrow$ innsjøer fryser ikke til bunns $\Rightarrow$ fisken overlever

[Krystallstrukturen i is er "åpen" $\Rightarrow$ Lav tetthet

$\Rightarrow$ Is lettere enn vann. Bindingsstrukturen delvis intakt opp til 4°C $\Rightarrow$ Vann tyngst ved 4°C]

Lineær utvidelseskoeffisient: [Kun faste stoffer]

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

Trykk-koeffisient:

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

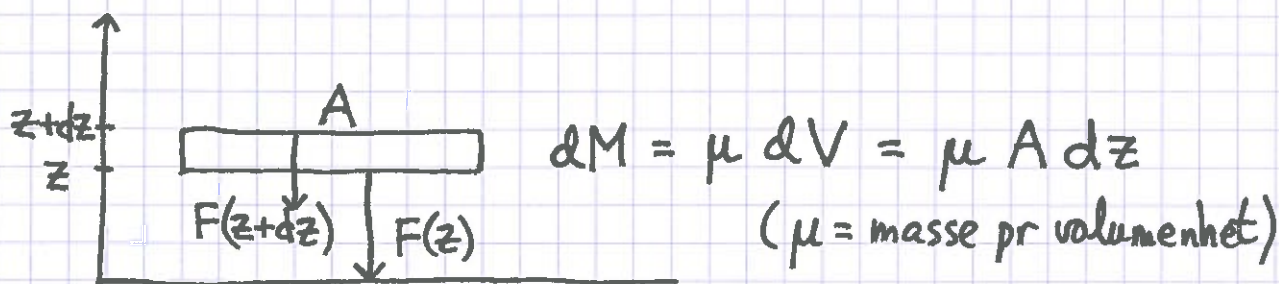
Kompressibilitet:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = B^{-1} \quad [B = \text{bulkmodul; s. 72}]$$

Eks: $\kappa(\text{H}_2\text{O}) = (2.2 \cdot 10^9 \text{ Pa})^{-1} = 4.5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} = 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$

Eks: Anta g og T konstante, og midlere molekylvekt $\langle m \rangle$. Hvordan avtar trykket p oppover i atmosfæren? Anta ideell gass.

Løsn:



$$dF = F(z+dz) - F(z) = \cancel{dM \cdot g} - dM \cdot g = -\mu g A dz$$

[Tyngden av dM tilsvarer økningen i F fra $z+dz$ til z]

$$dp = p(z+dz) - p(z) = dF/A = -\mu g dz$$

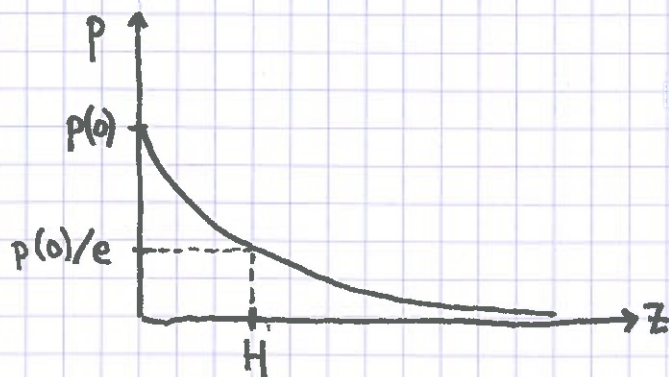
$$\mu = \langle m \rangle \cdot N/V ; \quad pV = Nk_B T \Rightarrow N/V = p/k_B T$$

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

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

$$\Rightarrow \ln \frac{p(z)}{p(0)} = -z/H ; \quad H = \frac{k_B T}{\langle m \rangle g}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{p(z) = p(0) \exp(-z/H)}}$$



$$\langle m \rangle \approx 29 \text{ g/mol} \approx 4.8 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \quad (\text{pr molekyl})$$

$$T \approx 260 \text{ K}$$

$$\Rightarrow H \approx 7.6 \text{ km}$$

Varme = Energi som overføres (transporteres)
pga temperaturforskjeller

Andre former for energioverføring er arbeid.

Varmekapasitet = $\frac{\text{Tilført varme}}{\text{Temperaturendring}}$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

$\Rightarrow \Delta Q = C \cdot \Delta T$, dvs mye varme ΔQ må tilføres
et system med stor varmekapasitet C for å oppnå
en viss temperaturøkning ΔT

Måler C ved å måle sammenhengende ΔQ og ΔT ,
typisk med p eller V holdt konstant:

$$C_p = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_p ; C_v = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_v$$

Enhet: $[C] = \text{J/K}$

For tabulering, hensiktsmessig med spesifikk varmekap.:

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

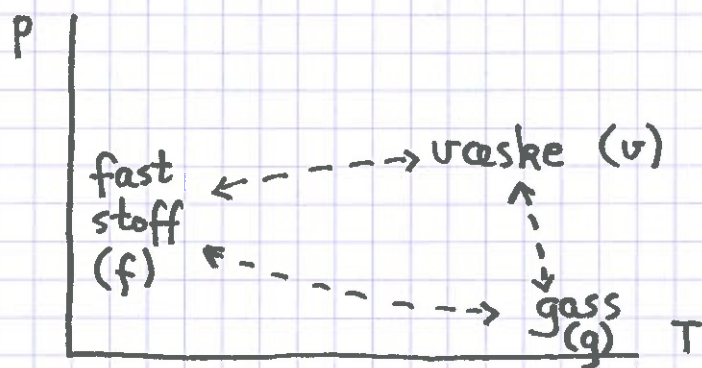
$c_m = C/n = \text{---} \text{---} \text{---} \text{mol} = \text{molar varmekap.}$

$$[c_m] = \text{J/mol} \cdot \text{K}$$

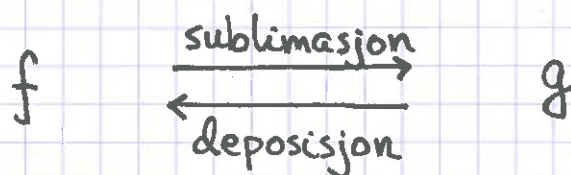
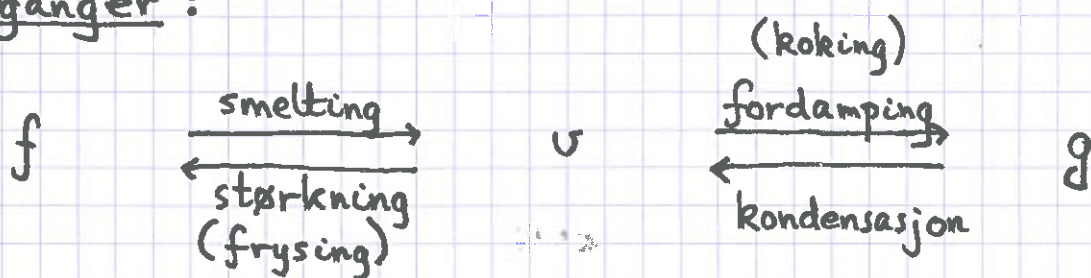
Faseoverganger. Latent varme. [YF ^{18.6}17.6; LHL ^{17.102}13.2]

(95)

Kvalitativt, for ulike trykk og temperaturer:

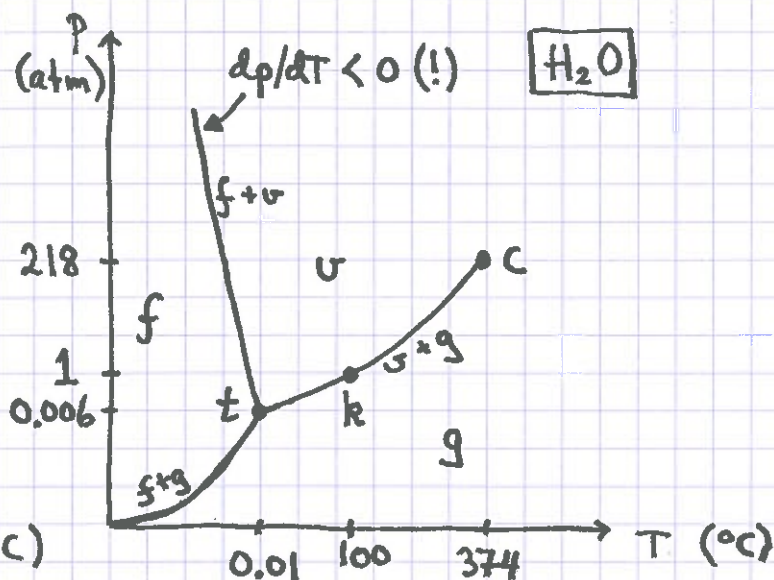
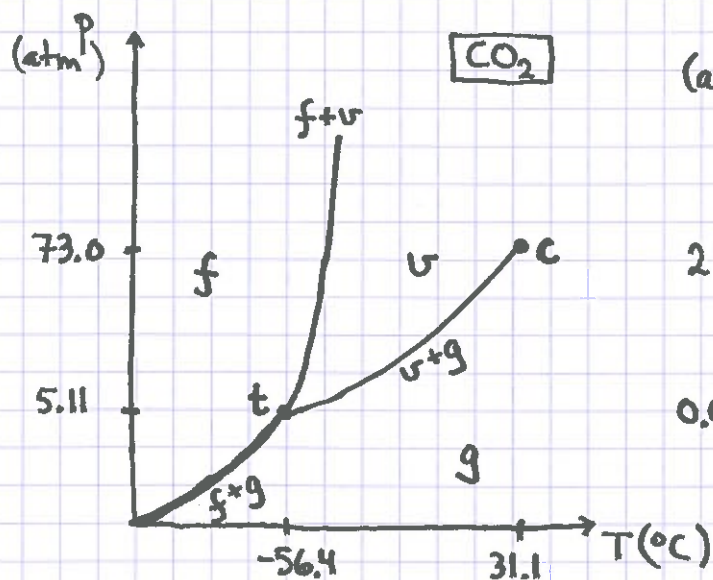


Koeksistenslinjer i (p, T) -diagrammet markerer faseoverganger:



[Eks: CO_2 ved 1 atm, ~~-78.5~~ ^{-78.5} °C; "tørris"]

[Eks: Is $\rightarrow$ Vanndamp i kuldegrader; "frysetørring"]



Koeksistenslinjer ($f+v$, $v+g$, $f+g$):

96

Likevekt mellom to faser.

Kokepunkt (k): Omgivende lufttrykk $\approx$ Damptrykket $\Rightarrow$ Koking

Trippelpunkt (t): Likevekt mellom alle tre faser

Kritisk punkt (c): Enden på $v+g$ koeksistenslinjen.

Hvis $p > p_c$ og $T > T_c$, er det ingen forskjell på væske og gass. Vi har en fase; et superkritisk fluid.

Latent varme:

L = varmen som trengs for å smelte/fordampe/sublimere en viss mengde stoff, ved gitt temperatur ($\Delta T = 0$)

Eks: H_2O . I nærheten av trippelpunktet er

$$L_{sm} \approx 80 \text{ cal/g}, L_f \approx 600 \text{ cal/g}, L_{sub} = L_{sm} + L_f \approx 680 \text{ cal/g}$$

($L_f \approx 540 \text{ cal/g}$ ved 1 atm)

1 cal (kalori) = varmen som øker T fra 14.5°C til 15.5°C
i 1 g H_2O ved $p = 1 \text{ atm}$ ($= 4.184 \text{ J}$)

Med konstant tilførsel av effekt:

