

- Referansegruppe

- Emneside

web.phys.ntnu.no/~storneng/TFY4165_2024/tfy4165.htm

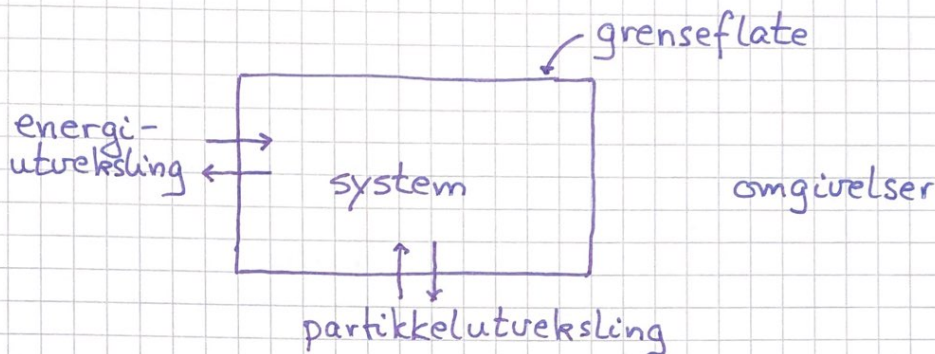
- Hovedbok

P.C. Hemmer Termisk fysikk

1. Grunnbegreper

(2)

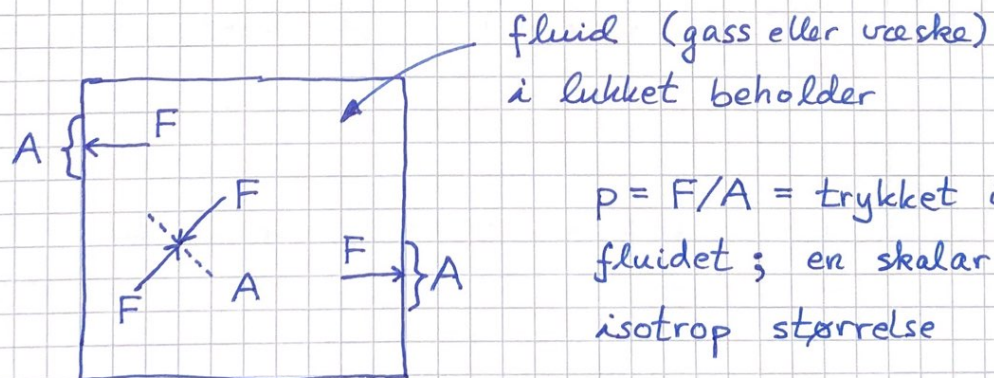
1.1 System og omgivelser



Eks:

		Energi (arbeid, varme)	
		Kontakt	Isolert
Masse	Åpen	Kaffekopp	—
	Lukket	Ølboks (uåpnet)	God termos

Trykk (TFY 4163)



$p = F/A$ = trykket i fluidet ; en skalar og isotrop størrelse

$$[p] = \text{N/m}^2 = \text{Pa} \quad (\text{pascal})$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} ; \quad 1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar} \approx 1 \text{ bar}$$

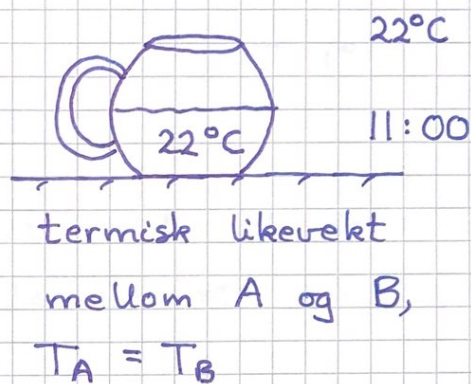
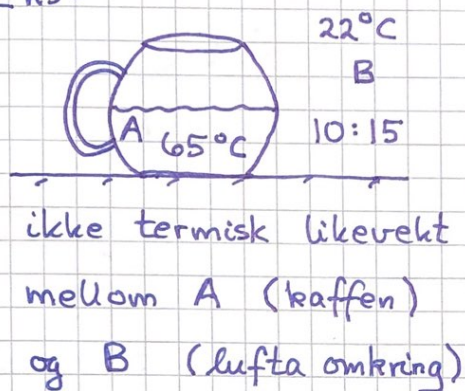
$$1 \text{ psi} = \text{tyngden av 1 pund (0.454 kg)} \\ \text{pr kvadrattomme (25.4}^2 \text{ mm}^2)$$

1.2 Termisk likevekt og temperatur

③

Systemer i termisk kontakt er i termisk likevekt når ingen netto varmeenergi utveksles mellom dem. Systemene har da samme temperatur T .

Eks:



Måler T med termometer. Eks:

- væskevolum V (V øker med T ; nesten alltid)
- gasstrykk p (p øker med T)
- lengde L av fast stoff (L øker med T)
- elektrisk motstand R (R øker med T ; Lab!)

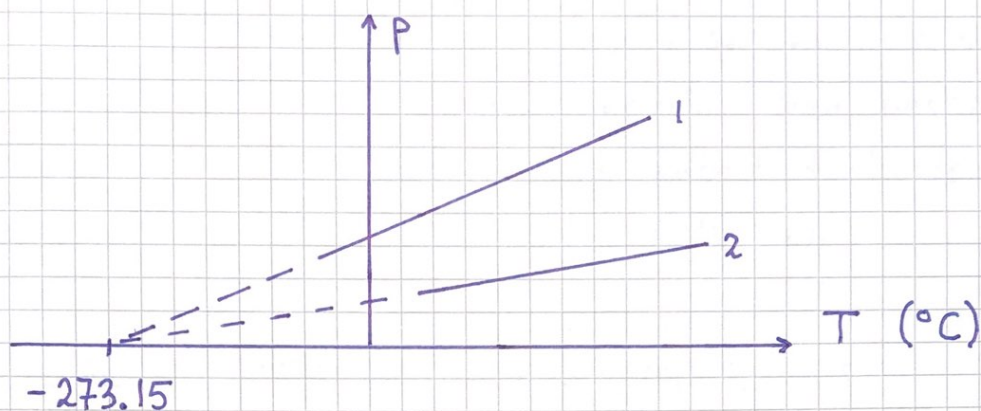
Celsiuskalaen:

$T = 0^{\circ}\text{C}$ når vann fryser til is ved 1 atm

$T = 100^{\circ}\text{C}$ — " — koker — " —

Empirisk (exp.) for ulike gasser med lav tetthet:

(4)



Exp. gir lineære $p(T)$ som ekstrapolert til $p=0$
alle gir $T = -273.15^\circ\text{C}$; utgangspunkt for absolutt
temperatur og kelvinskalaen:

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

$\Delta T = 1\text{ K}$ —" — $\Delta T = 1^\circ\text{C}$

$\Rightarrow \text{H}_2\text{O}$ fryser ved 273.15 K og koker ved 373.15 K
(ved 1 atm)

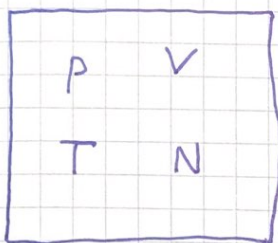
Referanse 1954 - 2019: $1\text{ K} = 1/273.16$ av temperaturen
i vannets trippelpunkt, der is, vann og vanndamp er
i innbyrdes termisk likevekt.

Dvs: $T_t^{\text{def}} = 273.16\text{ K} = 0.01^\circ\text{C}$ ($p_t = 611.657\text{ Pa}$)

Fra 20. mai 2019: Kelvinskalaen defineres med
utgangspunkt i gassmolekylers kinetiske energi
og en fastlagt eksakt tallverdi for Boltzmanns
konstant, $k_B \equiv 1.380649 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}$

1.3 Tilstandsvariable og tilstandsligninger

⑤



Et makroskopisk system ($N \gg 1$)
i termisk likevekt kan beskrives
med et lite antall tilstandsvariable:
 $p, T, V, g = N/V$ osv

Ekstensive variable er mengdeproporsjonale:

$$\boxed{V} + \boxed{V} = \boxed{2V}$$

Intensive variable er mengdeuavhengige:

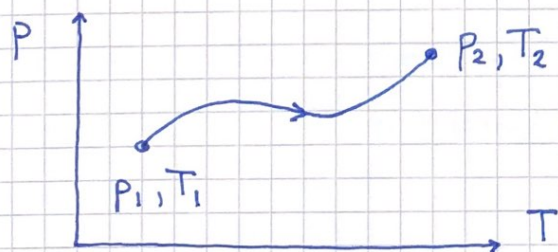
$$\boxed{p, T} + \boxed{p, T} = \boxed{p, T}$$

Tilstandsligninger angir sammenheng mellom tilstandsvariable. For gitt stoffmengde N er som regel 2 av de 3 variablene p, V og T nok for å spesifisere systemets tilstand. Dvs:

$$V = V(p, T) ; \quad p = p(V, T) ; \quad T = T(p, V)$$

$$\text{Generelt: } f(p, V, T) = 0$$

Et system gjennomgår en termodynamisk prosess når tilstandsvariablene endres:



1.4 Ideell gass

(6)

Empirisk for gasser med lav tetthet:

$$\boxed{pV = nRT} \quad \text{Tilstandsligning for ideell gass}$$

n = antall mol = stoffmengden; $1 \text{ mol} \approx 6 \cdot 10^{23}$ molekyler

$R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ = den molare gasskonstanten

n mol tilsvarer $N = n \cdot N_A$ molekyler, med

$N_A \equiv 6.02214076 \text{ mol}^{-1}$ = Avogadros konstant

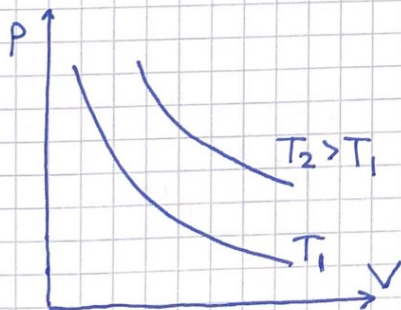
$$\Rightarrow pV = (N/N_A)RT = Nk_B T$$

$$k_B = R/N_A \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (k_B \equiv 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$$

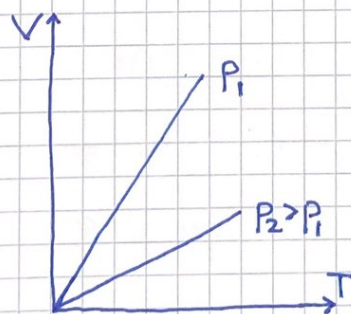
$$\text{Partikkeltetthet: } \rho = N/V \text{ (m}^{-3}\text{)} \Rightarrow p = \rho k_B T$$

$$\text{Invers termisk energi: } \beta = \frac{1}{k_B T} \text{ (J}^{-1}\text{)} \Rightarrow \rho = \beta p$$

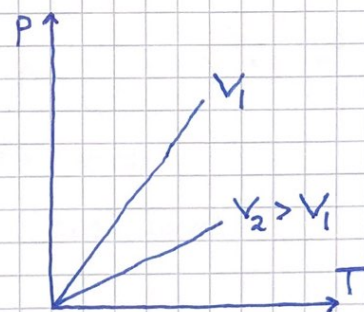
Kurver med en tilstandsvariabel holdt konstant:



isotermes
 $T = \text{konst.}$



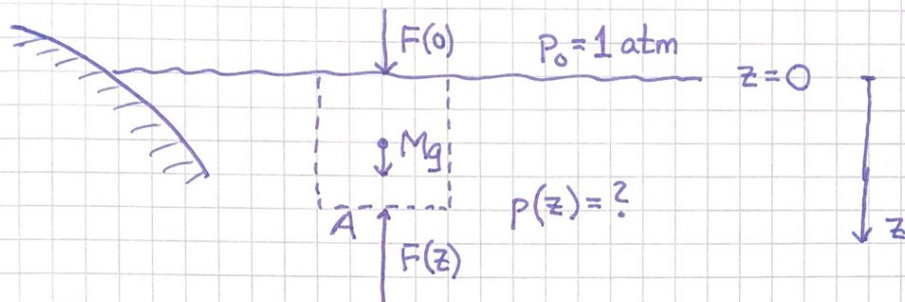
isobarer
 $p = \text{konst.}$



isokorer
 $V = \text{konst.}$

Eks 1: Trykkøkning i vann

(7)



$$N1 \Rightarrow F(z) = F(0) + Mg$$

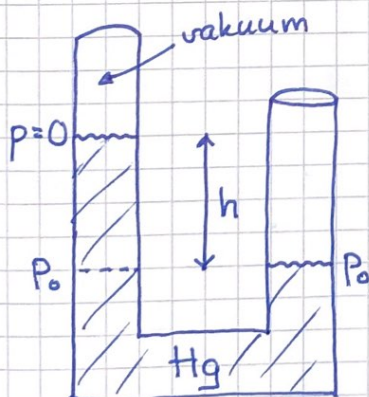
Her er $F(z) = p(z) \cdot A$, $F(0) = p(0) \cdot A$ og $M = \mu \cdot V = \mu z A$

$$\Rightarrow \underline{p(z) = p(0) + \mu g z = p_0 + \mu g z}$$

$$\mu g \approx 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 10^4 \text{ Pa/m}$$

$\Rightarrow$ p øker med 1 atm pr 10 m dybde

Kvikksølubarometeret (E. Torricelli, 1643):



$$p_0 = \mu_{Hg} \cdot g \cdot h$$

$$\mu_{Hg} = 13.6 \text{ g/cm}^3 = 13.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

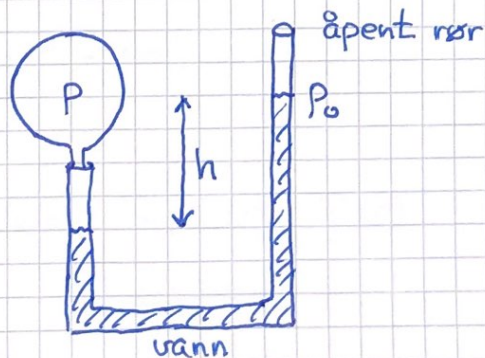
$$\Rightarrow h(1 \text{ atm}) = 760 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 1 \text{ mm Hg} = 1/760 \text{ atm}$$

Overtrykk i ballong:

$$\Delta p = p - p_0 = \mu g h$$

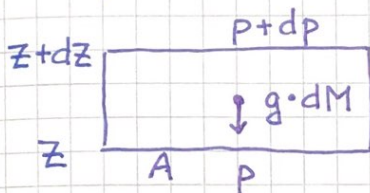
$$= (10^4 \text{ Pa/m}) \cdot h$$



Eks 2 : Trykkvariasjon i atmosfæren

(8)

Ser på lite volumelement (med z-aksen oppover):



$$N1 \Rightarrow (p+dp)A + \mu g A dz = pA$$

$$\Rightarrow dp = -\mu g dz$$

Antar ideell gass :

$$pV = nRT \Rightarrow \mu = n \cdot m / V = p \cdot m / RT$$

m = midlere molare masse

$\approx 29 \text{ g/mol}$ for luft

Dermed :

$$dp = -p m g dz / RT \Rightarrow dp/p = -m g dz / RT$$

Antar konstante g og T og integrerer fra $z=0$ med $p(0) = p_0 = 1 \text{ atm}$ til høyde z over bakkenivå:

$$\ln[p(z)/p_0] = -m g z / RT \Rightarrow p(z) = p_0 \exp(-z/H)$$

Skalahøyden : $H = RT/mg$; $p(z=H) = p_0/e \approx p_0/3$

Med $T = 260 \text{ K}$ er $H \approx 7.6 \text{ km}$

Øving 1 :

Atmosfæren på Mars

$$g = 3.71 \text{ m/s}^2, \quad m = 43.34 \text{ g/mol}, \quad T(z) = 234 \text{ K} - az + be^{-cz}$$

$$\text{med } a = 2.25 \text{ K/km}, \quad b = 14 \text{ K}, \quad c = 2 \text{ km}^{-1},$$

$$\text{og } p_0 = 600 \text{ Pa.}$$

Ekstra : Atmosfæren på jorda med empirisk $T(z)$

1.5 Termodynamiske koeffisienter

⑨

- Beskriver sammenhenger mellom tilstandsvariable.
- Empirisk grunnlag for tilstandsligninger.

Volumutvidelseskoeffisient α_V :

Relativ volumendring pr grad temperaturøkning,
målt ved konstant trykk

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

Eks 1: Hvorfor stiger søylen i et sprittermometer når T øker?

Løsn: $\alpha_V(\text{etanol}) \approx 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \gg \alpha_V(\text{glass}) \approx 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

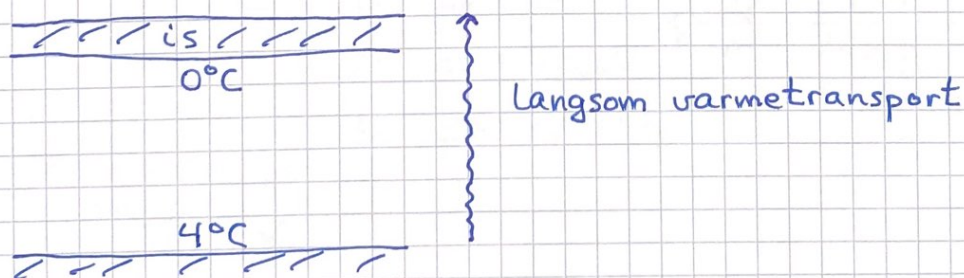
Eks 2: Hvorfor fryser ikke norske innsjøer til bunns om vinteren?

Løsn: $\mu = 999,973 \text{ kg/m}^3$ ved 4°C

$\mu = 999,841 \text{ kg/m}^3$ ved 0°C

dvs $\alpha_V < 0$ for vann mellom 0°C og 4°C .

Skyldes åpen krystallstruktur i is som delvis overlever når isen smelter, opp til 4°C .



Lengdeutvidelseskoeffisient α_L :

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p ; \text{ kun relevant for faste stoffer}$$

Eks: Kube, $V = L^3$, $L = V^{1/3}$

$$\Rightarrow \alpha_L = V^{-1/3} \cdot \frac{1}{3} V^{1/3-1} \cdot (\partial V / \partial T)_p = \alpha_V / 3 ; \text{ gjelder også for andre geometrier}$$

Trykk-koeffisient α_p :

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

Isoterm kompressibilitet κ_T :

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad [\Delta p > 0 \Rightarrow \Delta V < 0 \Rightarrow \kappa_T > 0]$$

Bulkmodul : $B = \kappa_T^{-1}$

Væsker og faste stoffer er tilnærmet inkompressible :

$$\text{Eks: Vann, } \kappa_T \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$$

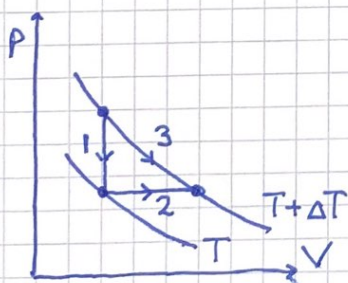
Gasser komprimeres lett.

Eks: Ideell gass

$$V(p, T) = nRT/p \Rightarrow \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = -nRT/p^2 = -V/p$$

$$\Rightarrow \kappa_T = p^{-1} = 1 \text{ atm}^{-1} \text{ ved } p = 1 \text{ atm}$$

Sammenheng mellom α_V , α_p og κ_T :



$$\left. \begin{array}{l} 1: -\Delta p = p \alpha_p \Delta T \\ 2: \Delta V = V \alpha_V \Delta T \\ 3: \Delta p = -\Delta V / V \kappa_T \end{array} \right\} \begin{array}{l} -\frac{\Delta p}{\Delta V} = \frac{p \alpha_p}{V \alpha_V} \\ \frac{p \alpha_p}{\alpha_V} = \frac{1}{\kappa_T} \\ \frac{\alpha_p \kappa_T}{\alpha_V} = \frac{1}{p} \end{array}$$

Gjelder generelt, og selvsagt også for ideell gass :

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_V = V^{-1} \partial(nRT/p) / \partial T = nR/pV = T^{-1} \\ \alpha_p = p^{-1} \partial(nRT/V) / \partial T = nR/pV = T^{-1} \\ \kappa_T = -V^{-1} \partial(nRT/p) / \partial p = nRT/p^2 V = p^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\alpha_p \kappa_T}{\alpha_V} = \frac{1}{p} ; \text{OK!}$$

1.6 Den sykliske regel

Med $f(x, y, z) = 0$, ders $x = x(y, z)$ osv., er $\left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y = -1$

[Se øving 2 og PCH kap. 1.6]