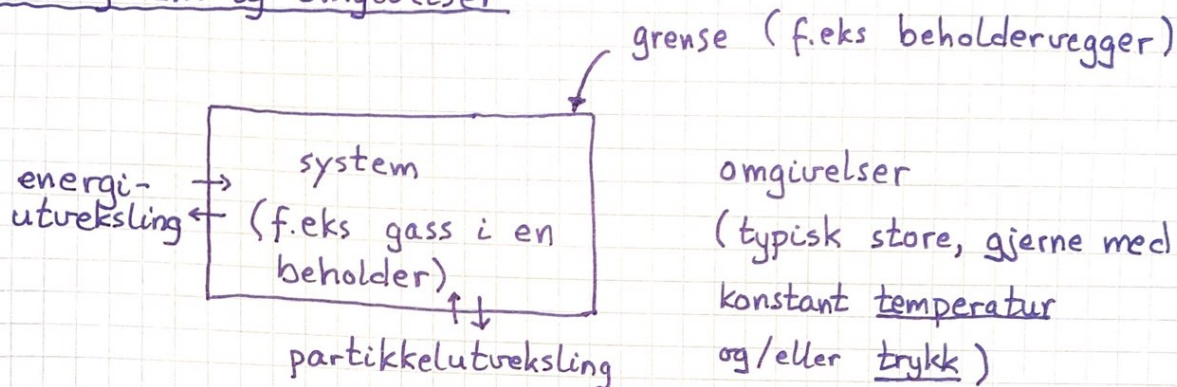


1. Grunnbegreper

①

1.1 System og omgivelser



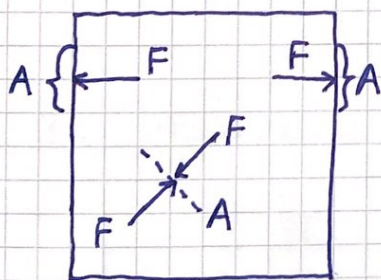
Eks: Kaffen i en kopp utveksler energi (varme) og partikler med lufta omkring $\Rightarrow$ Åpent system med termisk kontakt til omgivelsene.

Kaffen i en god termos: Lukket og termisk isolert system.

Trykk

= kraft pr flateenhet

Eks: Gass i lukket beholder



$p = F/A$ = trykket i gassen, skalar og isotrop

$$\vec{F} = (-) p \cdot \vec{A}$$

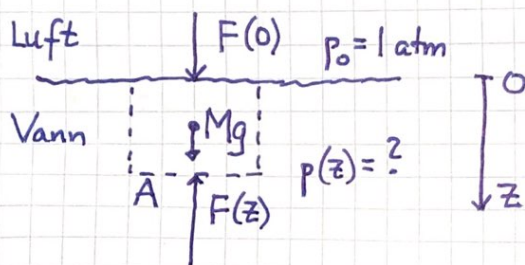
$$[p] = \text{N/m}^2 = \text{Pa} \quad (\text{pascal}) ; 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ psi} = \text{tyngden av et pund (454 g)} \\ \text{pr kvadrattomme (25.4}^2 \text{ mm}^2)$$

Eks 1: Trykkøkning i vann

(2)



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

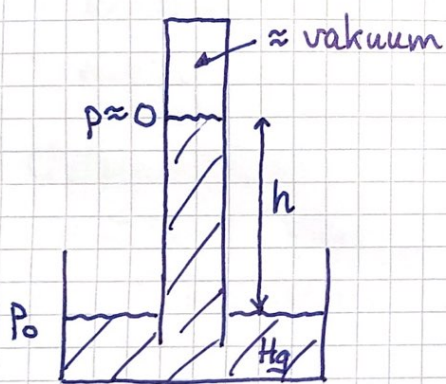
$$\text{med } F(z) = p(z)A, \quad F(0) = p(0)A$$

$$\text{og } M = \mu \cdot V = \mu z A$$

$$\Rightarrow \underline{p(z) = p_0 + \mu g z} \quad ; \quad \mu g \approx 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10^4 \text{ Pa/m}$$

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

Eks 2: Kvikksølvbarometeret (E. Torricelli 1643)

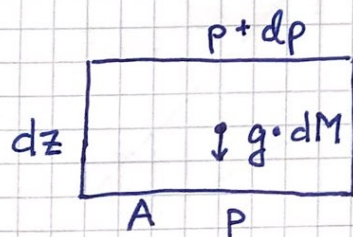


$$p_0 = \mu_{\text{Hg}} g h \quad ; \quad \mu_{\text{Hg}} = 13.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

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

$$\Rightarrow 1 \text{ mmHg} = \frac{1}{760} \text{ atm} = 1 \text{ Torr}$$

Eks 3: Trykkreduksjon oppover i atmosfæren



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

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

Men her er massetettheten μ ikke konstant,
så vi må først finne ut hvordan μ varierer
med z , evt. p .

1.2 Termisk likevekt og temperatur

(3)

Systemer i termisk kontakt er i termisk likevekt (med hverandre) når energi (varme) ikke lenger utveksles mellom dem. Da har systemene lik temperatur T .

Eks:



$T_{\text{kaffe}} = 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{luft}} = 22^\circ\text{C}$: Ikke termisk likevekt

Senere: $T_{\text{kaffe}} = T_{\text{luft}} = 22^\circ\text{C}$: Termisk likevekt

Måler T med et termometer. F.eks:

- gasstrykk (p øker med økende T)
- væskevolum (V øker som regel med T)
- lengde av stang (L øker med T)
- elektrisk motstand (R øker med T i metall; jf. Lab)

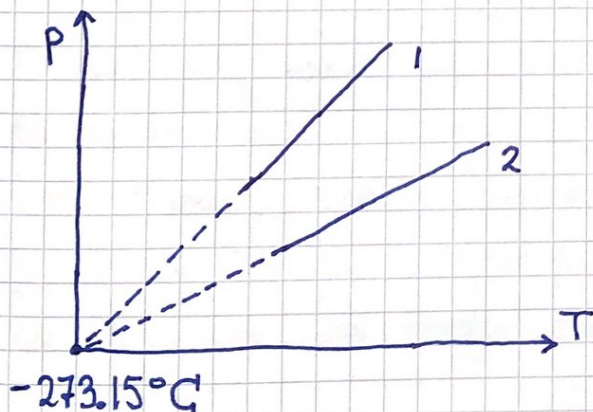
Celsiuskalaen:

$T = 0^\circ\text{C}$: Vann fryser til is ved trykk 1 atm

$T = 100^\circ\text{C}$: Vann koker ved 1 atm

Absolutt temperatur:

Eksperimenter for ulike gasser med lav tetthet:



Lineære $p(T)$ som ekstrapolert til $p=0$ alle gir $T = -273.15^\circ\text{C}$.

⇒ Naturlig å flytte nullpunktet og innføre absolutt temp. målt i kelvin (K):

$$T = 0\text{ K} \hat{=} -273.15^\circ\text{C}$$

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

Definisjon, 1954-2019: $1\text{K} = 1/273.16$ av temp. i vannets trippelpunkt, der is, vann og vanndamp er i termisk likevekt. $T_t = 273.16\text{ K}$; $p_t = 611.657\text{ Pa}$ (4)

Fra 2019-2019: 1K def. med utgangspunkt i gassmolekyleres kinetiske energi og en fastlagt eksakt verdi for Boltzmanns konstant, $k_B \equiv 1.380649 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}$

1.3 Tilstandsvariable og tilstandsligninger



Makroskopisk system med mange partikler ($N \gg 1$) kan, i termisk likevekt, beskrives med et lite antall tilstandsvariable:
 $p, T, V, N, \rho = N/V, \dots$

Ekstensive variable: Mengdeproporsjonale

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

Intensive variable: Mengdeuavhengige

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

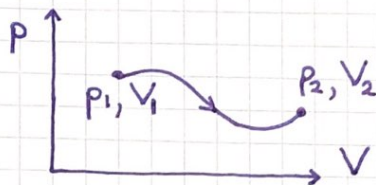
Tilstandsligninger beskriver sammenhenger mellom tilstandsvariable. For gitt stoffmengde (N molekyler, evt n mol) trengs typisk bare to av variablene p, V og T for å spesifisere systemets tilstand; da gir tilst.lign. den tredje som funksjon av disse to:

$$V = V(p, T) \text{ evt } p = p(V, T) \text{ evt } T = T(p, V)$$

$$\text{Eller mer generelt: } f(p, V, T) = 0$$

Systemet gjennomgår en termodynamisk prosess
dersom tilstandsvariablene endres:

⑤



1.4 Ideell gass

Empirisk for gasser med lav tetthet: $pV = nRT$

n = antall mol = stoffmengden

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

N = antall molekyler = $n \cdot N_A$

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

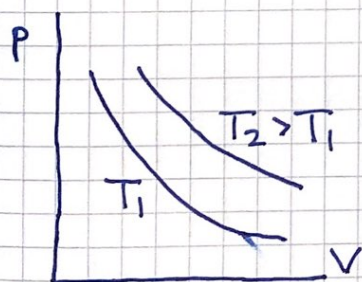
$$\Rightarrow pV = (N/N_A) RT = Nk_B T$$

$$k_B = R/N_A \equiv 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = \text{Boltzmanns konstant}$$

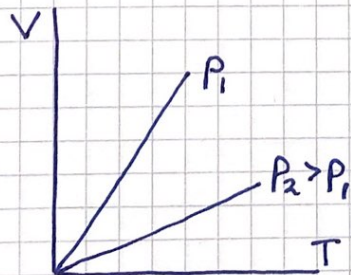
$$\text{Partikkeltetthet: } g = N/V \text{ (m}^{-3}\text{)} \Rightarrow p = gk_B T$$

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

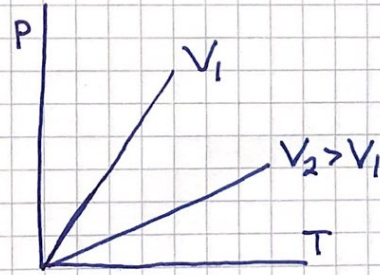
Kurver med 1 tilstandsvariabel holdt konstant:



isotermer
 $T = \text{konst.}$



isobarer
 $p = \text{konst.}$



isokorer
 $V = \text{konst.}$

Eks 3, side 2 :

⑥

Vi fant $dp = -\mu g dz$ for trykfall fra høyde z til $z+dz$ i atmosfæren; μ = luftas massetetthet

Med ideell gass:

$$\mu = M/V = n \cdot m/V = m \cdot p/RT$$

der m = midlere molare masse ≈ 29 g/mol for luft

Dermed:

$$dp = -p mg dz/RT \Rightarrow \frac{dp}{p} = -\frac{mg}{RT} dz$$

Vi antar for enkelhets skyld konstant T (og g)
og integrerer fra $z=0$ med $p(0)=p_0=1$ atm:

$$\ln [p(z)/p_0] = -\frac{mgz}{RT} \Rightarrow p(z) = p_0 e^{-z/H}$$

med skalahøyden $H = RT/mg$.

T varierer med ca. 6.5°C pr km opp til 10-15 km høyde, og $\langle T \rangle \approx 288$ K på havnivå, så la oss sette f.eks. $T = 260$ K. Det gir $H \approx 7.6$ km og $p = 0.27$ atm i flyhøyde 10 km.