

# TERMISK FYSIKK

62

Hovedtema:

	YF	LHL (LL)	HS
I. Termodynamikk	17, 19-20	13, 15-17	8, 10-12
II. Kinetisk gassteori	18	14	9
III. Varmetransport	17	18, 14	13
IV. Statistisk mekanikk			9.2

Først kort om I-IV:

## I. Termodynamikk

- teori for makroskopiske systemer (dvs stort antall partikler), i termisk likevekt
- beskriver "termiske størrelser" som trykk  $p$ , temperatur  $T$ , tetthet  $\rho$  (ert. volum  $V$  og antall partikler  $N$ ;  $\rho = N/V$ ), varme  $Q$ , entropi  $S$  osv.
- mange praktiske anvendelser, vi skal se på noen (motorer/varmekraftmaskiner, kjøleskap, varmepumper...)
- faselikevekter og faseoverganger
- gammel og god teori som "overlever alt", fordi den er generell og enkel

## II. Kinetisk gasteori

(63)

- basert på molekylene (atomenes) bevegelse
- gir mikroskopisk forståelse av  $p$  og  $T$
- ————— " ————— transportfenomener
- OK for fortynnede gasser (dvs lav tetthet)

## III. Varmetransport

- varmeledning: energioverføring i medier (gasser, væsker, faste stoffer) pga temperaturforskjeller ( $\nabla T \neq 0$ )
- varmestråling: energioverføring via elektromagnetiske bølger
- konveksjon: energioverføring pga strømming

## IV. Statistisk mekanikk

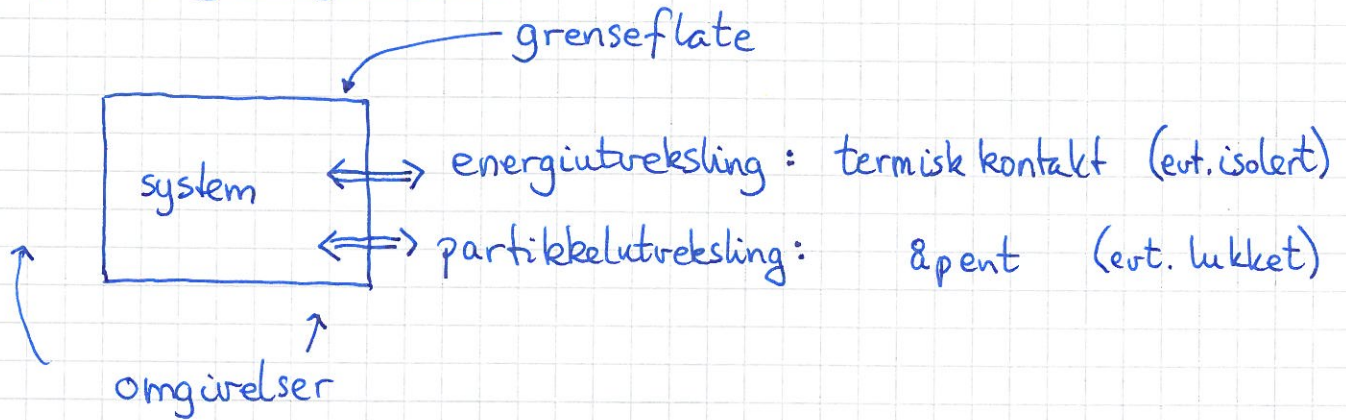
- tar utgangspunkt i sannsynlighetsfordelinger for molekylene "mekaniske tilstand" (dvs deres posisjoner og impulser)
- generell og slagkraftig teori som gir mikroskopisk grunnlag for forståelse av makroskopiske egenskaper til systemer i termisk likevekt (ikke bare gasser med lav tetthet, som i kinetisk gasteori)



# I. Termodynamikk

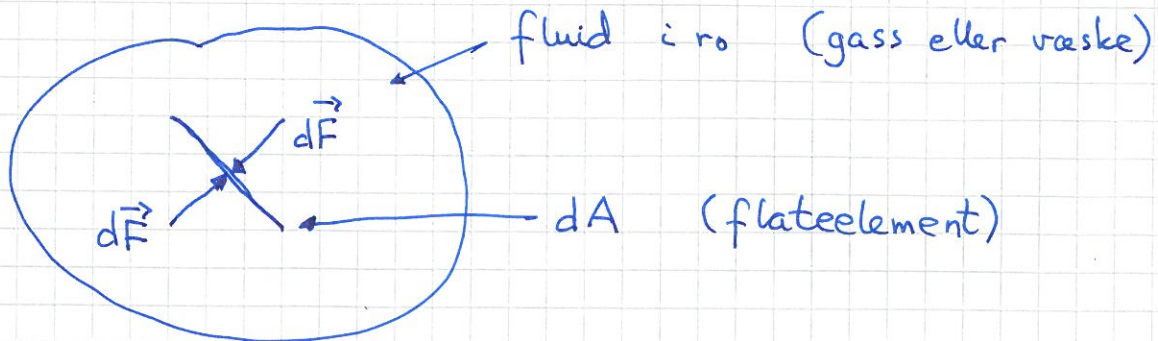
## Grunnbegreper, Terminologi [YF 17,18; LHL 13; HS 8]

### System og omgivelser



Eks: Lukket termos: termisk isolert; lukket  
Kaffekopp: —" — kontakt; åpent

### Trykk [YF 11.4, 12.2-12.3; LL 7.2, 8.1-8.4; HS 7.1.1]



$p \stackrel{\text{def}}{=} dF/dA = \text{kraft pr flateenhet} = \text{trykket i fluidet}$

$p$  er en skalar størrelse

$p$  er isotrop, dvs trykket er uavhengig av flatens orientering

$$\left[ d\vec{F} = -p \cdot d\vec{A} = p \cdot dA \cdot (-\hat{n}) \quad \begin{array}{c} dA \\ \downarrow \\ \uparrow \hat{n} \end{array} = \text{enhetsvektor normalt på flaten} \right]$$

SI-enhet:  $[p] = \text{N/m}^2 = \text{Pa}$  (pascal)

(65)

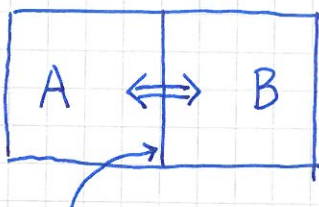
Andre mye brukte enheter:

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

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

$$1 \text{ psi} = 1 \text{ pound (vekten av } 0.454 \text{ kg) pr square inch } ((25.4 \text{ mm})^2) \approx 6.9 \text{ kPa}$$

Temperatur og termisk likevekt [YF 17.1; LHL 13.1; HS 8.1]



termisk kontakt

- Hvis det ikke er en netto energistrøm mellom A og B, er A og B i termisk likevekt
- A og B har da lik temperatur,  
 $T_A = T_B$

Termodynamikkens 0. hovedsetning:

Hvis  $\{A \overset{\text{likevekt}}{\rightleftharpoons} B\}$  og  $\{B \overset{\text{likevekt}}{\rightleftharpoons} C\}$ , da er også  $\{A \overset{\text{likevekt}}{\rightleftharpoons} C\}$ , og  $T_A = T_B = T_C$

Opplagt for de fleste!



Vi måler  $T$  med termometre; via andre fysiske størrelser:

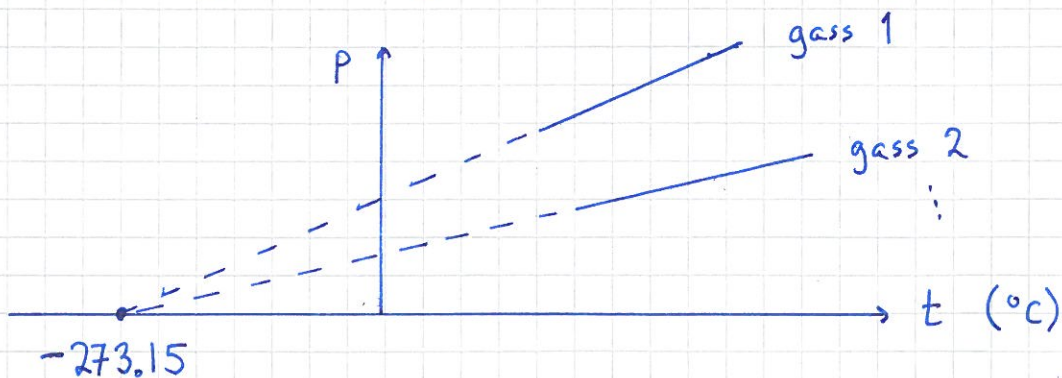
- væskerolum
- gasstrykk
- lengde av fast stoff
- elektrisk motstand osv.

Kalibrering av temperatur: [Celsius m. flere]

$$t_f = t(\text{H}_2\text{O fryser ved trykk 1 atm}) = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_k = t(\text{H}_2\text{O koker } \text{---} \text{---} \text{---}) = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Hvis vi nå måler trykk og temperatur, dvs  $p(t)$ , for ulike fortynnede gasser:



Dvs: Vi finner at  $p$  er prop. med  $t$  for alle gassene, og at ekstrapolasjon til  $p=0$  alltid gir samme verdi,  $-273.15 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$$\Rightarrow p(t) = A \cdot (t + 273.15) = A \cdot T$$

med absolutt temperatur  $T = t + 273.15 \text{ K}$  (kelvin)

Vedtatt referansepunkt siden 1954:

(67)

Vannets trippelpunkt  $(p_t, T_t)$ , dvs det trykk og den temperatur der is, vann og vanndamp er i termisk likevekt med hverandre, er

$$p_t = 612 \text{ Pa} = 0.0063 \text{ atm}, \quad T_t = 273.16 \text{ K} \quad (t_t = 0.01^\circ\text{C})$$

Tilstandsvariable. Tilstandsligninger [YF 18.1; LHL 13.3; HS 8.3]

Makroskopisk system i termisk likevekt er i en tilstand beskrevet med tilstandsvariable:

$$p, T, V, \rho (= N/V), \dots$$

To hovedtyper:

Ekstensive variable er prop. med mengden stoff (materie).

Eks:

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

Intensive variable er uavhengige av stoffmengden

Eks:

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



Tilstandsligning

= sammenheng mellom tilstandsvariable:

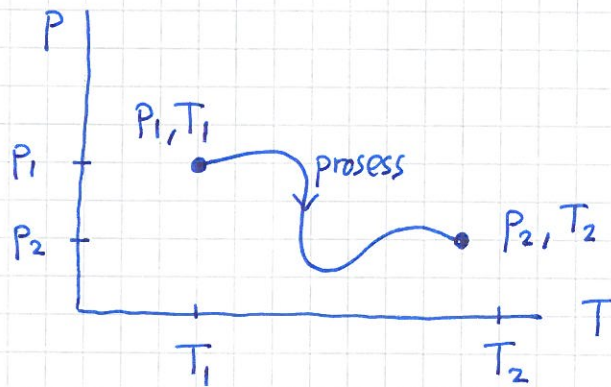
$$f(p, V, T) = 0$$

Dvs:  $p = p(V, T)$ ,  $V = V(T, p)$ ,  $T = T(V, p)$

Prosess

= endring i tilstandsvariable

Eks:

Ideell gass [YF 18.1; LHL 13.3; HS 8.3]

God tilnærming for gasser ved lav tetthet:

$$pV = nRT$$

Tilstandsligning for ideell gass  
(utledes senere, med kinetisk gassteori)

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

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

Alternativt:

(69)

$N = n \cdot N_A = \text{antall partikler}$ ;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} = \text{Avogadros tall}$

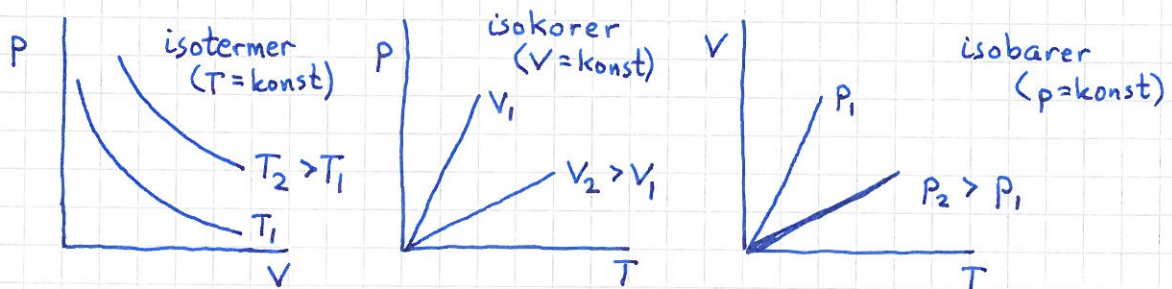
$k_B = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = \text{Boltzmanns konstant}$

$$\Rightarrow n R = k_B N_A \cdot N/N_A = N k_B \Rightarrow \boxed{pV = N k_B T}$$

Dessuten:

$$g = N/V \Rightarrow \boxed{p = g k_B T}$$

Grafiske framstillinger, med  $n = \text{konst}$ :

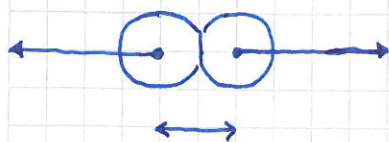


van der Waals tilstandsligning [YF 18.1; LHL 13.4]

[Johannes D. van der Waals, Nobelpreis i fysikk 1910]

Ideell gass = punktpartikler uten innbyrdes vekselvirkning

Reell gass = molekyler som okkuperer et volum, og som vekselvirker med hverandre:



liten  $r \Rightarrow$  frastøtning



stor  $r \Rightarrow$  svak tiltrekning

(van der Waals - krefter)



N molekyler tiltrekkes (svakt) av  $N-1$  ( $\approx N$ ) molekyler (70)

$$\Rightarrow p_{\text{reell}} < p_{\text{ideell}} = Nk_B T / V \Rightarrow p \rightarrow p + a' g^2$$

N molekyler okkuperer  $\overset{\text{volum}}{N \cdot b'}$  ( $b' \sim$  volum okkupert pr molekyl)

$\Rightarrow V - N \cdot b'$  er tilgjengelig volum for gitt molekyl

Dermed:

$$(p + a' N^2/V^2)(V - Nb') = Nk_B T$$

vdW tilst.lign. for gass med N molekyler

Hvis vi har 1 mol gass:

$N = N_A$ ,  $Nk_B = N_A k_B = R$ , og innfør  $a = a' \cdot N_A^2$ ,  $b = b' \cdot N_A$

$$\Rightarrow (p + a/V^2)(V - b) = RT \Rightarrow p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$$

vdW tilst.lign. for 1 mol gass

## Målbare koeffisienter [YF 17.4; LHL 13.2; HS 8.2]

F.eks: " Ved konstant trykk  $p$ , hva blir relativ volumendring  $\Delta V/V$  som følge av en temp.ending  $\Delta T$ ? "

Volumutvidelseskoeffisient:

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

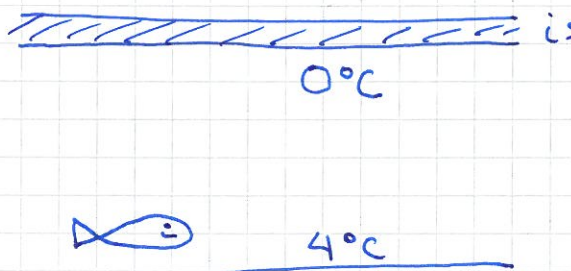
$$\text{Eks 1: } \beta_{\text{glass}} = 2.7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \ll \beta_{\text{etanol}} \approx 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$\Rightarrow$  spritsøylen stiger i termometeret når  $T$  øker!  
[Dvs: termometeret virker!]

Eks 2:  $\beta_{\text{H}_2\text{O}} < 0$  for  $0^\circ\text{C} < t < 4^\circ\text{C}$

(71)

$\Rightarrow$  for massetettheten  $\mu$ :  $\mu_{\text{H}_2\text{O}}(4^\circ\text{C}) > \mu_{\text{H}_2\text{O}}(0^\circ\text{C})$

$\Rightarrow$   is

Fryser ikke til bunns!  
(Med mindre veldig grunt.)

[Forklaring: "Åpen" krystallstruktur i is  $\Rightarrow$  Lav tetthet  
 $\Rightarrow$  Is lettere enn vann! Bindingsstruktur delvis utslutt opp  
til ca  $4^\circ\text{C}$   $\Rightarrow$  Vann tyngst ved  $4^\circ\text{C}$ ]

Andre koeffisienter:

Linear utvidelseskoeff. (kun relevant for faste stoffer):

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

Trykk-koeff:

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

Kompressibilitet  $\chi_e$  og bulkmodul  $(B = \chi_e^{-1})$ :

$$\chi_e = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = B^{-1} \quad (\chi_e > 0, B > 0)$$

Eks:  $\chi_{\text{H}_2\text{O}} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$

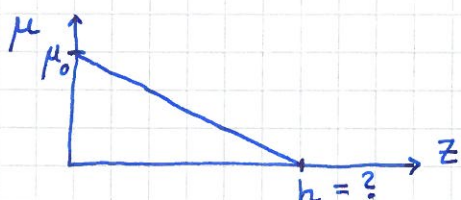
dvs: praktisk talt inkompressibel; gjelder generelt for væsker og gasser.



# Atmosfære og trykk; eksempler

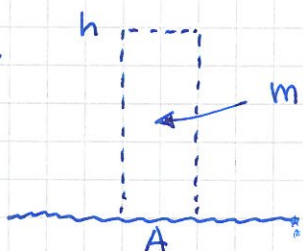
72

Eks 1: Anslå atmosfærens tykkelse ved å anta



$$\mu_0 = 1.3 \text{ kg/m}^3$$

Løsning:



$$m = \langle \mu \rangle \cdot V = \langle \mu \rangle \cdot Ah = \frac{1}{2} \mu_0 Ah$$

$$p = mg/A = \langle \mu \rangle gh = \frac{1}{2} \mu_0 gh$$

$$\Rightarrow h = 2p/\mu_0 g = 2 \cdot 10^5 / (1.3 \cdot 9.8) \text{ m} \approx \underline{16 \text{ km}}$$

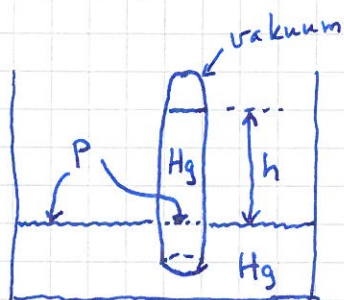
[Forbedret modell:  $\mu = \langle m \rangle g = \langle m \rangle p / k_B T$  ( $\langle m \rangle$  = midlere molekylvekt)

$$dp/dz = -\mu g = -\langle m \rangle g p / k_B T \Rightarrow dp/p = -(\langle m \rangle g / k_B T) dz$$

$$\Rightarrow p(z) = p(0) \exp\{-\langle m \rangle g z / k_B T\} \quad \text{når vi antar } g = \text{konst. og } T = \text{konst.}]$$

Eks 2: Hvor mange mm Hg er 1 atm?

Løsning:

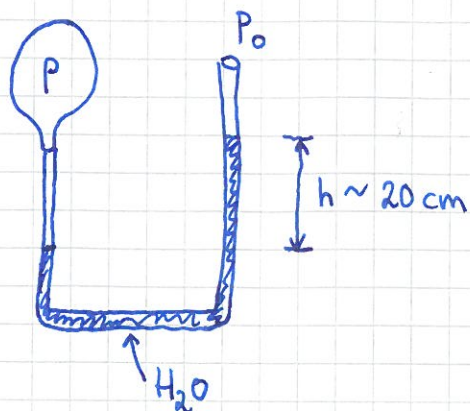


$$h = p/\mu g = 1.01 \cdot 10^5 / (13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.81) \text{ m}$$

$$\approx 0.760 \text{ m} = \underline{760 \text{ mm}}$$

Eks 3: Anslå overtrykket i en vanlig ballong.

Løsning:



$$\text{Dvs: } \Delta p = p - p_0 \sim 1.0 \cdot 10^3 \cdot 9.8 \cdot 0.2 \text{ Pa}$$

$$\sim 2000 \text{ Pa}$$

$$\sim \underline{0.02 \text{ atm}}$$

Max  $\Delta p$  med nesten tom ballong.

Velikjent: Må blåse hardest i starten.