

Termisk fysikk består av:

1. Termodynamikk: (=”varmens kraft”)
Makroskopiske likevektslover (“slik vi ser det”)
Temperatur. 1. og 2. hovedsetning

2. Kinetisk gassteori:

Mekanikkens lover på mikrokosmos

Uttrykk for indre energi U , C_p og C_v .

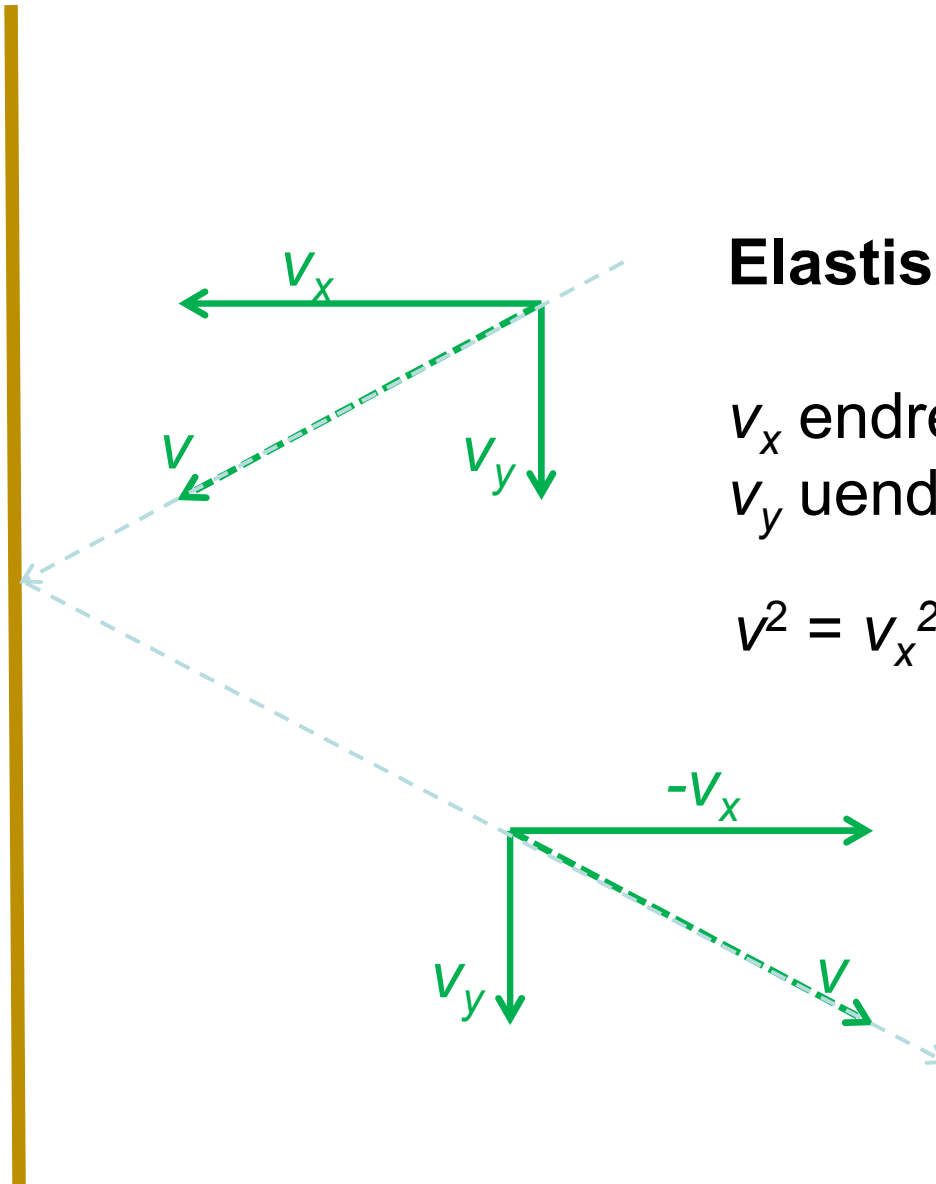
(Maxwells hastighetsfordeling 1866)

(Y&F kap. 18.3+4, LHL kap. 14, H&S kap.8)

3. Varmetransport:

Ledning, konveksjon, stråling.

Kraftstøt:
 $F \Delta t = m \Delta v_x$

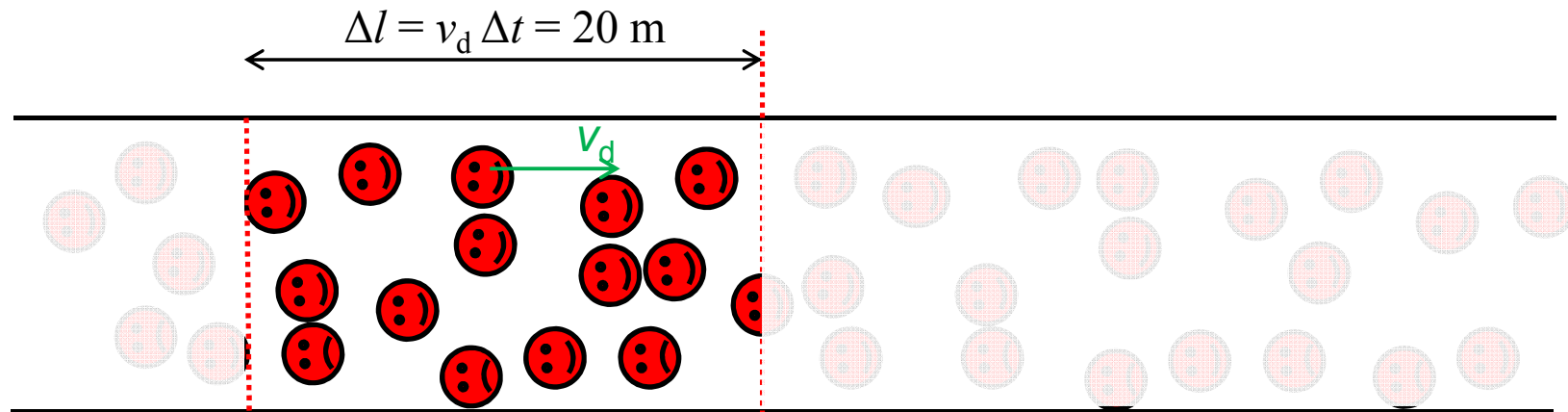


Elastisk kollisjon:

v_x endrer fortegn
 v_y uendra

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 \text{ uendra}$$

Folkevandringstelling



Antar alle har samme hastighet $v_d = 2 \text{ m/s}$.

Da er:

antall som passerer linja i $\Delta t = 10 \text{ s}$

= antall innenfor avstand $\Delta l = v_d \Delta t = 20 \text{ m}$ fra linja.

Kap. 18. Kinetisk teori.

Alle molekyler: $\langle E_k(\text{trans}) \rangle = 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$
 $\Rightarrow \langle v^2 \rangle = 3 k_B T / m = 3RT/M_W$

Translasjonshastigheter ved $T = 300 \text{ K}$:

	M_W	$v_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$
O_2	$32 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$	484 m/s
N_2	$28 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$	517 m/s
H_2	$2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$	1934 m/s

Kap. 18 Kinetisk teori

Gassteori (trykk pga. kollisjoner): $pV = N m v_x^2 = N m v^2 \cdot \frac{1}{3}$

og ideell gasslov: $pV = N k_B T$

gir $mv^2 = 3 k_B T$

og $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T$ (per molekyl)

Indre energi = middelvei av kinetisk translasjonsenergi:

$$\begin{aligned} U &= N \langle E_k \rangle = N \cdot \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \\ &= N \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T \\ &= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T \end{aligned}$$

Dette gjelder enatomige molekyl. For **toatomige** molekyl:

kinetisk translasjonsenergi

+ rotasjonsenergi

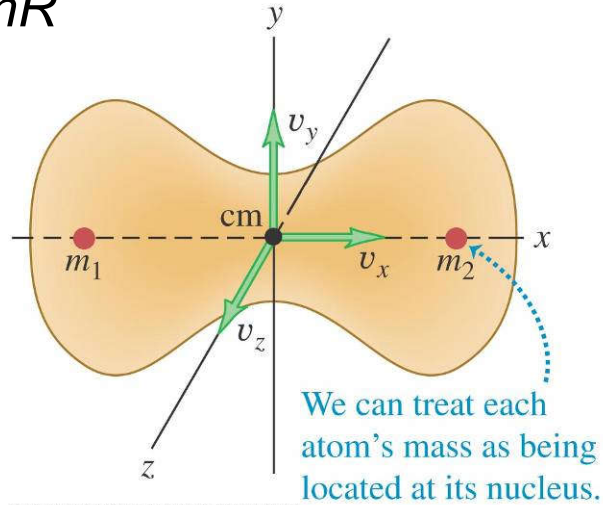
+ evt. vibrasjonsenergi

$$U = n \quad ? \quad \frac{1}{2} R T$$

Translasjon

$$\frac{1}{2} m v_x^2 + \frac{1}{2} m v_y^2 + \frac{1}{2} m v_z^2$$

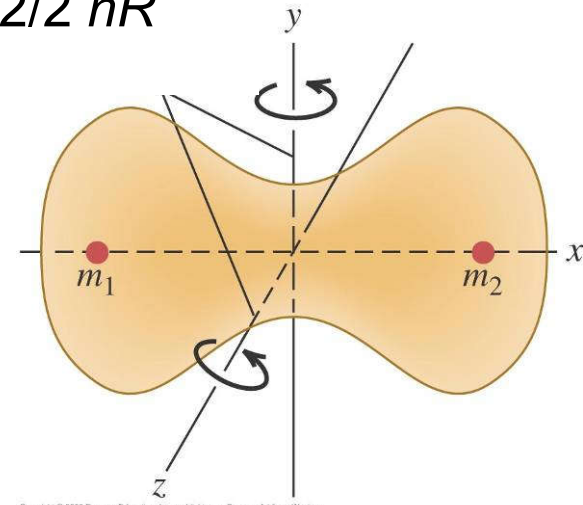
$$U = \frac{3}{2} nR$$



Rotasjon

$$\frac{1}{2} I_y \omega_y^2 + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2$$

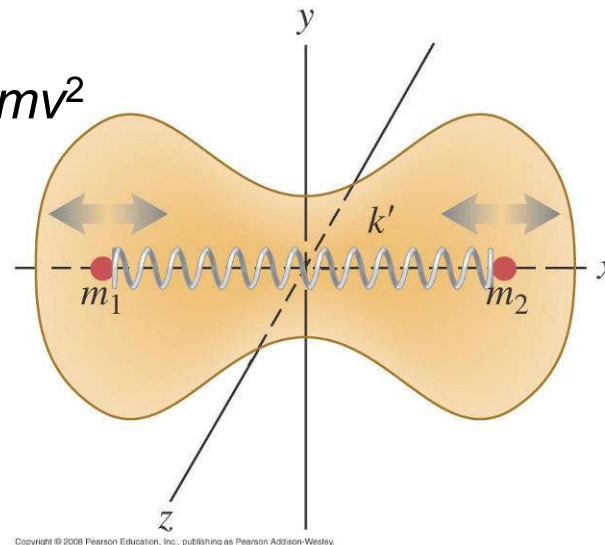
$$U = \frac{2}{2} nR$$



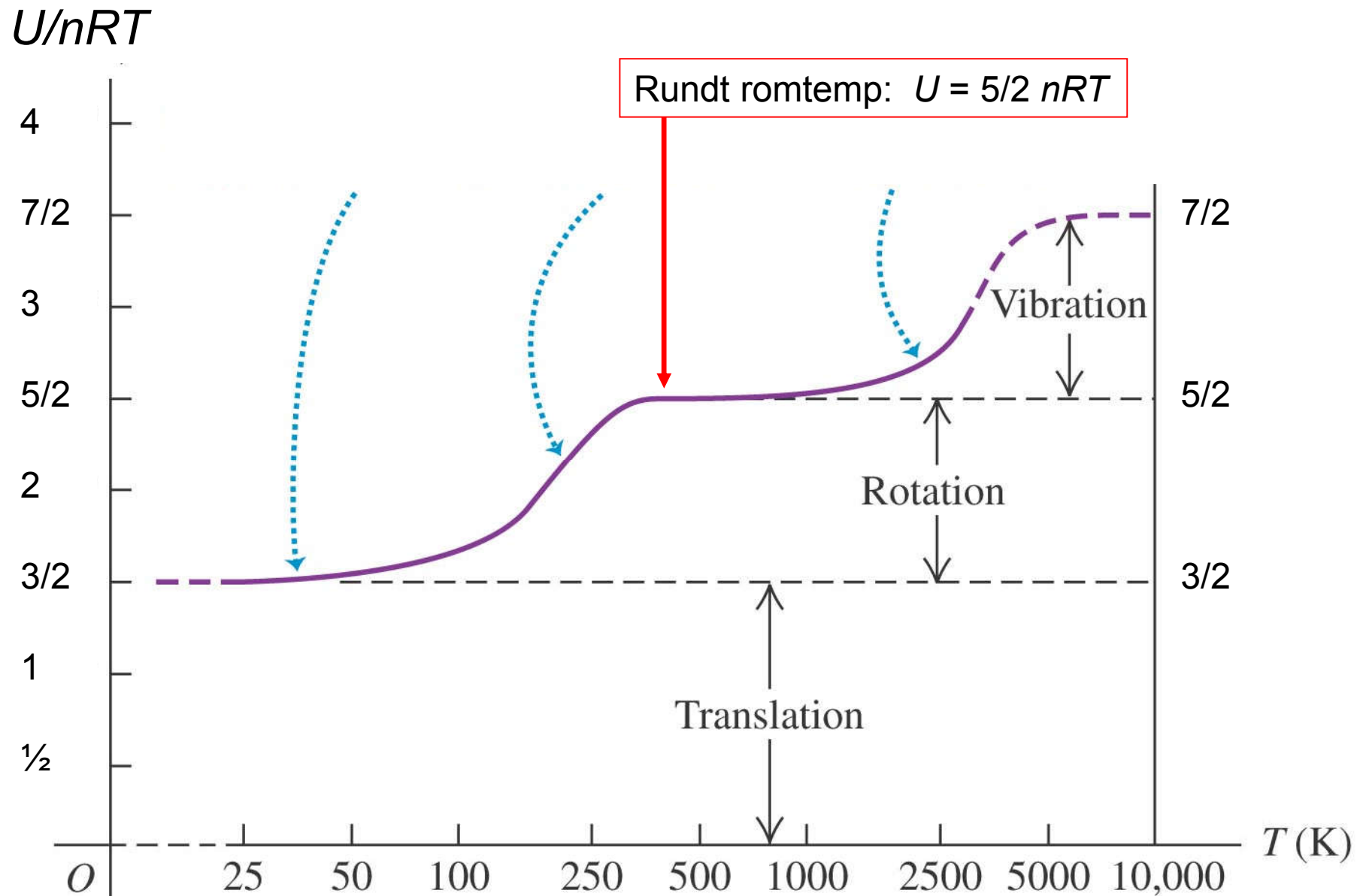
Vibrasjon

$$\frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

$$U = \frac{2}{2} nR$$



$U(T)$ for toatomig molekyl (hydrogen, H_2)



Essensen i kinetisk teori:

Ideell gasslov + trykk pga. kollisjoner gir for enatomig molekyl:

Indre energi = middelværdi av kinetisk translasjonsenergi:

$$\begin{aligned} U &= N \langle E_k \rangle = N \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \\ &= N \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T \\ &= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T \end{aligned}$$

*Utleddninger
er ikke
pensum*

For fleratomige molekyl: Tilleggsenergi fra rotasjon og vibrasjon

Ekvipartisjonsprinsippet:

Hvert energibidrag: $E = (\text{konst}) \xi^2$ (= "frihetsgrad")

gir bidrag: $U = \frac{1}{2} nRT$

Eksempler på frihetsgrader:

Translasjon (3): $\frac{1}{2} m v_x^2$; $\frac{1}{2} m v_y^2$; $\frac{1}{2} m v_z^2$

Rotasjon (2): $\frac{1}{2} I_y \omega_y^2$; $\frac{1}{2} I_z \omega_z^2$; $[\frac{1}{2} I_x \omega_x^2 \approx 0]$

Vibrasjon (2): $\frac{1}{2} k x^2$; $\frac{1}{2} m v^2$

Kap. 18 Kinetisk teori

Ideell gasslov + trykk pga. kollisjoner gir for **enatomig** molekyl:

Indre energi = middelvei av kinetisk translasjonsenergi:

$$\begin{aligned} U &= N \langle E_k \rangle = N \cdot \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \\ &= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T \end{aligned}$$

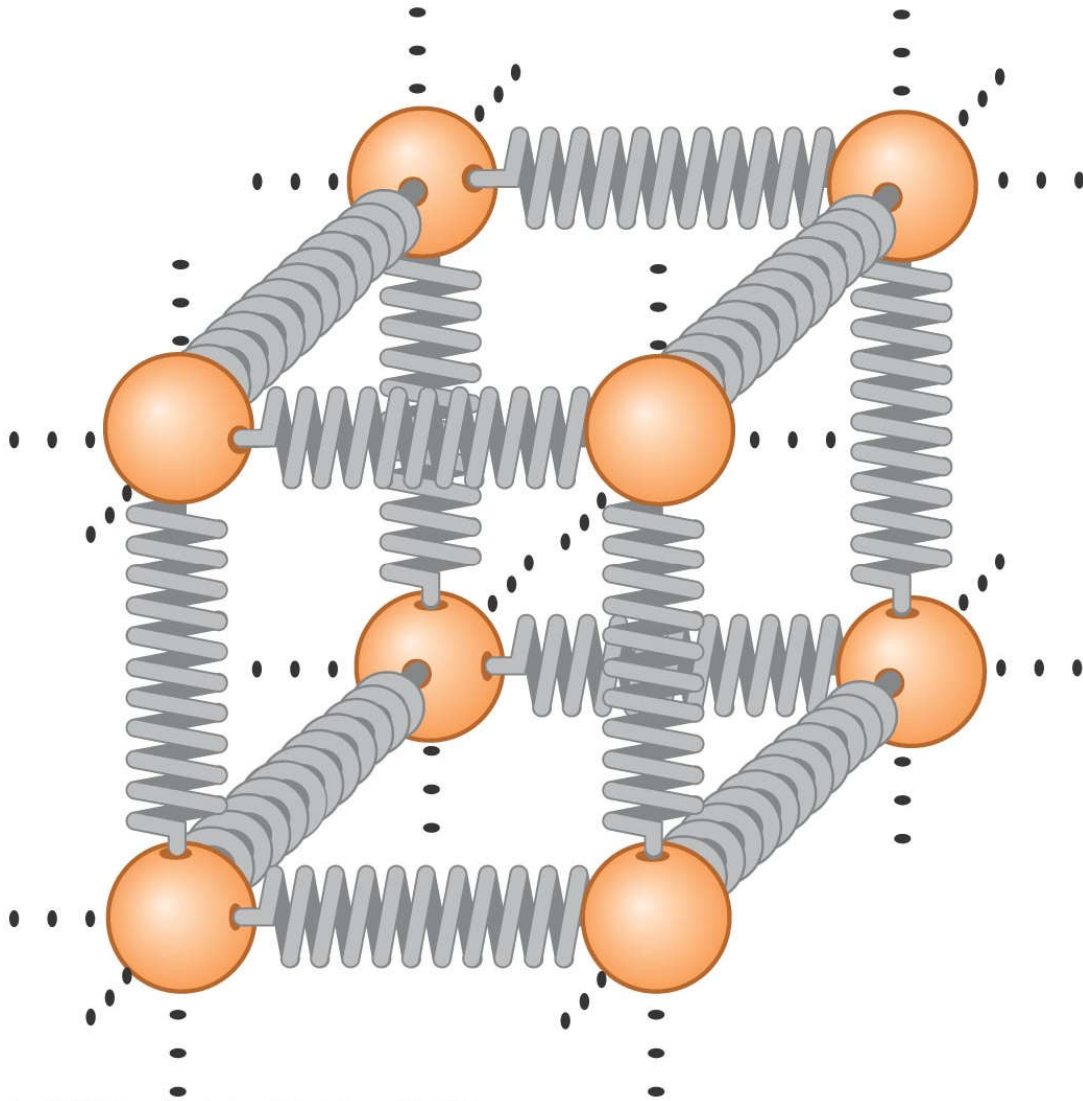
Varmekapasiteter

1) Konst. volum: $C_V = (dQ/dT)_V/n = (dU/dT)/n$

2) Konst. trykk: $C_p = (dQ/dT)_p/n = (dU/dT)/n + p (dV/dT)/n$

ideell gass: $C_p = C_V + R$

Figure 18.20



Metaller:

- Ingen translasjon
- Ingen rotasjon
- Tre vibrasjonsretninger á 2 frihetsgrader:

$$U = 6 \cdot \frac{1}{2} nRT = 3nRT$$

$$\begin{aligned} C_V \approx C_p &= dU/dT \cdot 1/n \\ &= 3R \\ &= 25 \text{ J/K mol} \end{aligned}$$

Kap. 18 Kinetisk teori

Ideell gasslov + trykk pga. kollisjoner gir for **enatomig** molekyl:

Indre energi = middelvei av kinetisk translasjonsenergi:

$$U = N \langle E_k \rangle = N \cdot \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$$
$$= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T$$

Varmekapasiteter

1) Konst. volum: $C_V = (dQ/dT)_V/n = (dU/dT)_V/n$

2) Konst. trykk: $C_p = (dQ/dT)_p/n = (dU/dT)_V/n + p(dV/dT)_V/n$

ideell gass: $C_p = C_V + R$

	enatomig ideell gass	toatomig ideell gass	metall
U	$3/2 nRT$	$5/2 nRT$	$3 nRT$
C_V	$3/2 R$	$5/2 R$	$3 R$
C_p	$5/2 R$	$7/2 R$	$3 R$

Table 17.3 Approximate Specific Heats and Molar Heat Capacities
(Constant Pressure)

Metaller:
 $3R \approx 25 \text{ J/K mol}$

Substance	Specific Heat, c (J/kg · K)	Molar Mass, M (kg/mol)	Molar Heat Capacity, C (J/mol · K)
Aluminum	910	0.0270	24.6
Beryllium	1970	0.00901	17.7
Copper	390	0.0635	24.8
Ethanol	2428	0.0461	111.9
Ethylene glycol	2386	0.0620	148.0
Ice (near 0°C)	2100	0.0180	37.8
Iron	470	0.0559	26.3
Lead	130	0.207	26.9
Marble (CaCO ₃)	879	0.100	87.9
Mercury	138	0.201	27.7
Salt (NaCl)	879	0.0585	51.4
Silver	234	0.108	25.3
Water (liquid)	4190	0.0180	75.4

Molar Heat Capacities in J/mol·K of Various Gases at 25°C

Gas	C_p	C_V	C_V/R	$C_p - C_V$	$(C_p - C_V)/R$
<i>Monatomic</i>					
He	20.79	12.52	1.51	8.27	0.99
Ne	20.79	12.68	1.52	8.11	0.98
Ar	20.79	12.45	1.50	8.34	1.00
Kr	20.79	12.45	1.50	8.34	1.00
Xe	20.79	12.52	1.51	8.27	0.99
<i>Diatomic</i>					
N ₂	29.12	20.80	2.50	8.32	1.00
H ₂	28.82	20.44	2.46	8.38	1.01
O ₂	29.37	20.98	2.52	8.39	1.01
CO	29.04	20.74	2.49	8.30	1.00
<i>Polyatomic</i>					
CO ₂	36.62	28.17	3.39	8.45	1.02
N ₂ O	36.90	28.39	3.41	8.51	1.02
H ₂ S	36.12	27.36	3.29	8.76	1.05
H ₂ O (100 °C)	37.47	28.03	3.37	9.44	1.14

$3/2R$

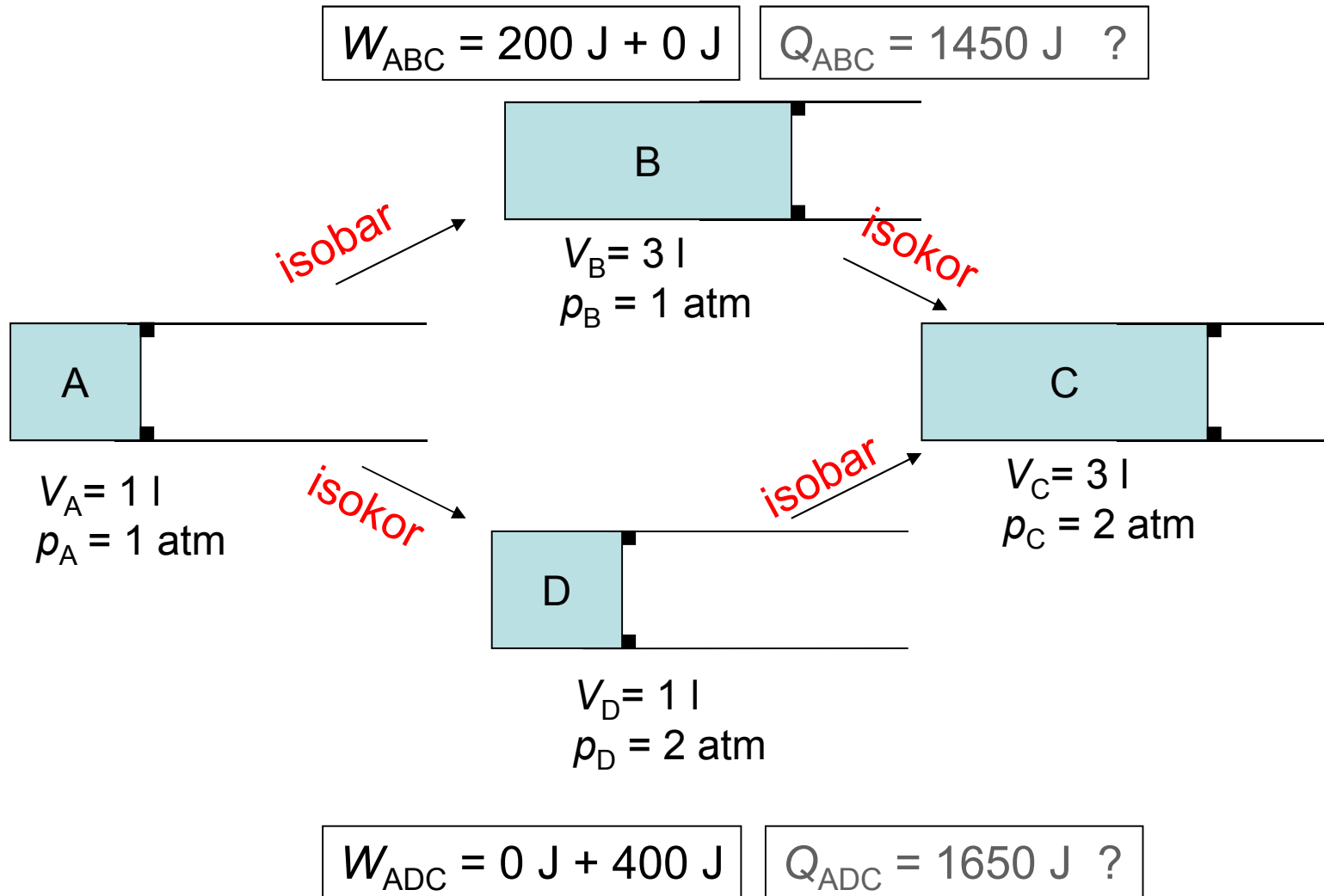
$5/2R$

ca. $7/2R$

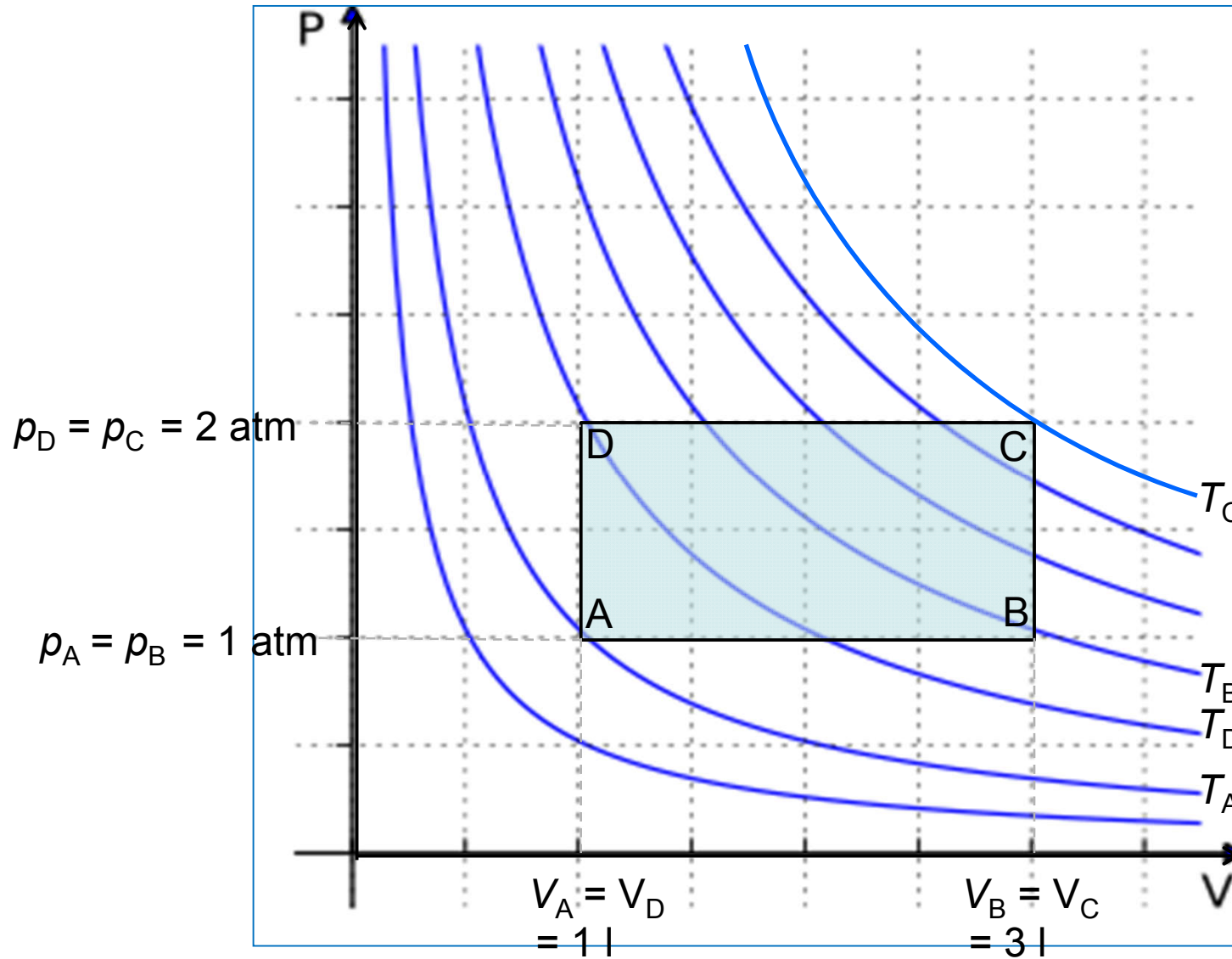
Alle:
 $C_p - C_V = R$

Eks.1. Q , W og ΔU for isobarer og isokorer

Nå: Beregning Q

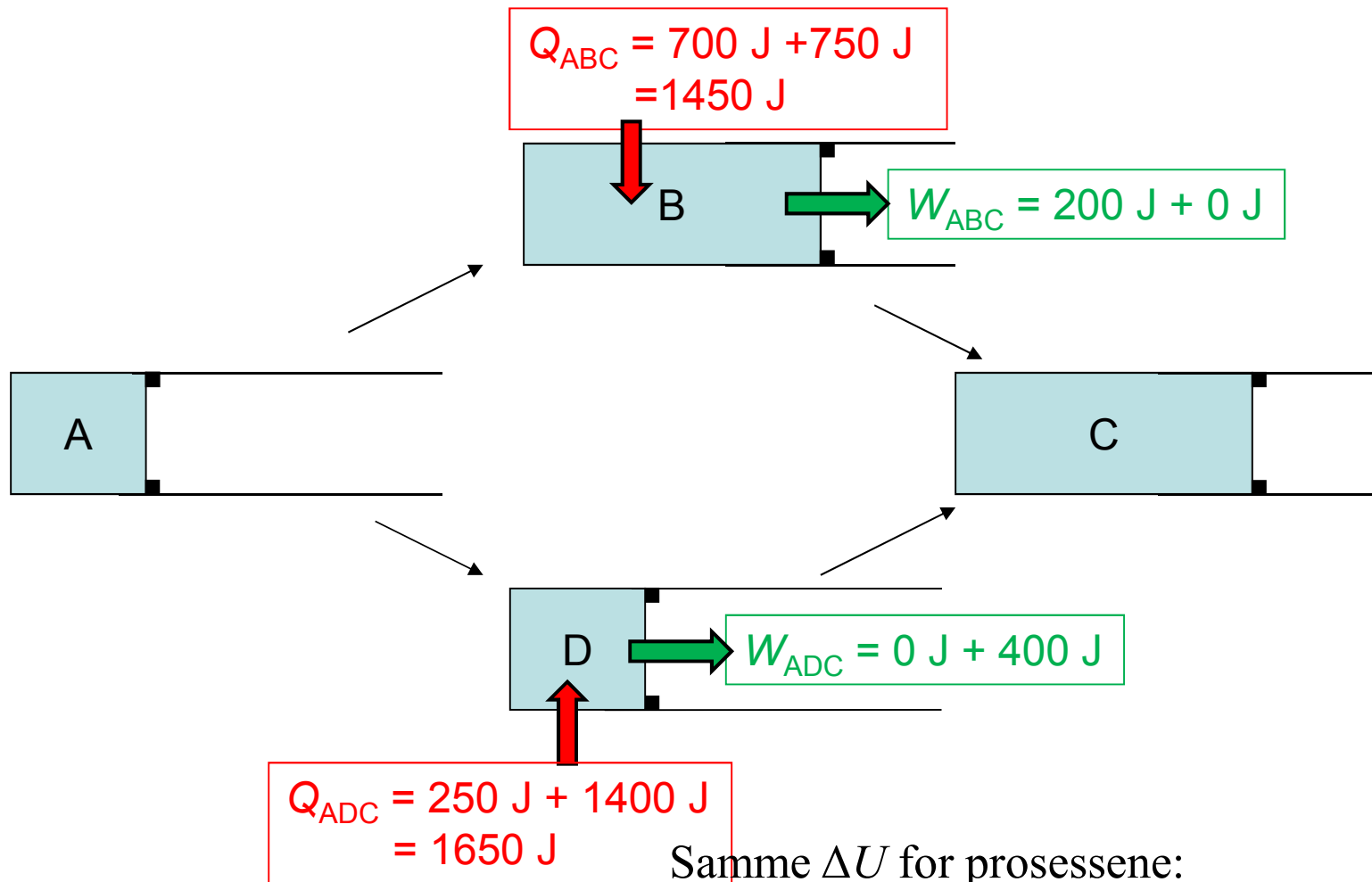


Eks.1. Q , W og ΔU for isobarer og isokorer Nå: Beregning Q



Eks.1. Q , W og ΔU for isobarer og isokorer

Inntegning Q og W med piler



Samme ΔU for prosessene:

$$ADC: \Delta U = Q - W = 1650 \text{ J} - 400 \text{ J} = 1250 \text{ J}$$

$$ABC: \Delta U = Q - W = 1450 \text{ J} - 200 \text{ J} = 1250 \text{ J}$$

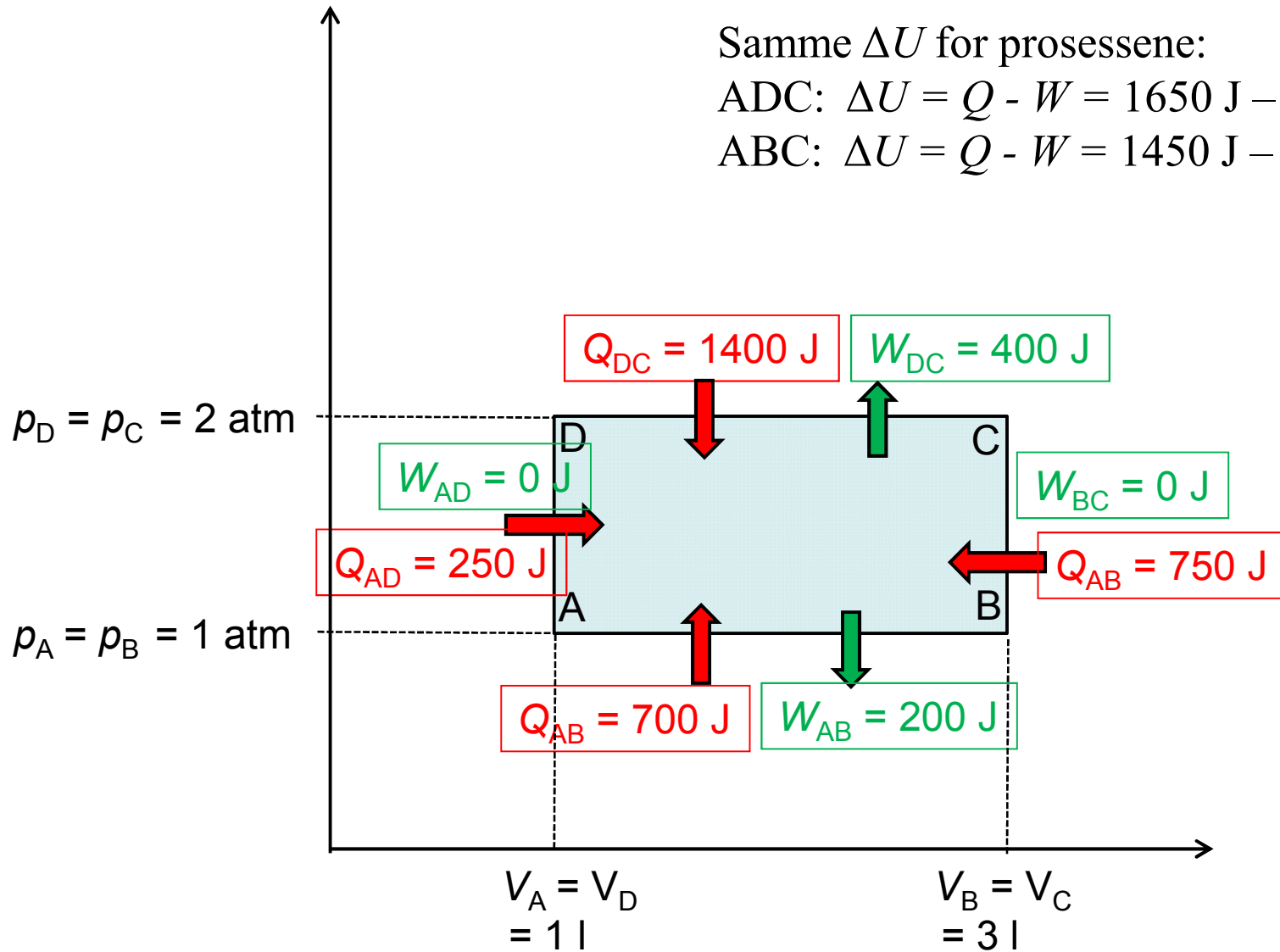
Eks.1. Q , W og ΔU for isobarer og isokorer

Inntegning Q og W med piler

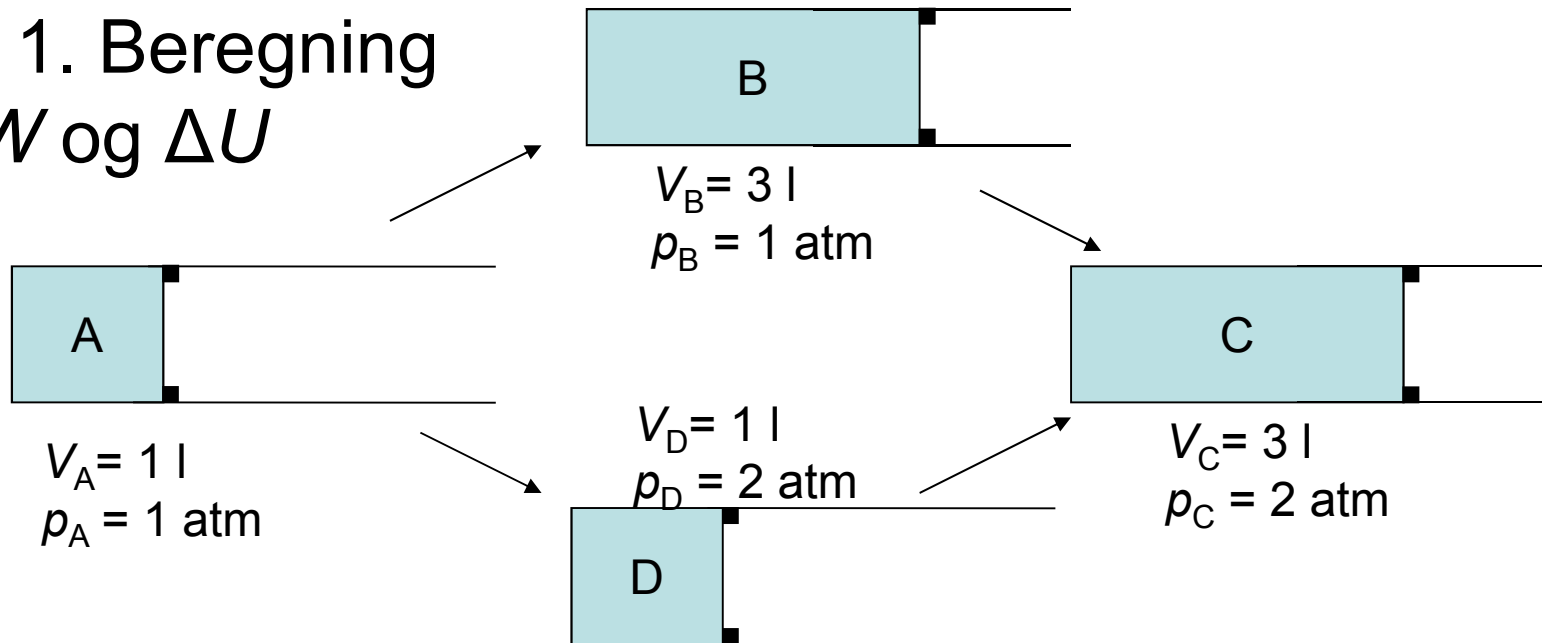
Samme ΔU for prosessene:

$$\text{ADC: } \Delta U = Q - W = 1650 \text{ J} - 400 \text{ J} = 1250 \text{ J}$$

$$\text{ABC: } \Delta U = Q - W = 1450 \text{ J} - 200 \text{ J} = 1250 \text{ J}$$



Eks. 1. Beregning Q, W og ΔU



Samme ΔU for prosessene:

$$\text{ADC: } \Delta U = Q - W = 1650 \text{ J} - 400 \text{ J} = 1250 \text{ J}$$

$$\text{ABC: } \Delta U = Q - W = 1450 \text{ J} - 200 \text{ J} = 1250 \text{ J}$$

W avhengig vegen (prosessen): Ikke tilst.funksjon. ~~ΔW~~ ~~dW~~

W δW

Q avhengig vegen (prosessen): Ikke tilst.funksjon. ~~ΔQ~~ ~~dQ~~

Q δQ

Differansen U uavhengig vegen, tilst.funksjon: $\Delta U = Q - W$

$$dU = \delta Q - \delta W$$

Kap. 18. Kinetisk teori. Oppsummering

Ideell gasslov + trykk pga. kollisjoner (Newton 2) gir:

Indre energi = middelvei av termisk kinetisk energi:

Enatomige molekyler, kun translasjonsenergi:

$$U = N \langle E_k(\text{trans}) \rangle = N \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = N \mathbf{3} \frac{1}{2} k_B T \quad \text{Frihetsgrader: } n_f = \mathbf{3}$$

Toatomige molekyler, translasjonsenergi + rotasjonsenergi:

$$U = N \langle E_k(\text{trans}) \rangle + N \langle E_k(\text{rot}) \rangle = N \mathbf{5} \frac{1}{2} k_B T \quad \text{Frihetsgrader: } n_f = \mathbf{5}$$

Varmekapasiteter ideell gass

Konst. volum: $C_V = (dQ/dT)_V$ $1/n = dU/dT$ $1/n$, $C_V = n_f \frac{1}{2} R$

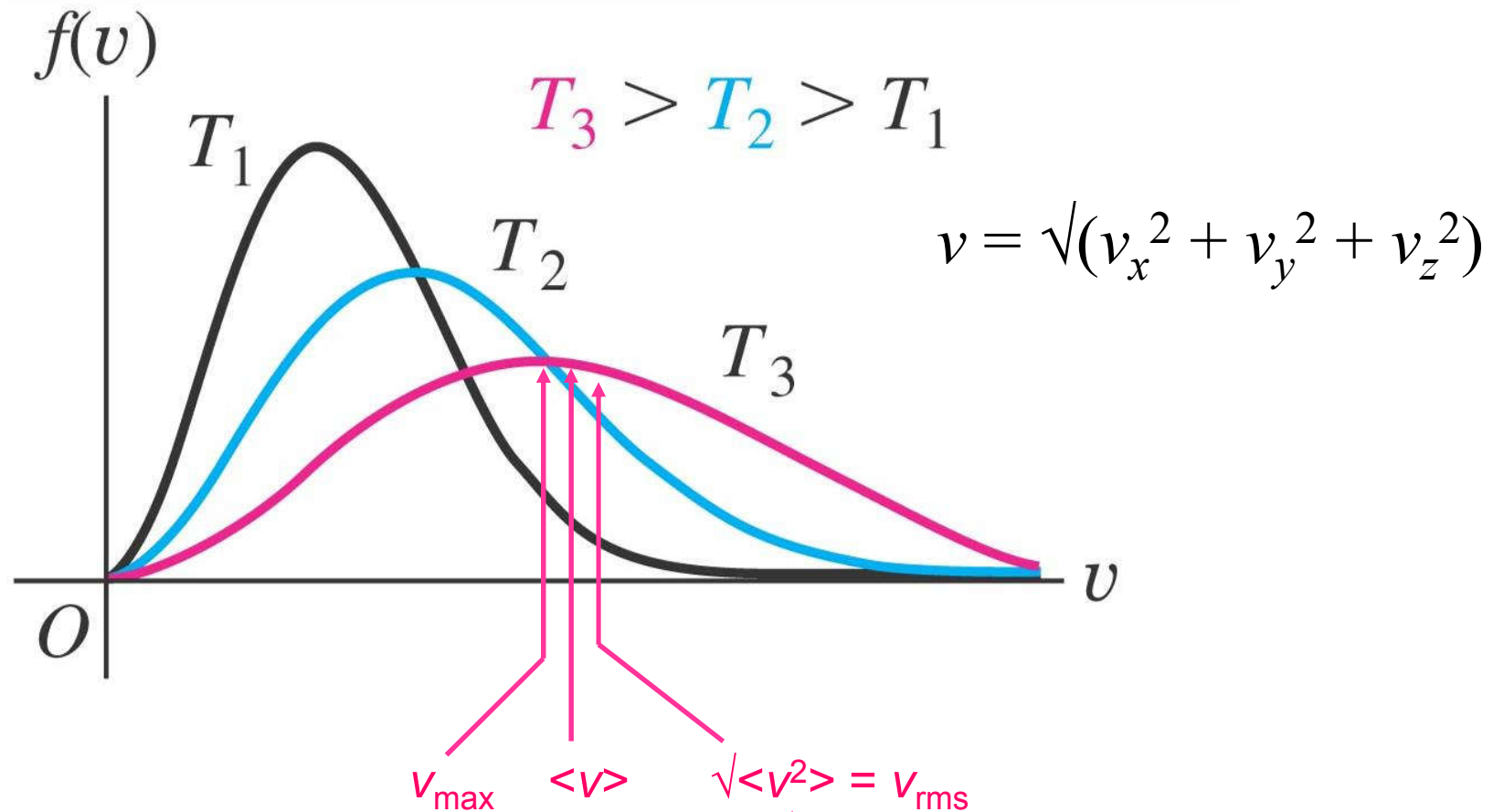
Konst. trykk: $C_p = (dQ/dT)_p$ $1/n = (dU + p dV)/dT$ $1/n$, $C_p = n_f \frac{1}{2} R + R$

	enatomig ideell gass	toatomig ideell gass	metall
U	$3/2 nRT$	$5/2 nRT$	$3 nRT$
C_V	$3/2 R$	$5/2 R$	$3 R$
C_p	$5/2 R$	$7/2 R$	$3 R$

Maxwells hastighetsfordeling (orienterende stoff)

Antatt: Alle molekyler samme hastighet v_x etc.

Reelt: Hastighetsfordeling mellom 0 og ∞ ifølge Maxwell:

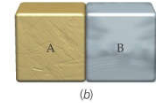
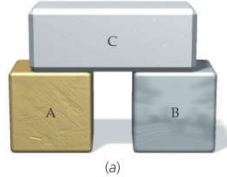


Brukt i utledningen for ideell gass

Oppsummering varmelære så langt:

0. Hovedsetning = Termisk likevekt:

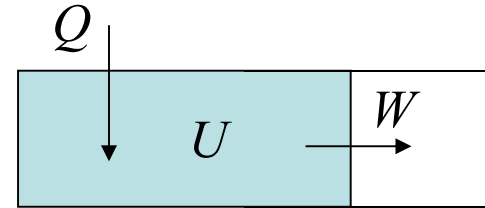
$$T_A = T_C \text{ og } T_B = T_C \rightarrow T_A = T_B$$



1. Hovedsetning = Energibevarelse:

$$\Delta U = Q - W$$

(endring indre energi) = (varme inn) – (arbeid utført)



$W = \int p \, dV$ avhengig vegen: Ikke tilstandsfunksjon.

Isokor: $W = 0$; Isobar: $W = p \Delta V$; Isoterm: $W = nRT \ln V_2/V_1$

Q beregnes fra 1.H: $Q = \Delta U + W$, eller

$$Q_p = n C_p \Delta T; \quad Q_V = n C_V \Delta T. \text{ Ikke tilst.funksjon}$$

2. Hovedsetning = Mulige prosesser:

Varme kan ikke strømme fra kaldt til varmt legeme. Mer seinere.