

Termisk fysikk består av:

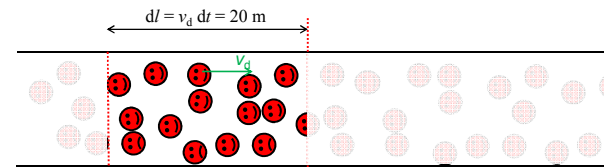
1. Termodynamikk: (=“varmens kraft”)
 - Makroskopiske likevektslover (“slik vi ser det”)
 - Temperatur. 1. og 2. hovedsetning

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.

Folkevandringstelling



Antar alle har samme hastighet $v_d = 2$ m/s.

Da er:

antall som passerer linja i $dt = 10$ s

= antall innenfor avstand $dl = v_d dt = 20$ m fra linja

Kap. 18 Kinetisk teori

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

og ideell gasslov: $pV = N \cdot k_B T$

gir $\frac{1}{3} m \overline{v^2} = k_B T$

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

Indre energi = middelvei av kinetisk translasjonsenergi:

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

$$= N \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T$$

$$= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T$$

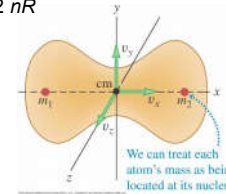
Dette gjelder enatomige molekyl. For **toatomige** molekyl:

Kinetisk translasjonsenergi + rotasjonsenergi + evt. vibrasjonsenergi $U = n \cdot ? \cdot \frac{1}{2} R T$

Translasjon

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

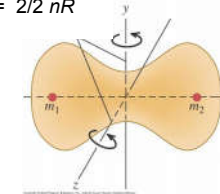
$$U = 3/2 nR$$



Rotasjon

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

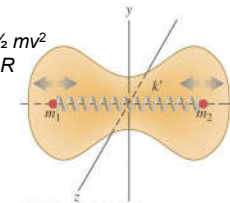
$$U = 2/2 nR$$



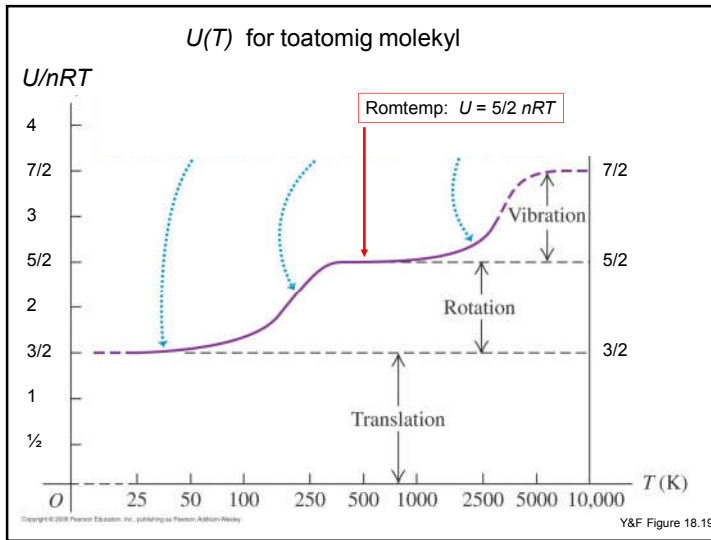
Vibrasjon

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

$$U = 2/2 nR$$



Y&F Figure 18.18



Essensen i kinetisk teori:

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

Indre energi = middelvei av kinetisk translasjonsenergi:

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

$$= N \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T$$

$$= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T$$

Utledninger er ikke pensum

Ekvipartisjonsprinsippet:

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

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

$$= n \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} R T$$

Varmekapasiteter

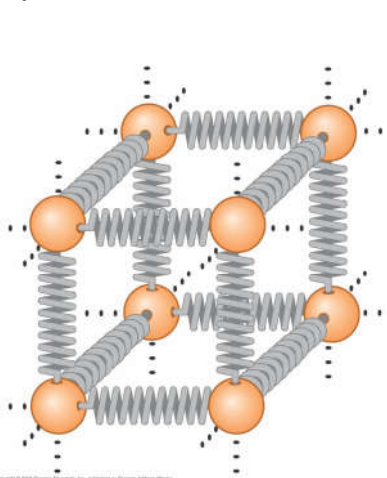
1) Konst. volum: $C_V = (dQ/dT)_V/n = (dU/dT)/n$

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

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	$5/2 R$	$7/2 R$	$3 R$

Figure 18.20



Metaller:

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

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

$$C_V \approx C_p = dU/dT \cdot 1/n$$

$$= 3R$$

$$= 25 \text{ J/K mol}$$

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

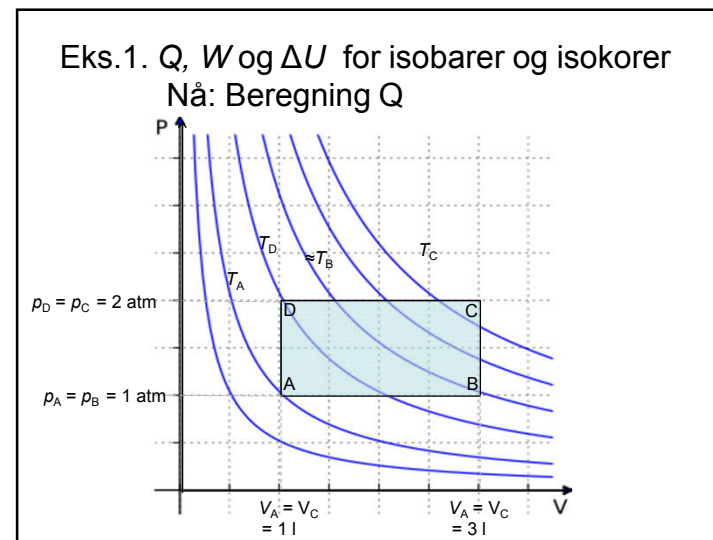
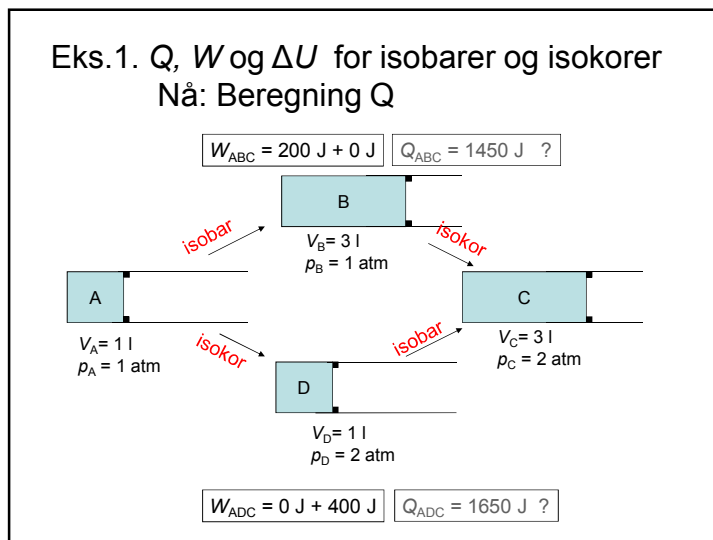
Substance	Specific Heat, c (J/kg·K)	Molar Mass, M (kg/mol)	Molar Heat Capacity, C (J/mol·K)
Aluminum	910	0.0270	24.6
Beryllium	1970	0.00901	17.7
Copper	390	0.0635	24.8
Ethanol	2428	0.0461	111.9
Ethylene glycol	2386	0.0620	148.0
Ice (near 0°C)	2100	0.0180	37.8
Iron	470	0.0559	26.3
Lead	130	0.207	26.9
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

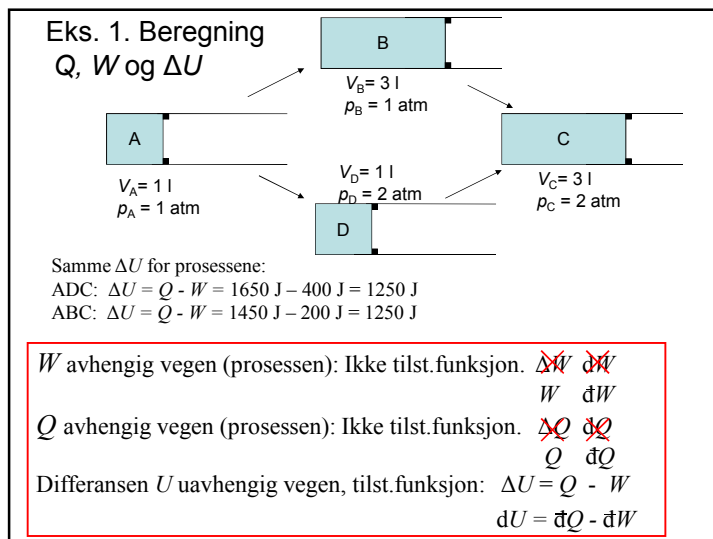
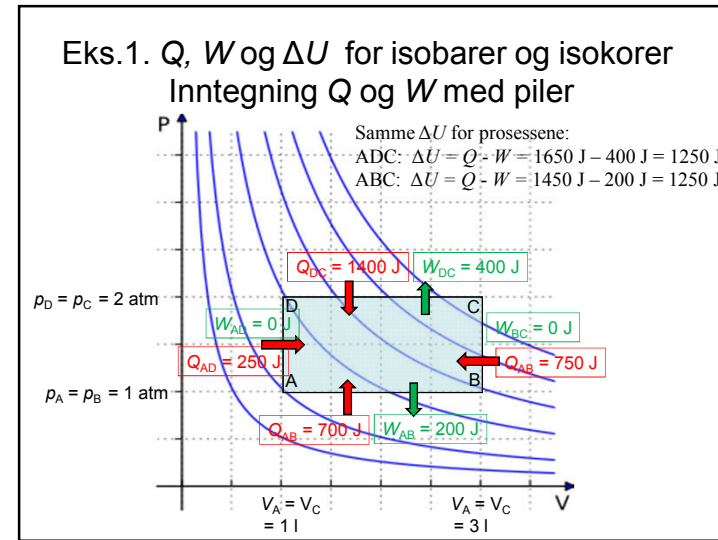
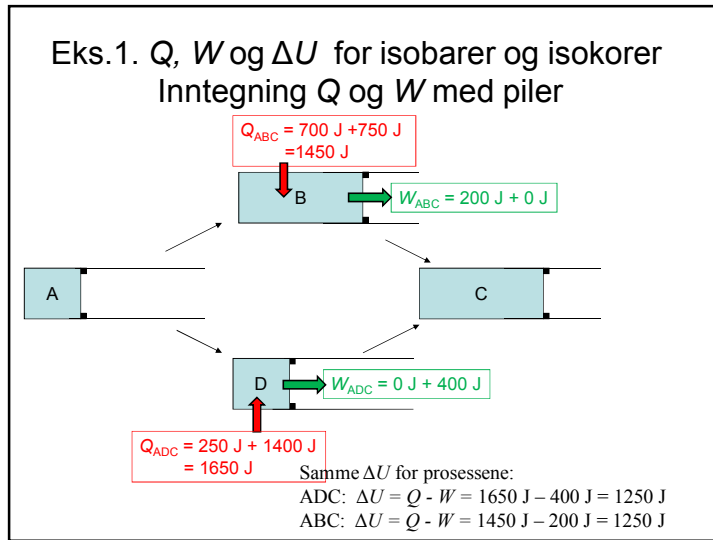
Metaller:
3R ≈ 25 J/K·mol

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

Gas	C_p	C_v	C_v/R	$C_p - C_v$	$(C_p - C_v)/R$
Monatomic					
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
Diatomic					
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
Polyatomic					
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

Alle: $C_p - C_v = R$





Kap. 18. Kinetisk teori. Oppsummering

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

Indre energi = middelverdi av termisk kinetisk energi:

Enatomige molekyler, kun translasjonsenergi:

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

Toatomige molekyler, translasjonsenergi + rotasjonsenergi:

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

Varmekapasiteter ideell gass

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

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

	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	$5/2 R$	$7/2 R$	$3 R$

Kap. 18. Kinetisk teori. Oppsummering

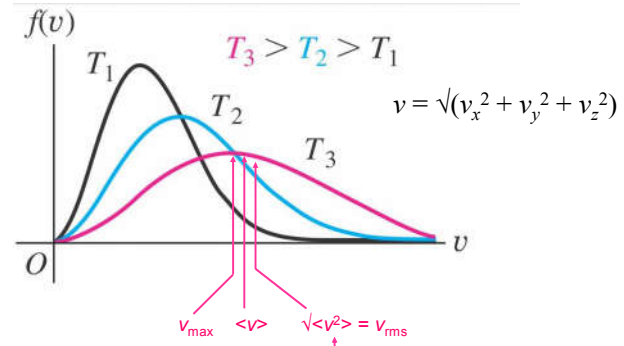
Alle molekyler: $\langle E_k(\text{trans}) \rangle = 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$
 $\Rightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \cdot k_B T / m = 3RT/M_w$

Translasjonshastigheter ved $T = 300$ K:

	M_w	$v_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$
O ₂	32·10 ⁻³ kg/mol	484 m/s
N ₂	28·10 ⁻³ kg/mol	517 m/s
H ₂	2·10 ⁻³ kg/mol	1934 m/s

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

Y&F Figure 18.23a