

## 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, H&S kap.8, LHL kap. 14)

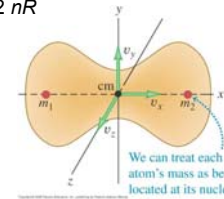
### 3. Varmetransport:

Ledning, konveksjon, stråling.

#### Translasjon

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

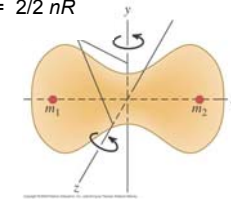
$$U = \frac{3}{2} nR$$



#### Rotasjon

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

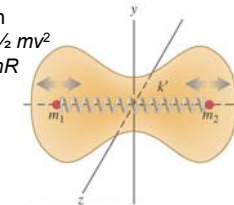
$$U = \frac{2}{2} nR$$



#### Vibrasjon

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

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



Y&F Figure 18.18

### Essensen i kinetisk teori:

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

**Indre energi** = middelerverdi 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:  $U = \frac{1}{2} nRT$

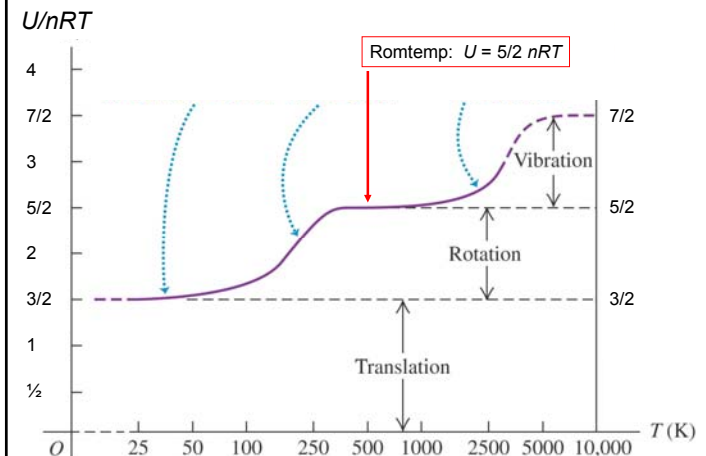
Eksempler på frihetsgrader:

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

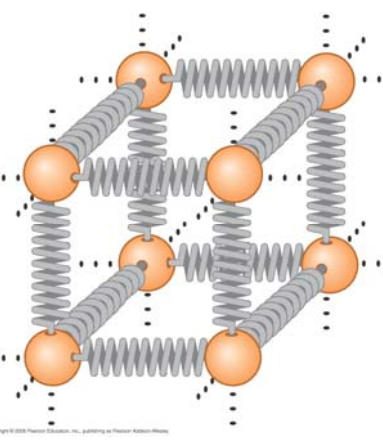
Vibrasjon (2):  $\frac{1}{2} k x^2$ ;  $\frac{1}{2} m v^2$

### $U(T)$ for toatomig molekyl



Y&F Figure 18.19

Figure 18.20



**Metaller:**

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

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

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

**Kap. 18 Kinetisk teori**

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

**Indre energi** = middelverdi 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
$U$	$3/2 nRT$	$5/2 nRT$	$3 nRT$
$C_V$	$3/2 R$	$5/2 R$	$3 R$
$C_p$	$5/2 R$	$7/2 R$	$3 R$

**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 <sub>3</sub> )	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:  $3R \approx 25 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$

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

Gas	$C_p$	$C_V$	$C_V/R$	$C_p - C_V$	$(C_p - C_V)/R$
<b>Monatomic</b>					
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
<b>Diatomic</b>					
N <sub>2</sub>	29.12	20.80	2.50	8.32	1.00
H <sub>2</sub>	28.82	20.44	2.46	8.38	1.01
O <sub>2</sub>	29.37	20.98	2.52	8.39	1.01
CO	29.04	20.74	2.49	8.30	1.00
<b>Polyatomic</b>					
CO <sub>2</sub>	36.62	28.17	3.39	8.45	1.02
N <sub>2</sub> O	36.90	28.39	3.41	8.51	1.02
H <sub>2</sub> S	36.12	27.36	3.29	8.76	1.05
H <sub>2</sub> O (100 °C)	37.47	28.03	3.37	9.44	1.14

Alle:  $C_p - C_V = R$

**Eks. 1. Beregning Q, W og ΔU**

ADC:  $\Delta U = Q - W = 1650 \text{ J} - 400 \text{ J} = 1250 \text{ J}$   
 ABC:  $\Delta U = Q - W = 1450 \text{ J} - 200 \text{ J} = 1250 \text{ J}$

$W$  avhengig vegen (prosessen): Ikke tilst.funksjon.  ~~$\frac{\Delta W}{\Delta W}$~~   
 $Q$  avhengig vegen (prosessen): Ikke tilst.funksjon.  ~~$\frac{\Delta Q}{\Delta Q}$~~   
 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:

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

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

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

	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:**  $\langle E_k(\text{trans}) \rangle = 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$

$$\Rightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \cdot k_B T / m = 3RT/M_W$$

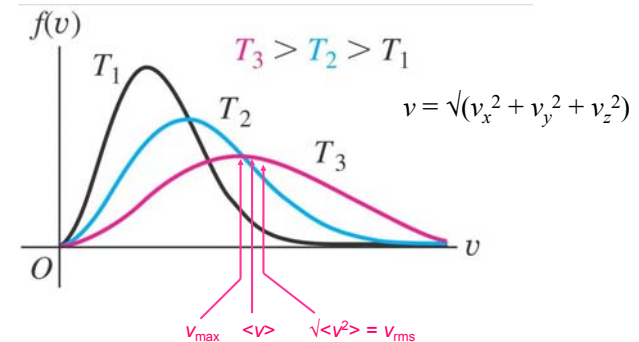
Translasjonshastigheter ved 300 K:

	$M_W$	$v_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$
$O_2$	$32 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$	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

**Maxwells hastighetsfordeling (orienterende stoff)**

Antatt: Alle molekyler samme hastighet  $v_x$  etc.

Reelt: Hastighetsfordeling mellom 0 og  $\infty$  ifølge Maxwell:



Brukt i utledningen for ideell gass

Y&F Figure 18.23a