

# Molaariset ominaislämpökapasiteetit

Yleensä, kun systeemiin tuodaan lämpöä, sen lämpötila nousee.  
(Ei kuitenkaan aina, kannattaa muistaa, että työllä voi olla osuutta asiaan.)

Lämmön ja lämpötilan muutoksen suhdetta systeemissä  
kutsutaan *lämpökapasiteetiksi*

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Se voi riippua vaikka prosessista, jonka kautta lämpö saapuu.

Jos systeemi koostuu vain yhdenlaisesta aineesta, voidaan  
puhua *ominaislämpökapasiteeteista* (**ainemäärän** tai **massan** suhteen).

$$\frac{C}{n}$$

$$c = \frac{C}{m}$$

# Ideaalikaasun molaariset ominaislämpökapasiteetit

Katsotaan sitten tilannetta ideaalikaasumaailmassa.

Isokoorinen prosessi

$$Q = \Delta E = \frac{3}{2}nR\Delta T$$



$$C_V = \frac{C}{n} = \frac{1}{n} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{3}{2}R$$

Isobaarinen prosessi

$$Q = \Delta E + W = \frac{3}{2}nR\Delta T + P\Delta V$$

$$= \frac{3}{2}nR\Delta T + nR\Delta T$$



$$C_P = \frac{C}{n} = \frac{1}{n} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{3}{2}R + R$$
$$= C_V + R$$

Erityisesti kannattaa huomata:

1. Molaarinen ominaislämpökapasiteetti on sama kaikille ideaalikaasuille
2. Isobaarisen ja isokoorisen ominaislämpökapasiteetin erotus on vakio

# Ideaalikaasun molaariset ominaislämpökapasiteetit

Kuinka totta tämä on reaalikaasuille?

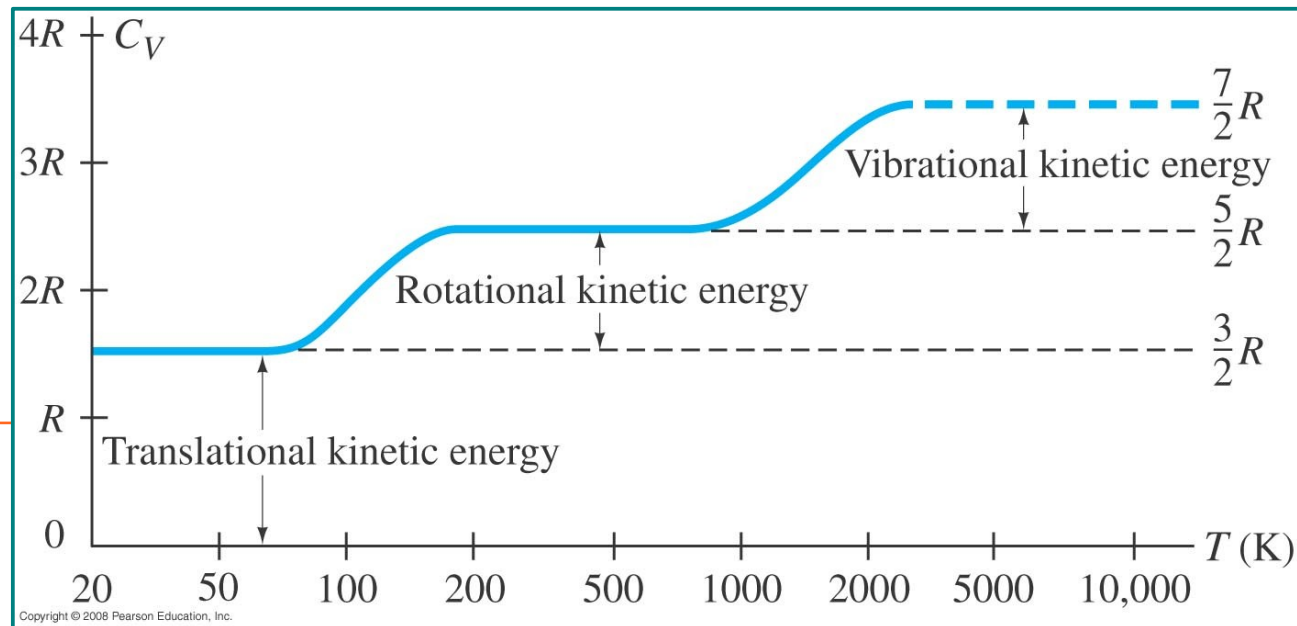
**TABLE 19-4 Specific Heats of Gases at 15°C**

Gas	Specific heats (kcal/kg · K)		Molar specific heats (cal/mol · K)	
	$c_V$	$c_P$	$C_V$	$C_P$
Monatomic				
He	0.75	1.15	2.98	4.97
Ne	0.148	0.246	2.98	4.97

$$R = 1,99 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}$$

eli aika tarkkaa on...

Moniatomisille kaasuille asia ei ole aivan yhtä selvä



# Ideaalikaasun molaariset ominaislämpökapasiteetit

Meidän on hieman täydennettävä ideaalikaasuteoriaamme.

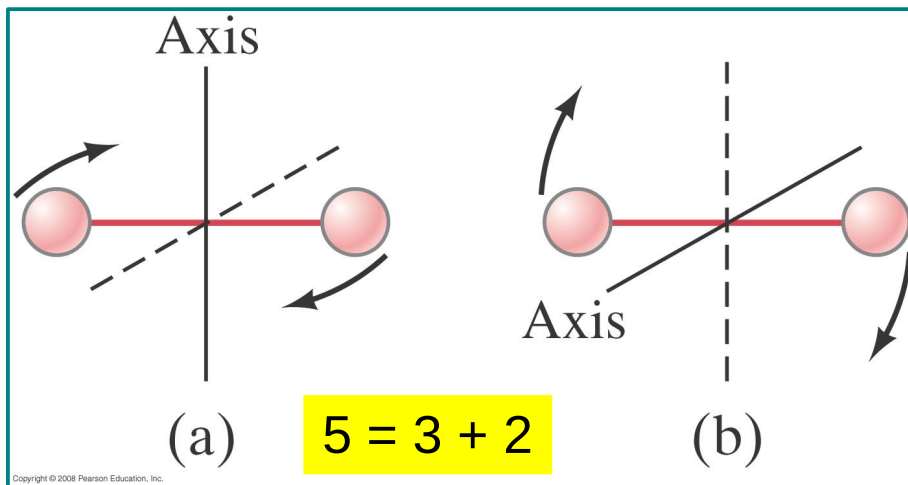
Alkuperäinen oletus oli, että ideaalikaasun molekyyleillä on vain liike-energiaa

$$E = \frac{3}{2}nRT = 3 \cdot \frac{1}{2}nRT$$

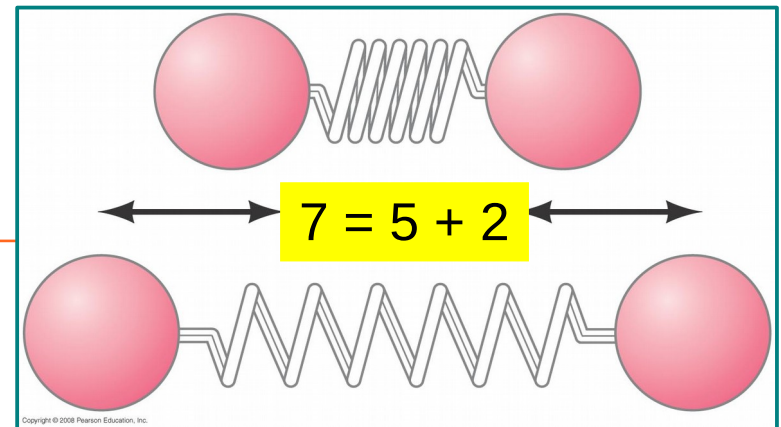
Liikettä kolmeen suuntaan

**Ekvipartitioteoreema:** energia jakautuu tasan kaikille kaasun vapausasteille

Kaksi pyörimisakselia:



Kaksi vapausastetta värähtelyssä:



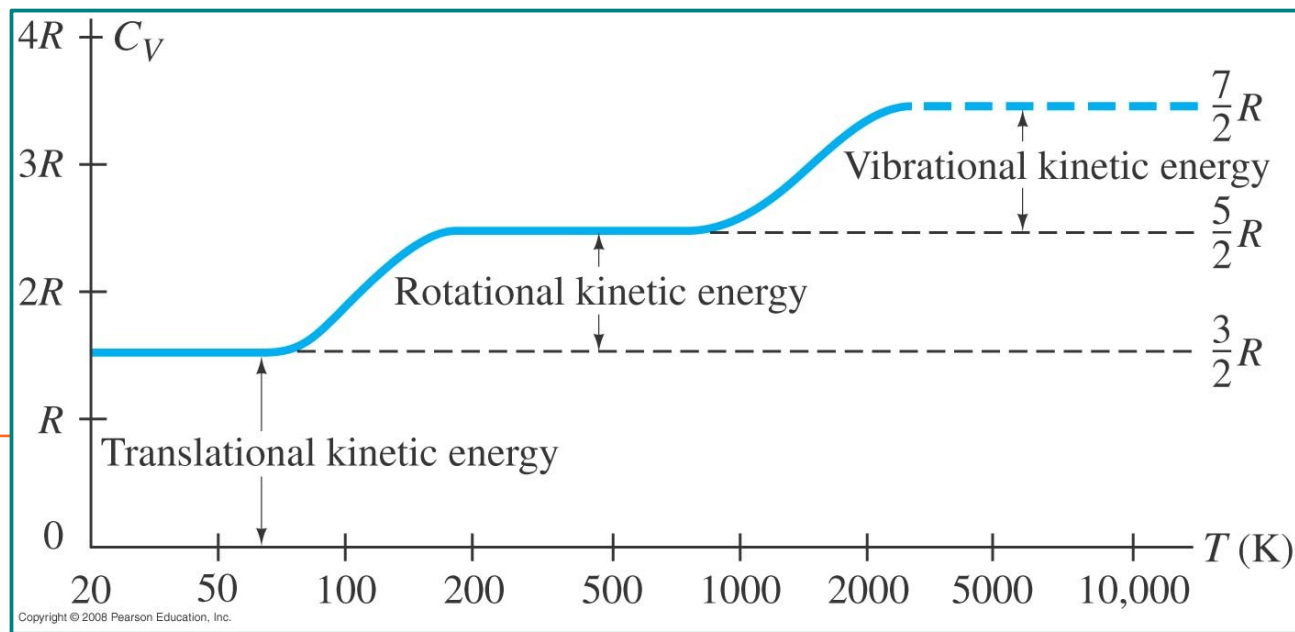
# Ideaalikaasun molaariset ominaislämpökapasiteetit

Moniatomisen ideaalikaasun sisäenergia onkin

$$E = \frac{f}{2} nRT$$

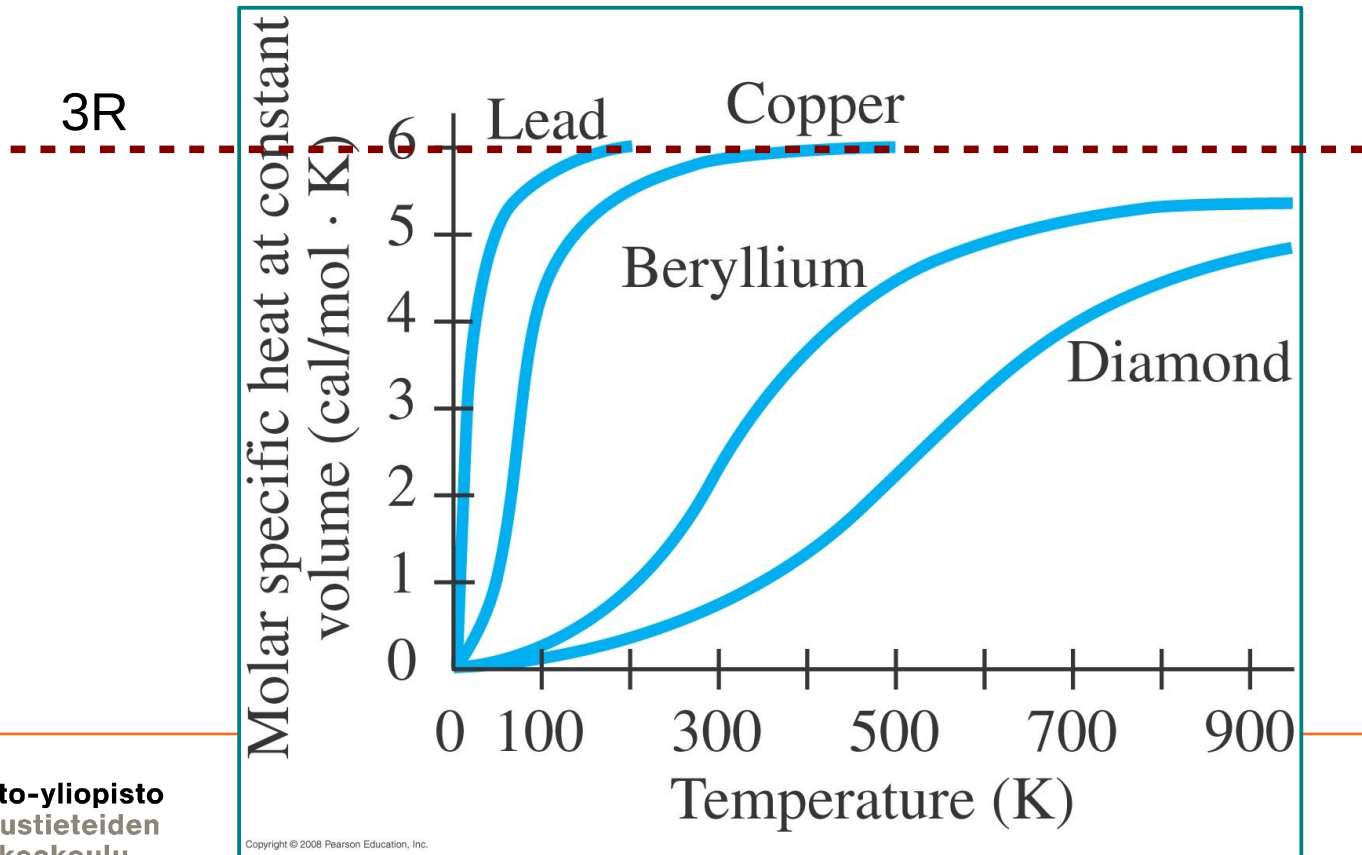
missä  $f$  on kaasun vapausasteiden lukumäärä

jolloin suoraan  $C_V = \frac{f}{2}R$  ja  $C_P = \frac{f}{2}R + R = \frac{f + 2}{2}R$



# Vapausasteet kiinteässä aineessa

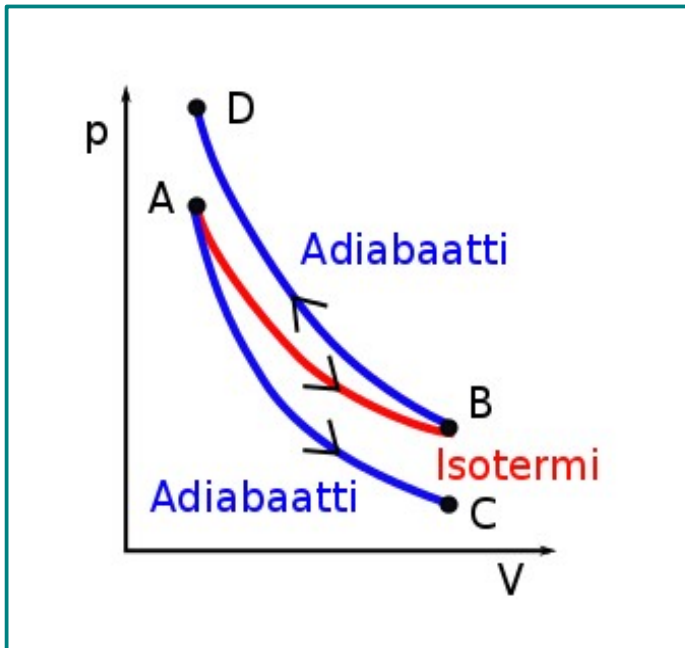
Yllättävää kyllä, äsken esitetty on melko totta myös kiinteille aineille. Dulongin ja Petitin lain mukaan kiinteiden aineiden ominaislämpökapasiteetti on noin  $3R$   
→ kidehilassa on kuusi vapausastetta (värähtelyt kolmeen suuntaan)



# Adiabaattinen prosessi PV-tasossa

Adiabaattinen prosessi PV-tasossa jäi aiemmin hieman auki.

Adiabaatti on siis PV-tasossa  
"jyrkempi" kuin isotermi



Vaan mikä on sen yhtälö PV-tasossa?

$$PV^\gamma = \text{vakio} \quad \text{eli} \quad P_A V_A^\gamma = P_C V_C^\gamma$$

$$\text{ja} \quad P_B V_B^\gamma = P_D V_D^\gamma$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \text{adiabaattivakio}$$

f	$C_V$	$C_P = C_V + R$	$\gamma = C_P/C_V$
3	$3/2 R$	$5/2 R$	$5/3 \approx 1,67$
5	$5/2 R$	$7/2 R$	$7/5 = 1,40$
7	$7/2 R$	$9/2 R$	$9/7 \approx 1,29$

**A”**

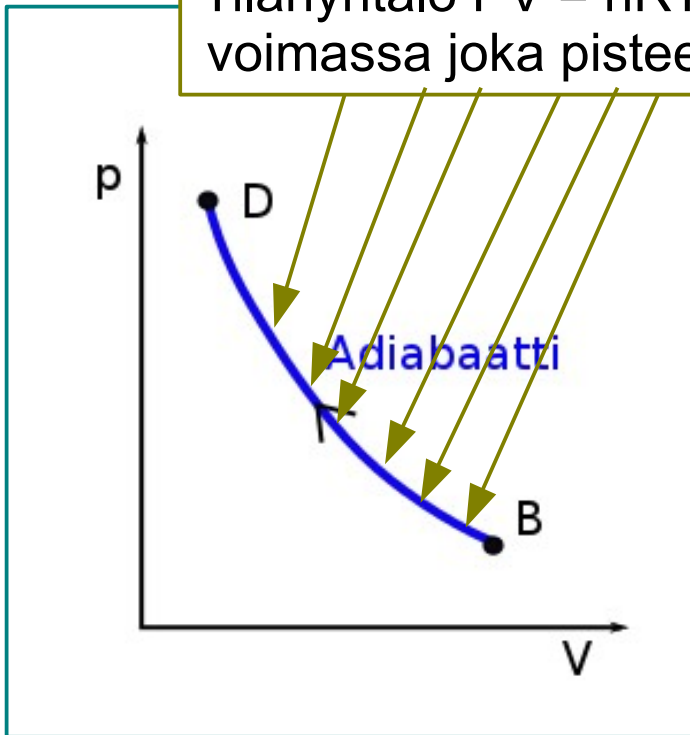
Yhtälö siis määrittelee adiabaattisen prosessin muttei kerro mitään *systemistä*. Erityisesti yhtälö **ei** ole tilanyhtälö.

# Ideaalikaasun adiabaattinen prosessi: esimerkki

Viisivapausasteista ideaalikaasua on 0,20 mol. Kaasua puristetaan kasaan adiabaattisesti. Kaasun lähtötilavuus  $V_B = 5,0 \text{ dm}^3$  ja lähtöpaine  $P_B = 100 \text{ kPa}$  sekä lopputilavuus  $V_D = 1,0 \text{ dm}^3$

Kuinka suuri on kaasun paine ja lämpötila pisteessä D?

Tilanyhtälö  $PV = nRT$  on voimassa joka pisteessä



i)  $f = 5 \rightarrow \gamma = 1,40$

ii) B  $\rightarrow$  D adiabaatti  $\rightarrow P_B V_B^\gamma = P_D V_D^\gamma$

$$P_D = P_B \left( \frac{V_B}{V_D} \right)^\gamma \approx 950 \text{ kPa}$$

iii) ideaalikaasun tilanyhtälö:  $P_D V_D = nRT_D$

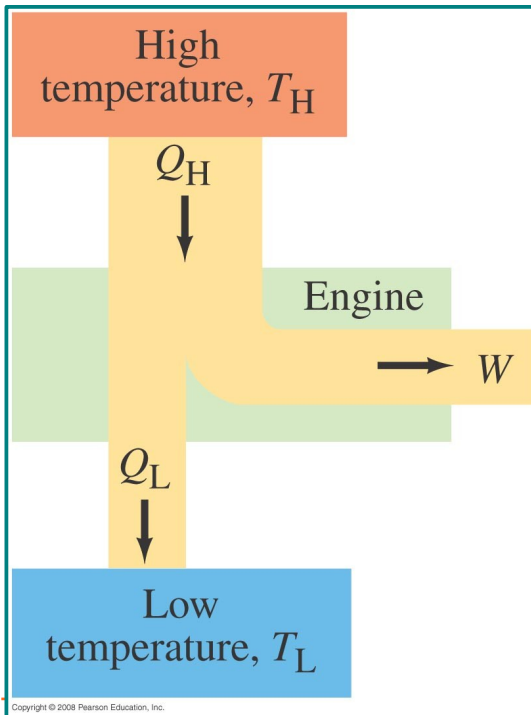
$$T_D = \frac{P_D V_D}{nR} \approx 570 \text{ K}$$

Vertailun vuoksi:  $T_B = \frac{P_B V_B}{nR} \approx 300 \text{ K}$



# Lämpövoimakoneet ja toinen pääsääntö

- Lämpövoimakone on kone, joka tekee työtä *lämpötilaeron avulla*.
- Korkeammasta lämpötilasta siirtyy *lämpöä* koneeseen, josta osa muuttuu työksi.
- Koneen kierto on syklinen eli se palaa alkutilaansa yhden kierroksen jälkeen.



$$\Delta T = T_H - T_L \leftarrow \text{Lämpötilaero}$$

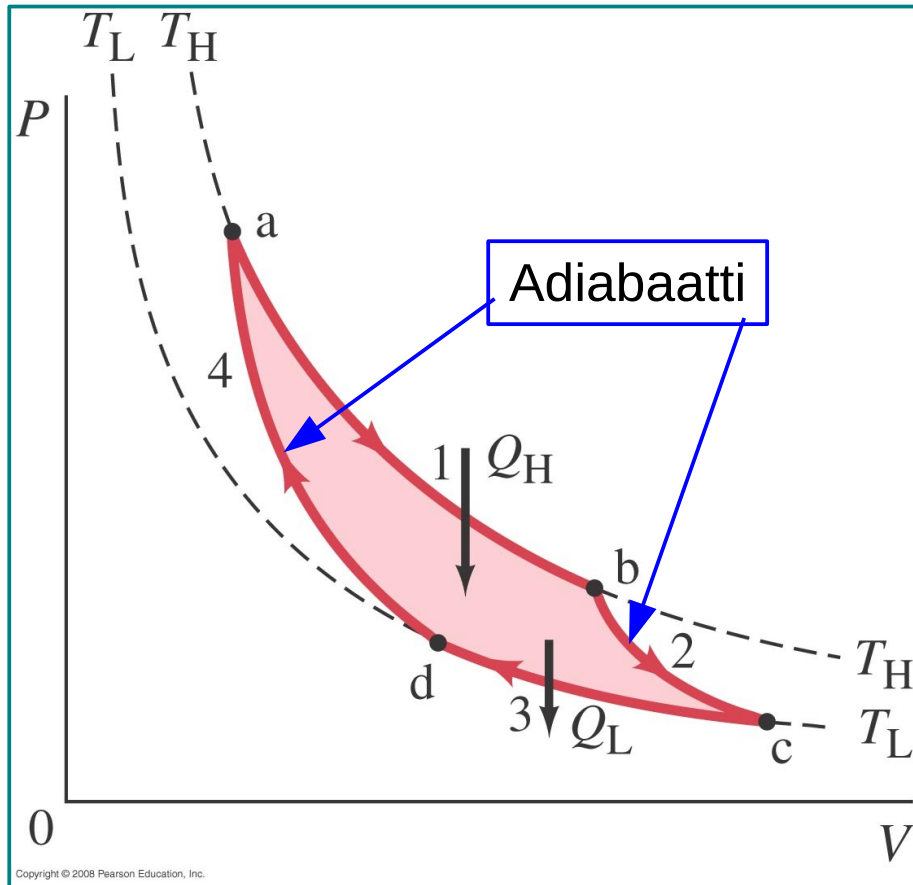
$$Q_H = W + Q_L \leftarrow \text{Osa lämmöstä työksi}$$

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \leftarrow \text{Hyötysuhde}$$

Termodynamiikan toinen pääsääntö,  
Kelvinin ja Planckin mukaan:  
*"Mikään laite ei voi muuttaa kaikkea ottamaansa  
lämpöä työksi."*

# Carnot'n sykli

- Tarkastellaan konetta, joka tekee työtä kahden vakiolämpötilan välillä
- Yksi tärkeä malli on ns. Carnot'n sykli (tai Carnot'n kone)



Isotermeillä:

$$Q_H = W_{ab} = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a}$$

$$Q_L = -W_{cd} = nRT_L \ln \frac{V_c}{V_d}$$

Adiabaateilla:

$$\begin{cases} T_H V_b^{\gamma-1} = T_L V_c^{\gamma-1} \\ T_L V_d^{\gamma-1} = T_H V_a^{\gamma-1} \end{cases} \rightarrow \frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

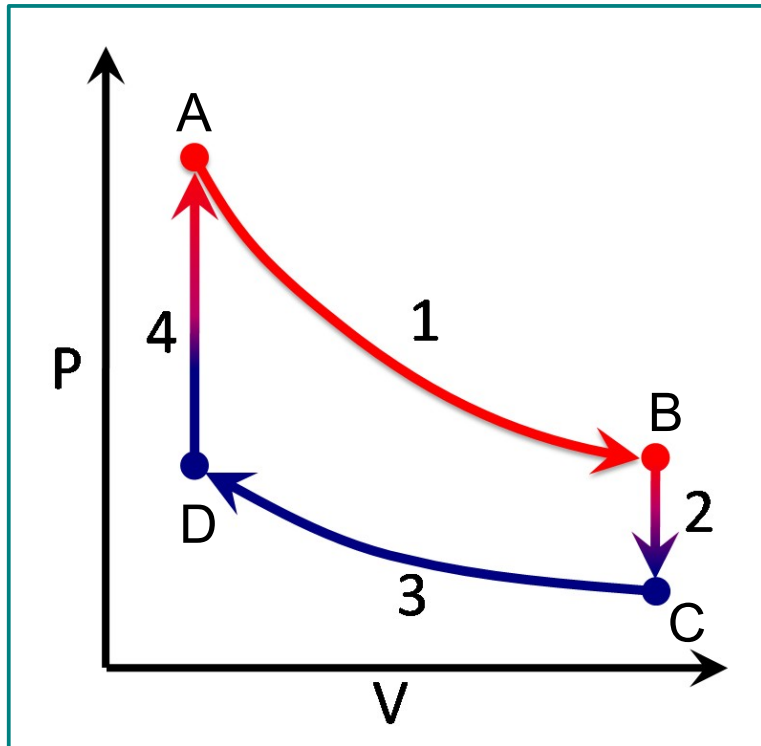
$$\rightarrow e = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

**Carnot'n teoreema:** Jokaisella lämpötilojen  $T_H$  ja  $T_L$  välillä toimivalla ideaalisella (reversiibelillä) lämpövoimakoneella on sama hyötysuhde. Ei-reversiibelillä koneella on pienempi hyötysuhde.

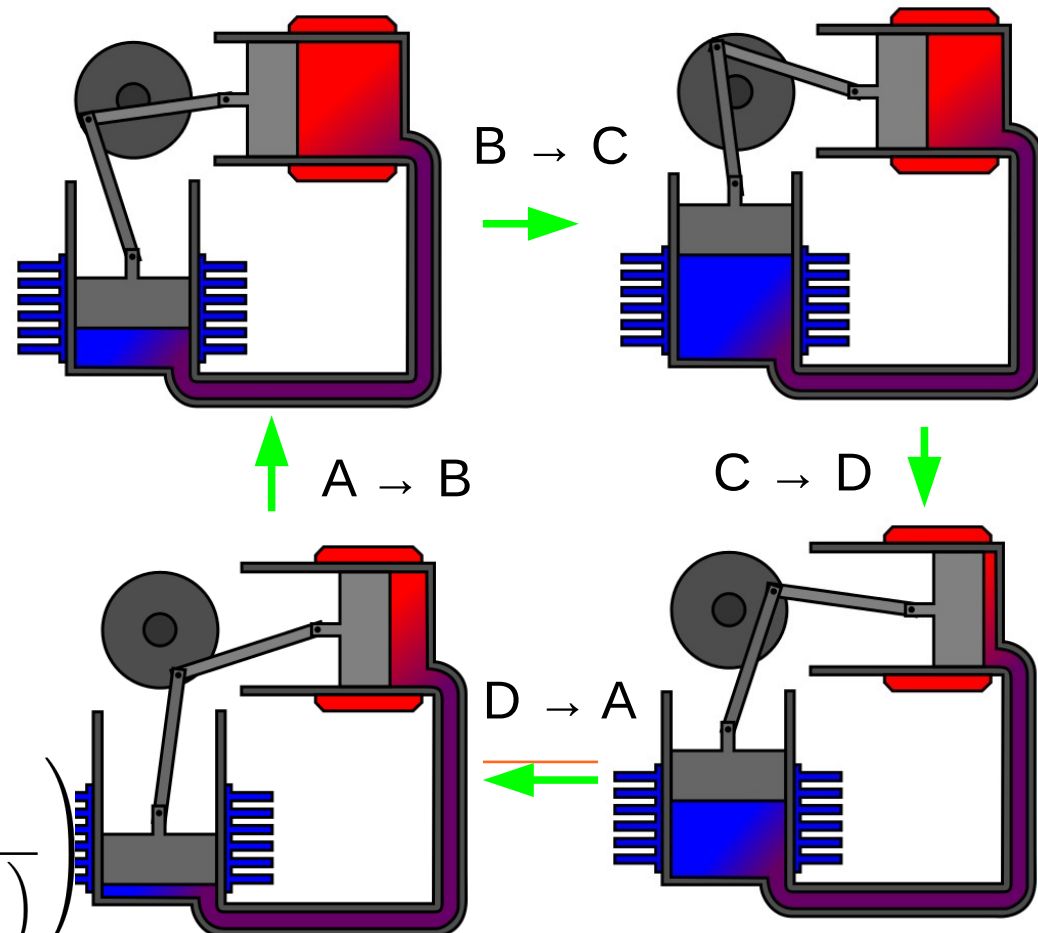
# Kahden lämpötilan välillä toimivat koneet

- Kahden lämpösäiliön välille voi rakentaa myös toisenlaisen koneen, joka vaihtaa lämpöä muidenkin osaprosessien kuin isotermien aikana

Yksi toteutus on *Stirlingin kone*



$$e = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \left( \frac{\ln \frac{V_B}{V_A}}{\ln \frac{V_B}{V_A} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)} \right)$$



# Lämpötilan määritelmä

Carnot'n syklin avulla voi myös määritellä lämpötilan seuraavasti:

- Rakennetaan lämpövoimakone, joka toimii kahden lämpötilan välillä
- Valitaan toinen lämpötila referenssiksi (esim.  $T_L = 273,16 \text{ K}$ )
- Käytetään konetta ja määritetään sen hyötysuhde sirrettyjen lämpöjen avulla
- Lasketaan  $T_H$ , jota voidaan siis pitää näin mitattuna

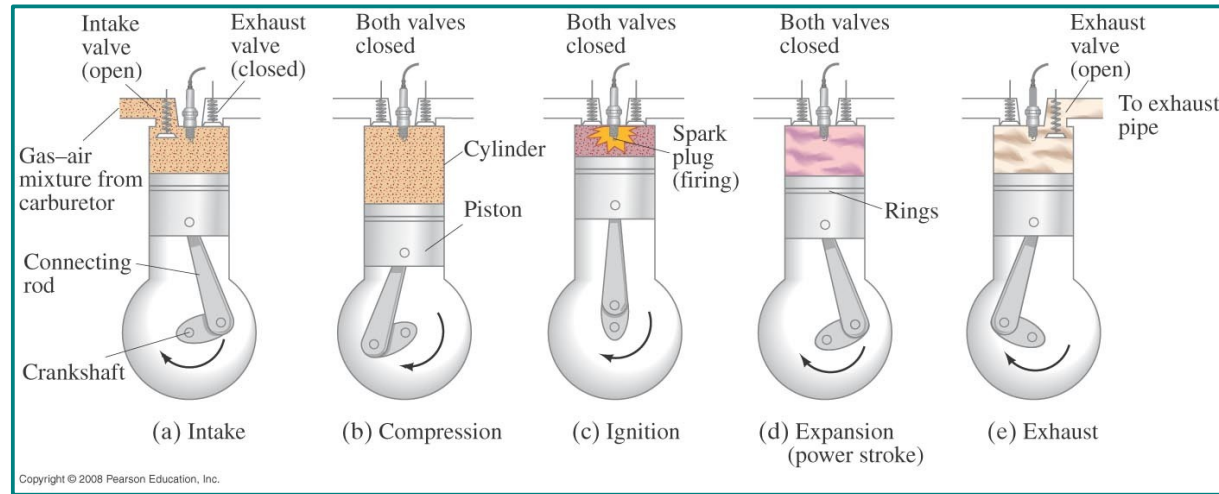
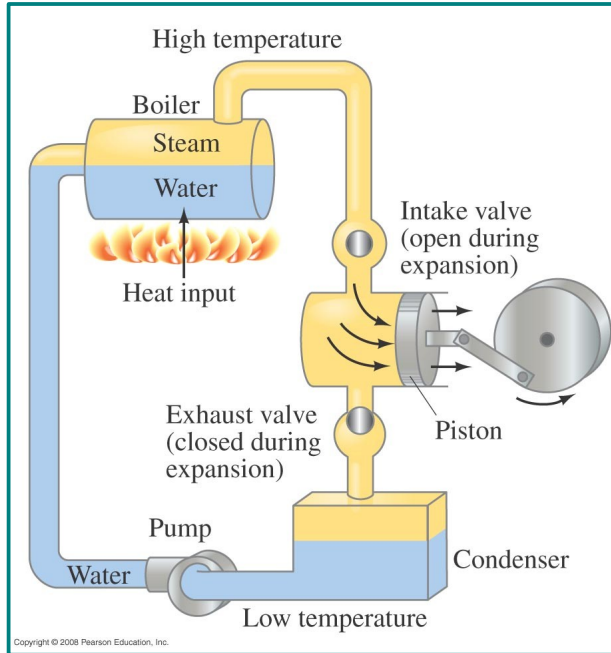
$$T_H = \frac{T_L}{1 - e}$$

Näin saadaan *termodynaaminen lämpötila-asteikko*

SI-järjestelmän mukaan:  
"Kelvin on 1/273,16 osa veden kolmoispisteen termodynaamisesta lämpötilasta"

# Käytännön lämpövoimakoneita

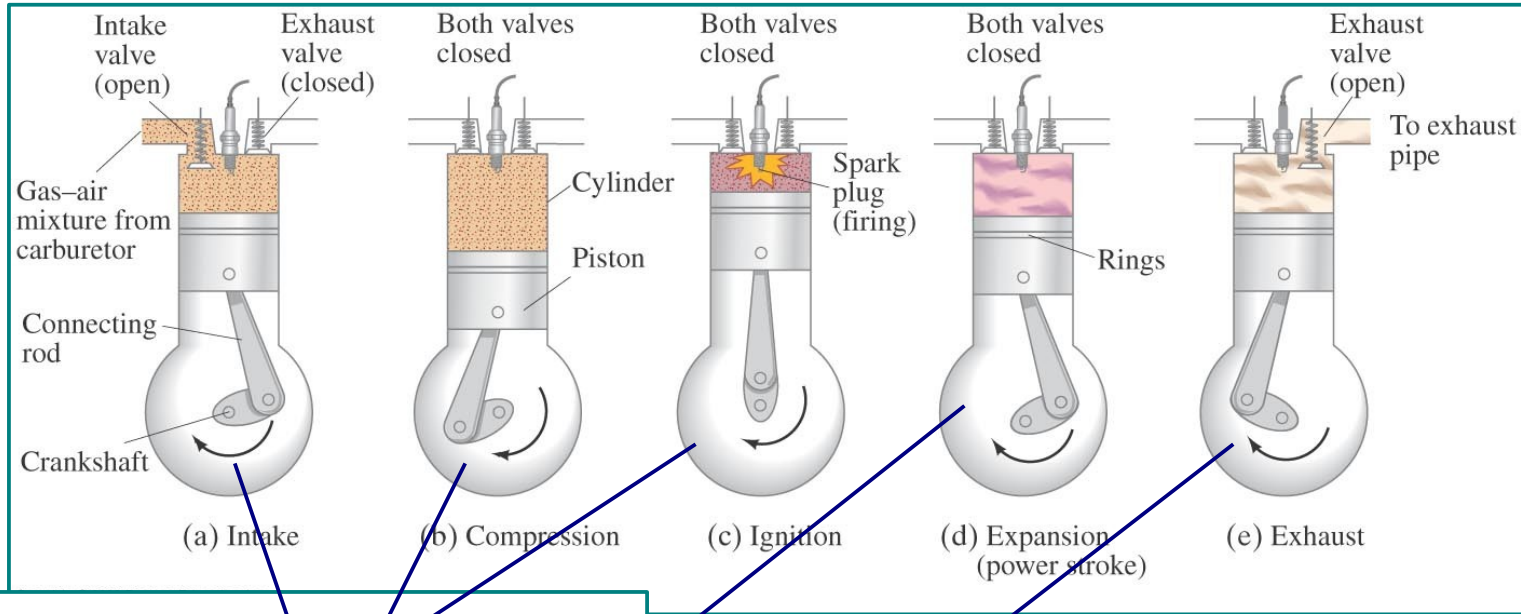
- Carnot'n konetta ei käytännössä kannata usein rakentaa, koska isotermi on hidas prosessi → tehoton kone



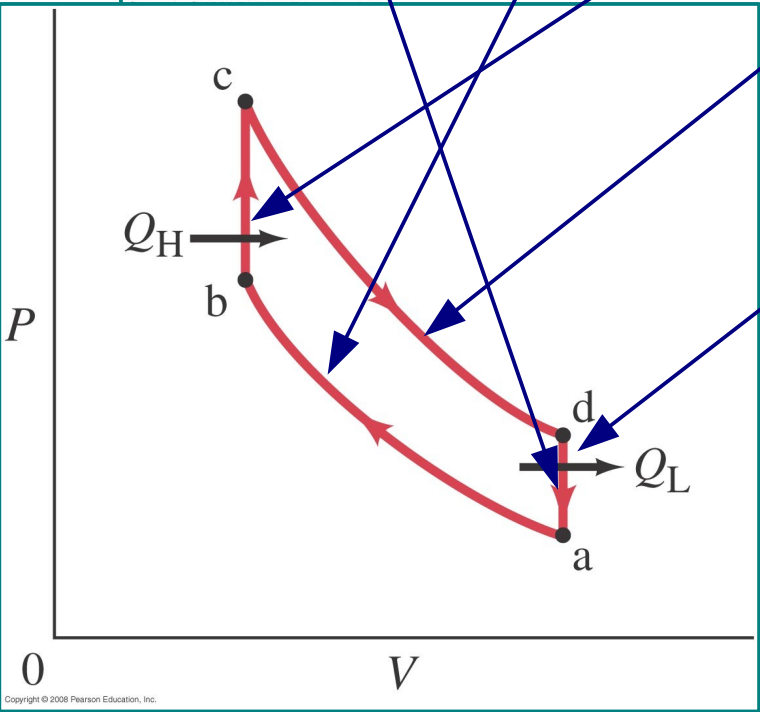
Ottomoottori  
(polttimoottori, internal combustion engine)

Höyrykone  
(external combustion engine)

# Nelitahtisen Otto-moottorin sykli



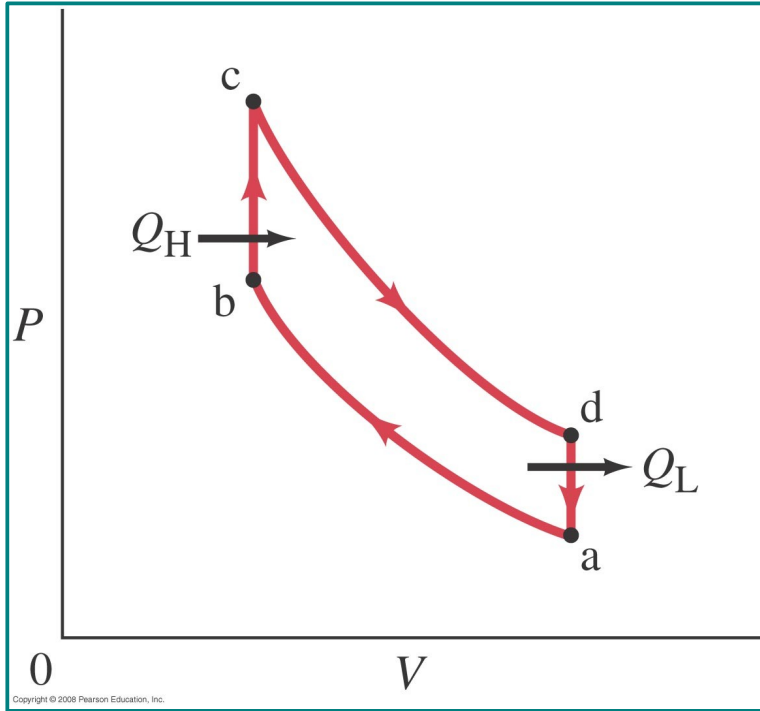
● Otto-moottorin syklissä on kaksi adiabaattia ja kaksi isokooria  
 → nopeita prosesseja → tehokas moottori



$$e = 1 - \left( \frac{V_a}{V_b} \right)^{1-\gamma} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Puristussuhde:  $r = \frac{V_a}{V_b}$   
 Tehollinen keskipaine:  $MEP = \frac{W}{\Delta V}$

# Otto-syklin analyysi



Isokoorit:

$$\begin{cases} Q_H = nC_V(T_c - T_b) \\ Q_L = nC_V(T_d - T_a) \end{cases}$$

$$e = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b}$$

Adiabaatit:

$$\begin{cases} T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1} \\ T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1} \end{cases}$$

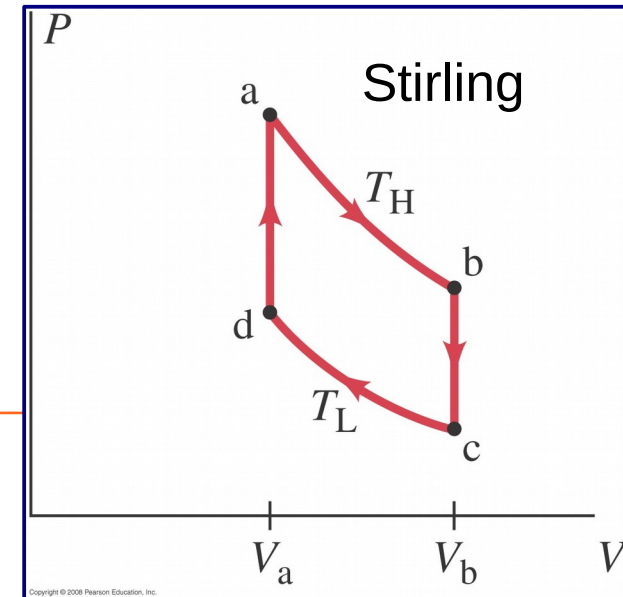
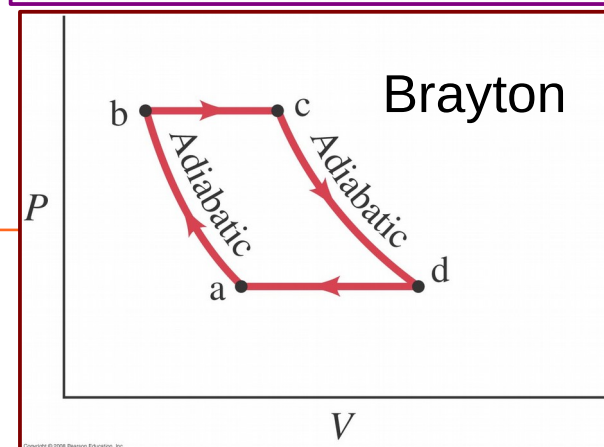
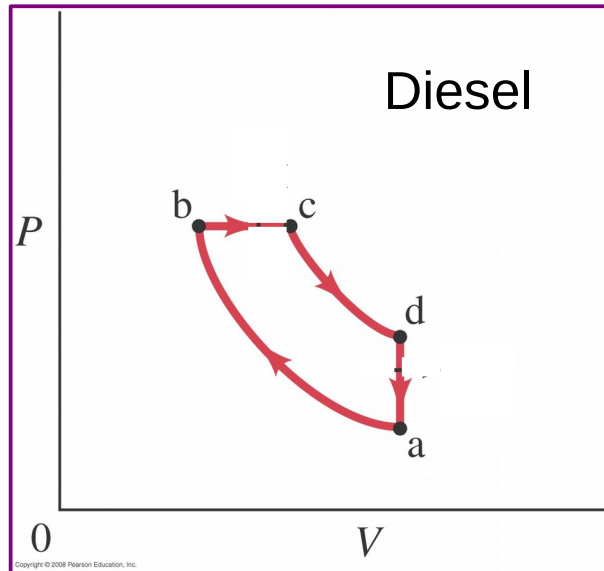
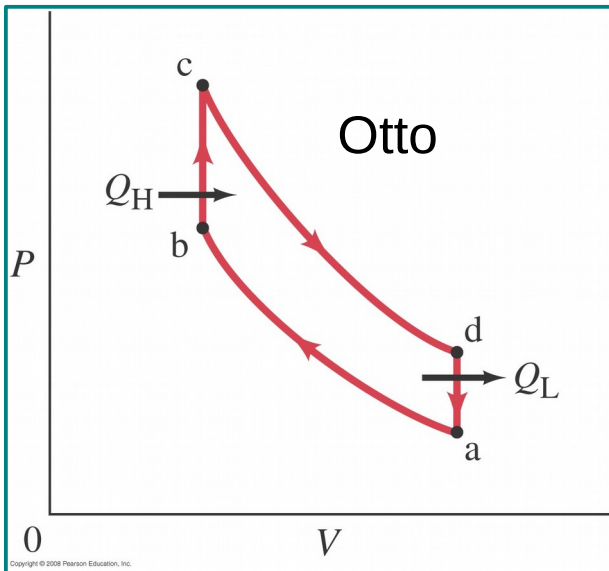
$$e = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b} = 1 - \frac{T_c(V_c/V_d)^{\gamma-1} - T_b(V_b/V_a)^{\gamma-1}}{T_c - T_b}$$

$$= 1 - \frac{(V_b/V_a)^{\gamma-1}(T_c - T_b)}{T_c - T_b} = 1 - \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^{1-\gamma}$$

# Lämpövoimakoneen syklejä

Lämpövoimakoneen voi toteuttaa siis monella tavoin. Syklin avulla voi analysoida koneen toteutusta ja tarkistaa esimerkiksi seuraavat asiat:

- Puristussuhde (Onko kone liian iso?)
- Tehollinen keskipaine (Kuinka suuri merkitys sisäisellä kitkalla on?)
- Korkein lämpötila ja paine (Kestävätkö materiaalit?)





# Volkswagen ja Diesel-sykli

Termodynaamisten mietteiden lisäksi lämpövoimakoneissa kemiallakin on merkitystä: polttoaineen polttaminen ei ole aina kovin puhdasta.

- Merkittäviä tekijöitä: seossuhde (polttoaine – ilma), lämpötila
- Diesel-syklin ongelma on korkea lämpötila isobaarisen laajenemisen jälkeen pisteessä c
- Toisaalta, mitä pitempi on laajeneminen  $b \rightarrow c$ , sitä enemmän työtä tehdään yhdessä syklissä



UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY  
WASHINGTON, D.C. 20460

SEP 18 2015

OFFICE OF  
ENFORCEMENT AND  
COMPLIANCE ASSURANCE

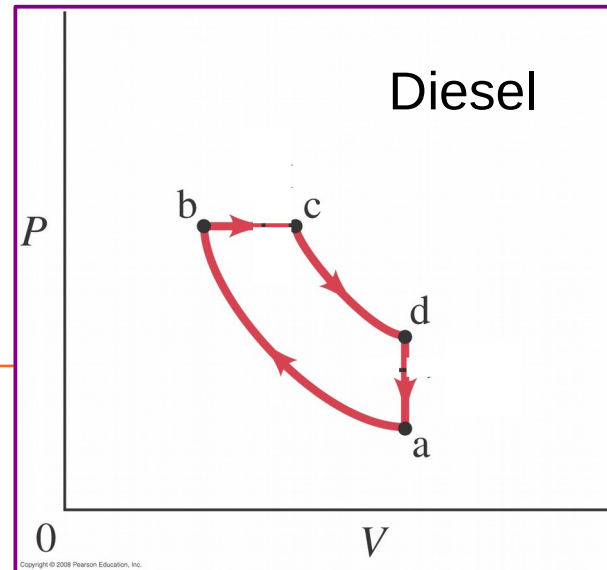
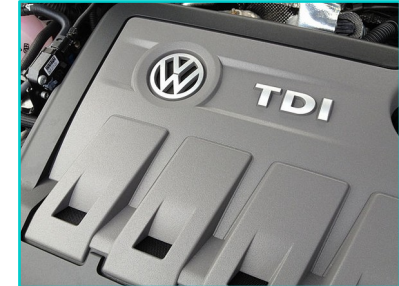
VIA CERTIFIED MAIL  
RETURN RECEIPT REQUESTED

Volkswagen AG  
Audi AG  
Volkswagen Group of America, Inc.  
Thru:

David Geanacopoulos  
Executive Vice President Public Affairs and General Counsel  
Volkswagen Group of America, Inc.  
2200 Ferdinand Porsche Drive  
Herndon, VA 20171

Stuart Johnson  
General Manager  
Engineering and Environmental Office  
Volkswagen Group of America, Inc.  
3800 Hamlin Road  
Auburn Hills, MI 48326

Re: Notice of Violation



# Entäs ahdin?

Monen polttomoottorin yhteydessä on nykyisin ahdin, turbo tai mekaaninen.  
Miksi?

Ahtaminen kasvattaa sylinteriin tulevan kaasun painetta.



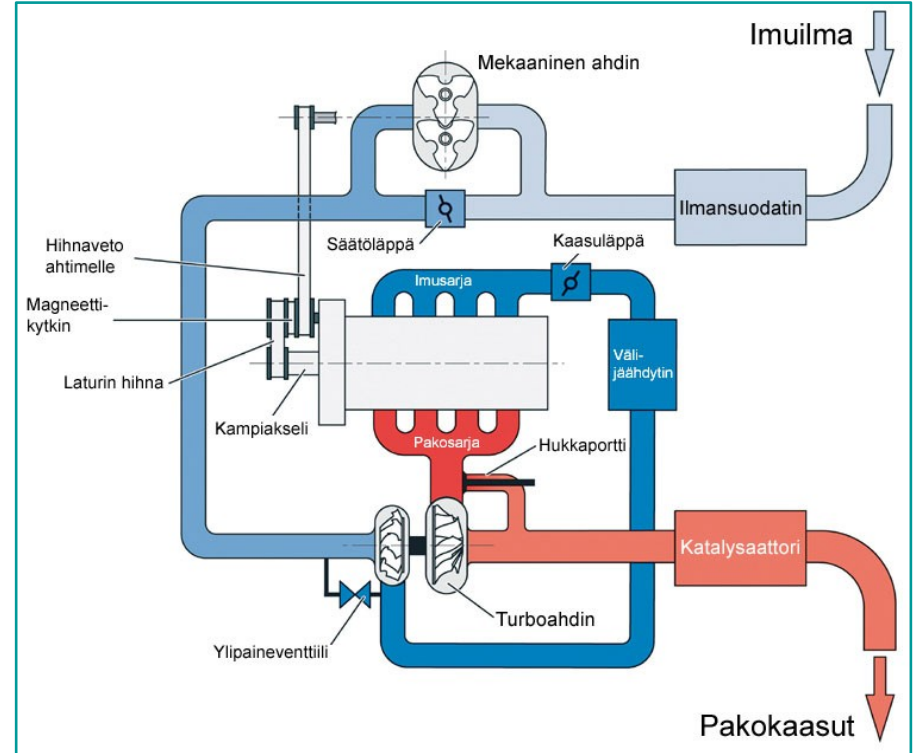
Syklin kaasun ainemäärä kasvaa.



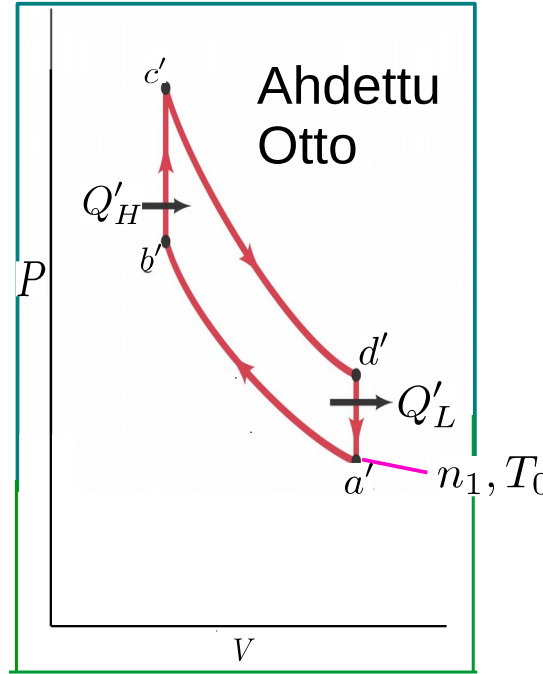
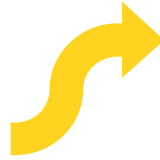
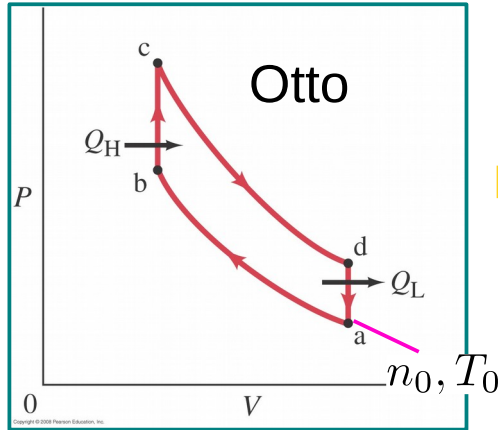
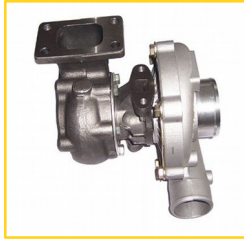
Yhdessä syklistä tehty työ ja siirtyvät lämmöt kasvavat.



Moottorin teho kasvaa  
Hyötysuhde ei muutu



# Entäs ahdin?



$$\left\{ \begin{aligned} Q'_H &= \frac{n_1}{n_0} Q_H \\ Q'_L &= \frac{n_1}{n_0} Q_L \\ W' &= Q'_H - Q'_L = \frac{n_1}{n_0} W \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_c - T_b &= \frac{Q_H}{n_0 C_V} \\ P_c - P_b &= \frac{1}{V_b} n_0 R (T_c - T_b) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{c'} - T_{b'} &= \frac{Q'_H}{n_1 C_V} = T_c - T_b \\ P_{c'} - P_{b'} &= \frac{1}{V_b} n_1 R (T_{c'} - T_{b'}) > P_c - P_b \end{aligned} \right.$$

# Todellisen moottorin tiedot

## Volvo XC90 D5 AWD Inscription



**Valmistaja:** Volvo Car Group, Göteborg, Ruotsi

**Maahantuojaja:** Volvo Car Finland, [www.volvocars.com/fi](http://www.volvocars.com/fi), 09-504 451

**Hinta:** 87 786 € (koeauton hinta lisävarustein 108 867 €)

**Ajoneuvoveron perusosa:** 137,24 €/v

**Käyttövoimavero:** 562,10 €/v

**Takuu:** 2 v, maali 2 v, kori 12 v

**Ajoturva:** tiepalvelu voimassa valtuutettua huoltoa käytettäessä

### MOOTTORI

**Sijoitus, toimintatapa ja muoto:**

eteen poikittain sijoitettu ehdettu dieselkäyttöinen nelisyylinterinen rivimoottori

**Sylinterimitat:** halkaisija 82,0 mm, iskunpituus 93,2 mm

**Iskutilavuus:** 1 969 cm<sup>3</sup>

**Puristussuhde:** 15,8

**Suurin teho:** 165 kW (225 hv) / 4 250 r/min

**Ominasteho:** 83,8 kW/l (113,9 hv/l)

**Keskimääräinen männännopeus:**

13,2 m/s (@ 4 250 r/min)

**Suurin vääntömomentti:**

470 Nm/1 750 r/min

**Sylinterin tehollinen keskipaine:** 3,0

MPa (@ 470 Nm)

**Sylinteriryhmä- ja kansi:** alumiini

**Kampiaksieli:** laakeroitu 5 runkolaa-

kerilla, 2 tasap-

mentimet hih-

Venttiilikoneis-

ki  
Et  
ak  
ilr  
tir  
Ta  
ta  
ta  
iln  
tin  
Oh  
ti  
pe  
mu  
Ja  
jar  
(32  
nin  
töi  
Ajo  
por  
ata  
Pyö  
V  
Istu  
säh  
kall  
korl  
närr  
kesl  
syys



## Fiat 500X 1,4 Multiair Popstar

**Valmistaja:** FCA Italy S.p.A., Melfi, Italia

**Maahantuojaja:** FCA Finland Oy, [www.fiat.fi](http://www.fiat.fi), puh. +800 342 800 00

**Hinta:** 23 988 €, koeauton hinta lisävarustein 26 886 € (pastelliväri 388 €, automaatti-ilmastointi 453 €, peruutustutka 375 €, Beats Audio -paketti 776 €; Visibility-paketti: sadetunnistin, automaattisesti tummentuva sisätaustapeili ja sähköllä taittavat ulkopeilit 453 €; Comfort-paketti: älyavain, etukyyvärnoja ja säädettävä tavaratilan pohja 453 €)

**Ajoneuvoveron perusosa:** 121,18 €/v

**Takuu:** 3 v/100 000 km, maalitakuu 3 v, koritakuu 8 v

**Ajoturva:** 3v

### MOOTTORI

**Sijoitus, toimintatapa ja muoto:**

eteen poikittain sijoitettu ehdettu bensiinikäyttöinen nelisyylinterinen rivimoottori

**Sylinterimitat:** halkaisija 72,0 mm, iskunpituus 84,0 mm

**Iskutilavuus:** 1 368 cm<sup>3</sup>

**Puristussuhde:** 10,0

**Suurin teho:** 103 kW (140 hv) / 5 000 r/min

**Ominasteho:** 75,3 kW/l (102,4 hv/l)

**Keskimääräinen männännopeus:**

14,0 m/s (@ 5 000 r/min)

**Suurin vääntömomentti:**

230 Nm/1 750 r/min

**Sylinterin tehollinen keskipaine:**

2,1 MPa (@ 230 Nm)

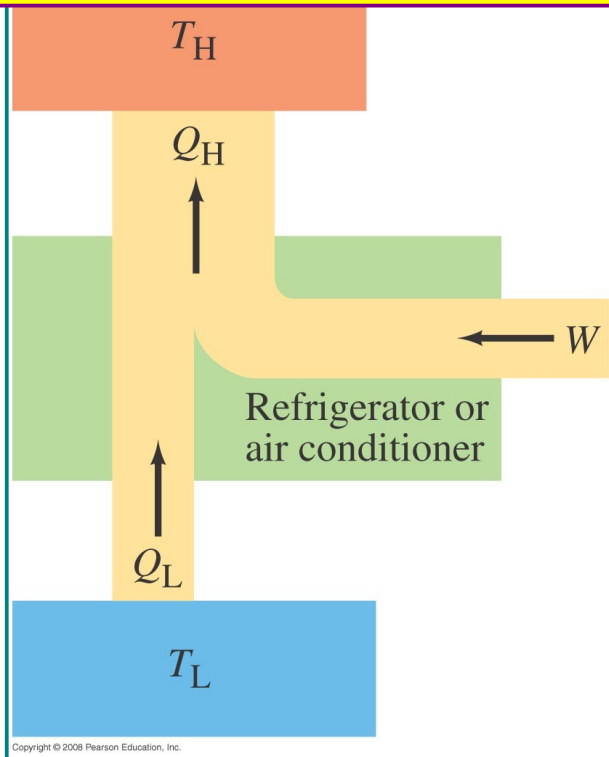
Sylinteriryhmä- ja kansi: alumiini

Ve  
lier  
Ko  
Il:  
V:  
K  
Ra  
Ko  
rel  
Et  
tue  
kie  
me  
Tal  
tue  
ret  
set  
kal  
Oh  
ti  
pe  
Ja  
ris  
pii  
jar  
(27  
nir  
tu  
py  
Aj  
av  
Py  
ni  
V  
Ist

Lähde: Tekniikan Maailma

# Muita lämpökoneita

Nämäkin vaativat työtä toimiakseen sillä termodynamiikan toinen pääsääntö on Clausiuksen mukaan: *"Mikään laite ei voi ainoastaan siirtää lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan."*

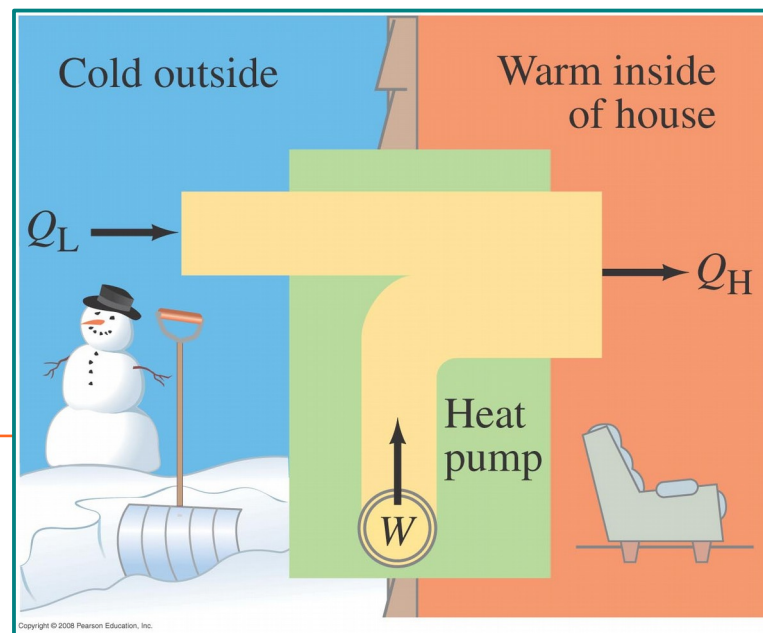


Jäähdytyksen tehokerroin:

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

Lämmityksen lämpökerroin:

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W}$$



Jäähdytín ja lämmitín ovat itse asiassa sama laite, mutta niiden hyötytuote on eri, jäähdytyksessä  $Q_L$  ja lämmityksessä  $Q_H$

# Lämpöpumppu PV-tasossa

Jäähdytyksen tehokerroin:

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

Lämmityksen lämpökerroin:

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W}$$

