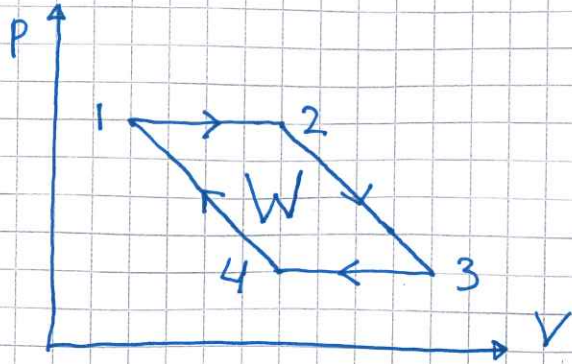


Kretsprosesser [OS2 3.4; YF 19.4; LHL 15.1]

(44)



Starttilstand = Slutt-tilstand

$$\Rightarrow \Delta U = 0$$

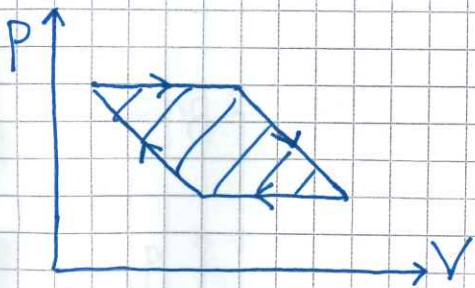
$$\stackrel{\text{1. lov}}{\Rightarrow} (\Delta)Q = (\Delta)W$$

for hver hele syklus

Netto arbeid utført av systemet pr syklus:

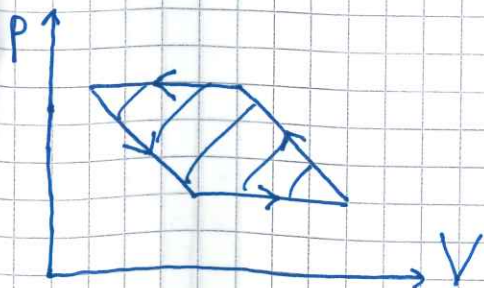
$$W = W_{123} + W_{341} = W_{123} - |W_{341}|$$

= areaet omskuttet av kurven $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$



Varmekraftmaskin; med klokke;
 $W > 0$ (systemet gjør positivt arbeid på omgivelsene); $Q > 0$ (systemet tilføres varme).

Eks: Dieselmotor, bensinmotor

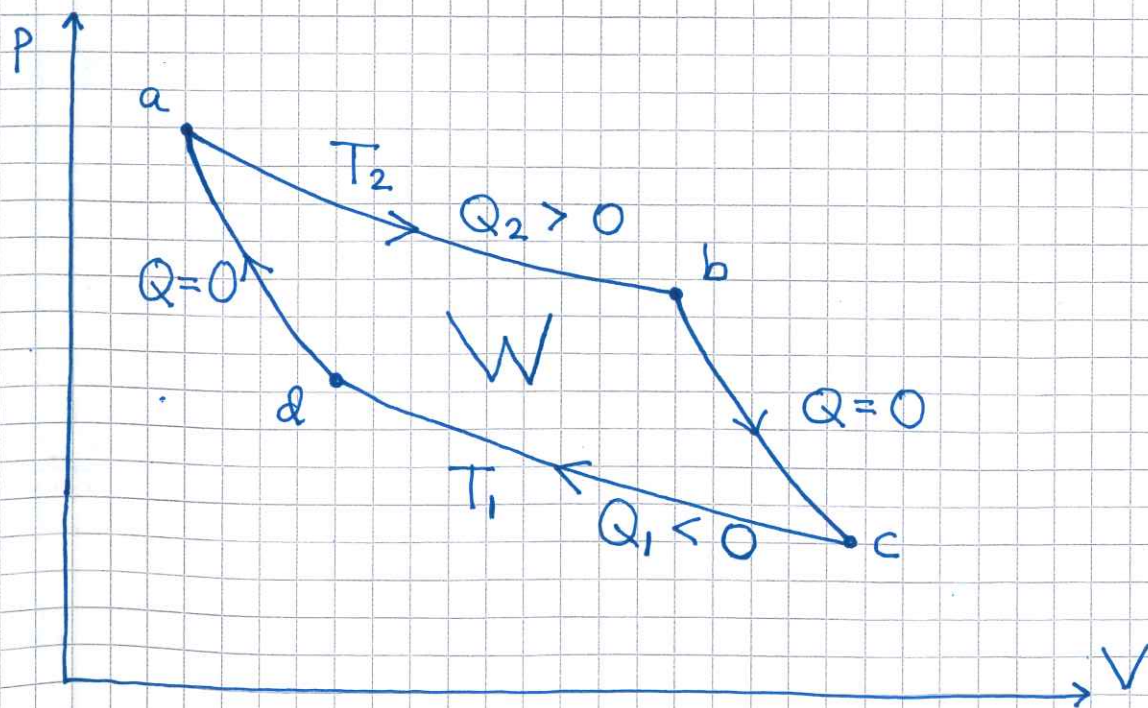


Kjølemaskin / Varmepumpe;
mot klokke; $W < 0$ (det gjøres netto arbeid på systemet);
 $Q < 0$ (systemet overfører netto varme fra område med lav T til område med høy T)

Carnotprosessen [OS2 4.5; YF 20.6; LHL 15.4]

45

- N.L. Sadi Carnot, 1824 : "Reflections on the motive power of fire" ; starten på termodynamikk som vitenskap.
- Carnotprosessen : Kretsprosess som består av 2 isotermer og 2 adiabater.
- Idealisert reversibel prosess der varme utveksles mellom system og omgivelser (varmereservoar) med infinitesimale temperaturforskjeller, $\Delta T \approx 0$.
- Vi antar her ideell gass som arbeidssubstans :
 $pV = nRT$; $U = U(T)$; $T \cdot V^{\gamma-1} = \text{konstant}$
langs adiabatene ($\gamma = C_p / C_v$)



Virkningsgrad:

$$\eta = \frac{\text{nytte}}{\text{kostnad}}$$

(46)

Varmekraftmaskin (kretsprosess med klokke; $W > 0$):

$$\left. \begin{array}{l} \text{nytte} = \text{netto utført arbeid} = W \\ \text{kostnad} = \text{tilført varme} = Q_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \eta = W/Q_2$$

$$\text{Pr syklus: } \Delta U = 0 \Rightarrow W = Q_2 + Q_1 \quad (1.\text{lov})$$

$$\Rightarrow \eta_c = \frac{Q_2 + Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{|Q_1|}{Q_2} < 1$$

$$U = U(T) \Rightarrow \Delta U_{ab} = \Delta U_{cd} = 0 \quad (\text{isotermer})$$

$$\Rightarrow Q_2 = W_{ab} = \int_{V_a}^{V_b} p(V) dV = nRT_2 \ln \frac{V_b}{V_a}$$

$$Q_1 = W_{cd} = \dots = nRT_1 \ln \frac{V_d}{V_c} = -nRT_1 \ln \frac{V_c}{V_d}$$

Langs adiabatene:

$$T_2 V_b^{\gamma-1} = T_1 V_c^{\gamma-1}$$

$$T_2 V_a^{\gamma-1} = T_1 V_d^{\gamma-1}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2 V_b^{\gamma-1}}{T_2 V_a^{\gamma-1}} = \frac{T_1 V_c^{\gamma-1}}{T_1 V_d^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

$$\Rightarrow Q_1 = -nRT_1 \ln \frac{V_b}{V_a} = -\frac{T_1}{T_2} Q_2$$

$$\Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2} \quad (\text{evt: } \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0)$$

Dermed:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Carnotprosessen
virkningsgrad

(47)

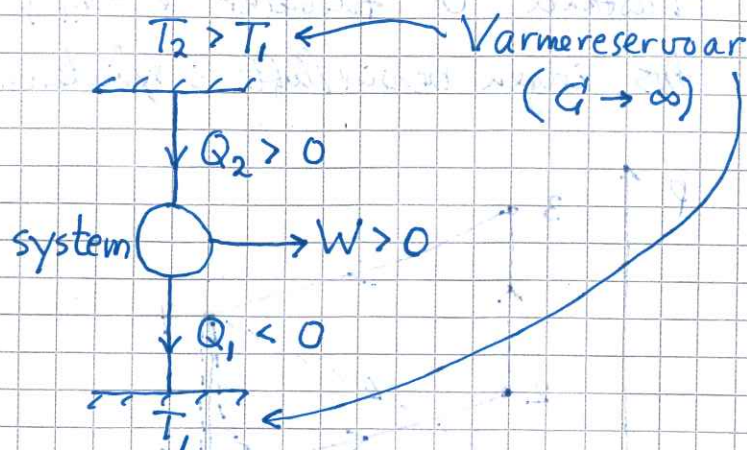
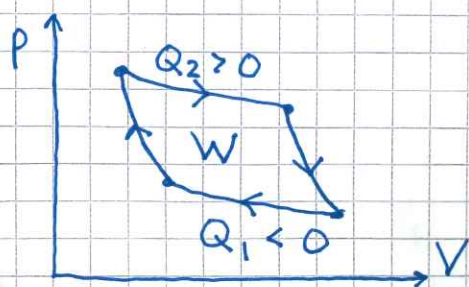
Dette er max. teoretisk virkningsgrad for reversible kretsprosesser. (Bevises senere.)

Alle reelle varmekraftmaskiner har $\eta < \eta_c$.

Varmekraft- og kjølemaskiner

[OS2 4.2+3; YF 20.2+3+4+6;
LHL 16.3+4]

Varmekraftmaskin:

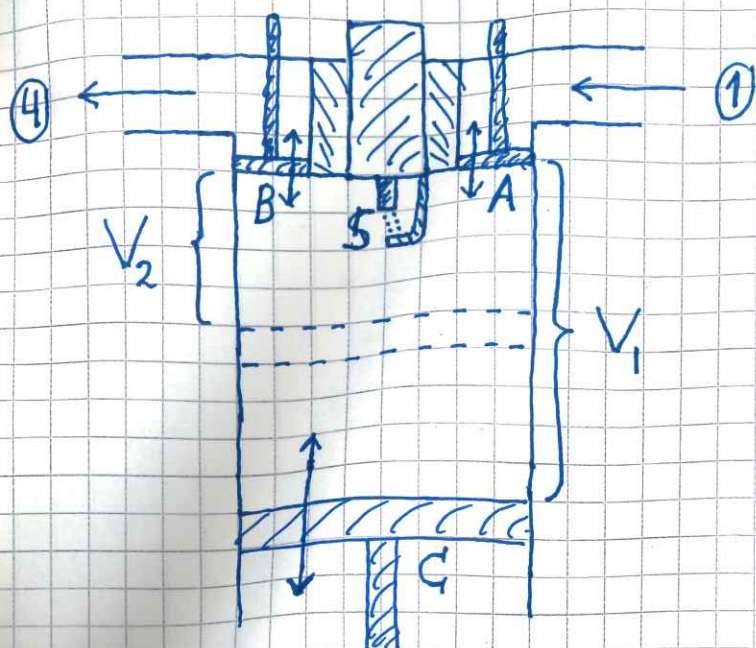


Kostnad: Varmer Q_2 tilført ved (høy) temp. T_2 , evt. ved diverse temperaturer (dersom det ikke er en Carnotmaskin)

Nytte: Netto utført arbeid W

Virkningsgrad: $\eta = W/Q_2 < \eta_c = 1 - T_1/T_2$

Noe varme Q_1 må avgis ved (lav) temp. T_1 , evt. ved diverse temp. (dersom ikke Carnotmaskin)



- 1: Luft/bensin-blanding inn i cylinderen ved høyt trykk og cylindervolum V_1 (ventil A åpen, B lukket)
- 1-2: Rask (adiabatisk) kompresjon (stempel C opp) til volum V_2 (med A og B lukket)
- 2-3: Antennning med gnist (S) fra tennpluggen ved volum V_2 ; stor økning i p og T (A og B lukket)
- 3-4: Adiabatisk utvidelse fra V_2 til V_1 ; stempel C skyves ned, og med kobling til veirakselen drives hjulene på bilen rundt (A og B lukket)
- 4-1: Eksos ut (B åpen, A lukket) ved volum V_1 ; stor reduksjon i p og T

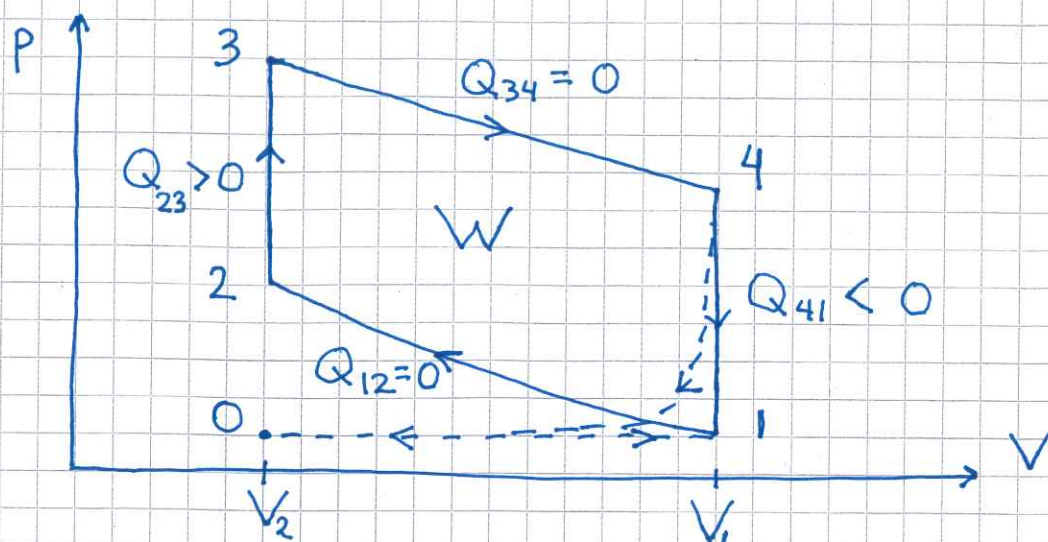
Egentlig, for 4-taktsmotor:

4-0: Eksos ut, $V_1 \rightarrow V_2$, B åpen, A lukket

0-1: Luft/bensin inn, $V_2 \rightarrow V_1$, A åpen, B lukket

Med 2-taktsmotor: Eksos ut og luft/bensin inn samtidig.

Idealisert Otto-syklus i pV -diagram :



Kjemisk energi i bensinen $\rightarrow$ varme $Q_{23} > 0$

Varm eksos ut, kald luft/bensin inn : $Q_{41} < 0$

Netto arbeid pr syklus:

$$W = W_{34} + W_{12} = W_{34} - |W_{12}|$$

$$\Delta U = 0 \text{ samt 1. lov : } W = Q_{23} + Q_{41} = Q_{23} - |Q_{41}|$$

$$\text{Her er : } Q_{23} = C_V (T_3 - T_2) , \quad Q_{41} = C_V (T_1 - T_4)$$

Virkningsgraden blir da :

$$\eta_0 = W / Q_{23} = 1 + \frac{Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$= 1 - \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{1 - T_1/T_4}{1 - T_2/T_3}$$

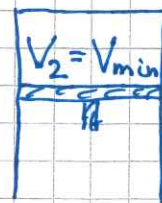
Både $1 \rightarrow 2$ og $3 \rightarrow 4$ er adiabater :

$$\left. \begin{array}{l} T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \\ \text{og } T_4 V_1^{\gamma-1} = T_3 V_2^{\gamma-1} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \left\{ \Rightarrow \eta_0 = 1 - \frac{T_4}{T_3} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{og } \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \end{array} \right\} \Rightarrow \eta_0 = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

Motorens kompresjonsforhold: $\mathcal{H} = \frac{V_1}{V_2} > 1$

dus
$$\eta_o = 1 - \mathcal{H}^{1-\gamma}$$



Her er $T_3 = T_{\max}$, men $T_4 > T_1 = T_{\min}$

$\Rightarrow \eta_o < 1 - T_{\min}/T_{\max} = \eta_c$ dersom all varme mottas ved $T_{\max}$ og all varme avgis ved $T_{\min}$; da ville det ha vært en Carnotmaskin!

I Ottosyklusen mottas varme ved alle temp. mellom T_2 og T_3 , og varme avgis ved alle temp. mellom T_4 og T_1 .

Hvis dette skal gjøres reversibelt, dvs hele tiden med null temp.forskjell mellom system og varmereservoar, må vi ha uendelig mange varmereservoar, ett for hver T mellom T_2 og T_3 , og ett for hver T mellom T_4 og T_1 .

Ikke gjennomførbart, selvsagt. I praksis blir en slik prosess irreversibel

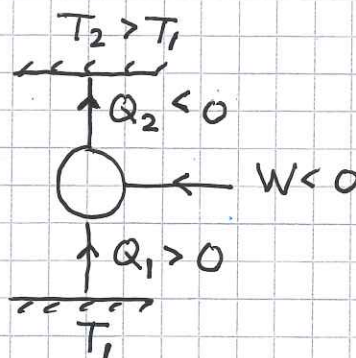
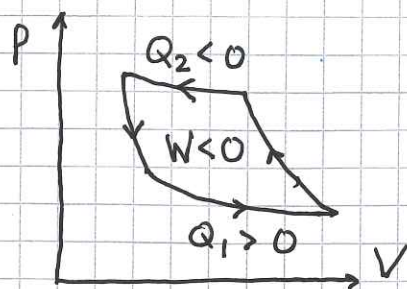
[Dieselmotor og idealisert diesel-syklus:

Se s. 153 fra høst 2018; ikke pensum i 2019.

Luft komprimeres til et mindre sylindervolum V_2 , og dermed en høyere temp. T_2 , enn i en bensinmotor.

Diesel sprøytes inn i sylinderen og antennes, uten behov for gnist fra en tennplugg. Det høye kompresjonsforholdet V_1/V_2 gir i praksis virkn.grad η_D større enn η_o for en bensinmotor.]

Kjøleskap / varmepumpe:



Kostnad: $|W|$

Nytte: Q_1 ut av kjøleskapet, eller $|Q_2|$ inn i stua

System: Sirkulerende kjølemedium som vekselvis fordampes og kondenserer i kretsprosessen.

Effektfaktor / virkningsgrad / COP (coefficient of performance):

Kjøleskap: $\varepsilon_K = |Q_1 / W|$

Varmepumpe: $\varepsilon_V = |Q_2 / W|$

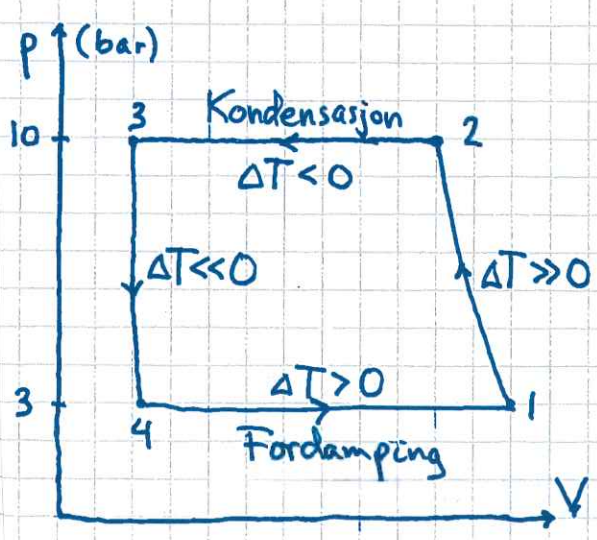
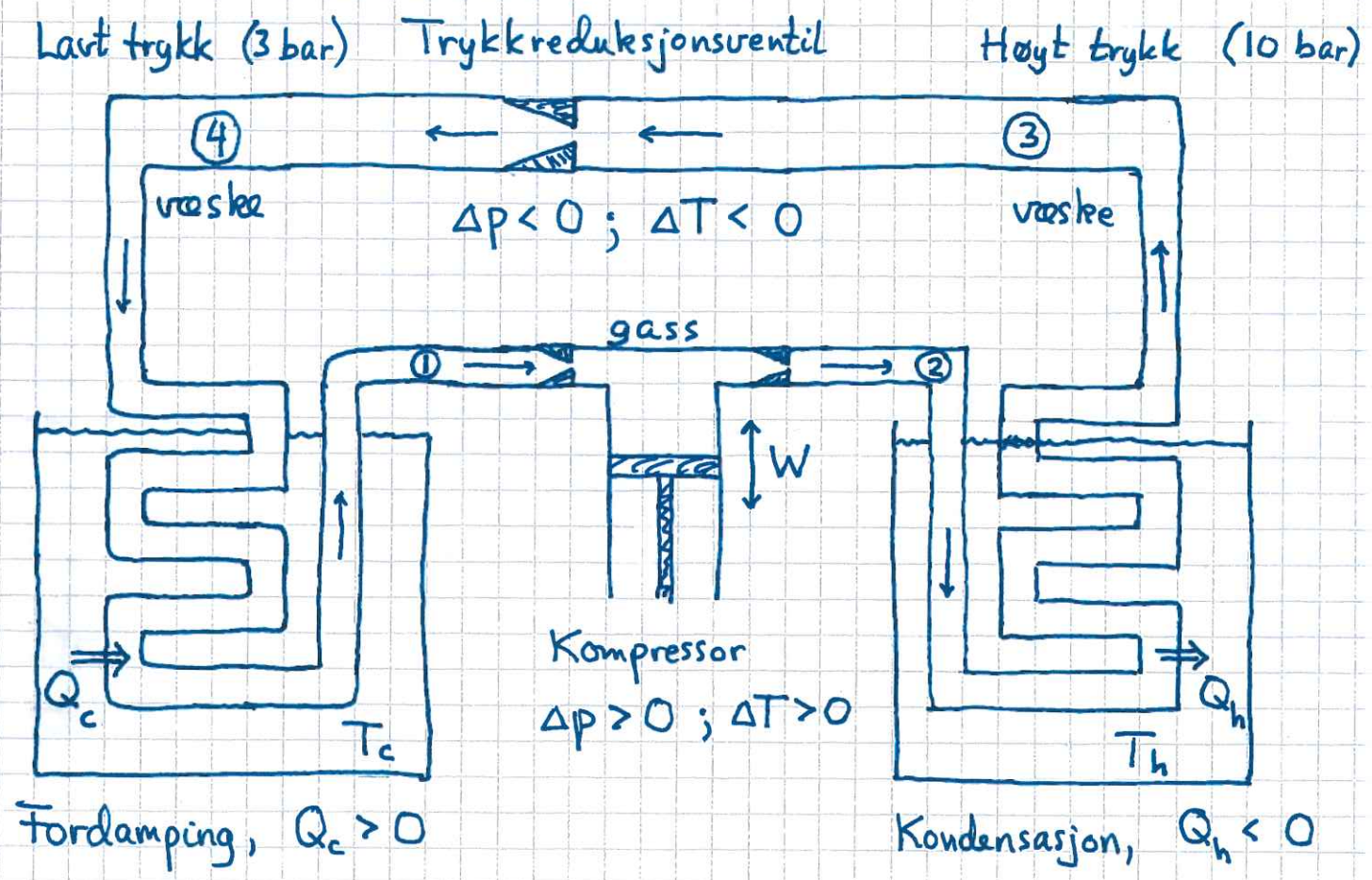
Teoretiske maxverdier med rev. Carnotprosess:

$$\varepsilon_K^c = \left| \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \right| = \frac{T_1}{T_2 - T_1} > 0$$

$$\varepsilon_V^c = \left| \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right| = \frac{T_2}{T_2 - T_1} > 1$$

Eks 3: Kjøleskap / varmepumpe

Systemet er et sirkulerende kjølemedium som vekselvis fordampner og kondenserer i kretsprosessen. Latent varme tilføres systemet inne i kjøleskapet, $L_f > 0$, eller avgis fra systemet til stuelufta, $-L_f < 0$.



Kjølemedier:		GWP
R12	$\text{C Cl}_2 \text{ F}_2$	10900
R134a	$\text{C}_2 \text{ H}_2 \text{ F}_4$	1430
R600a	$\text{C}_4 \text{ H}_{10}$	3
R744	CO_2	1

GWP: Global Warming Potential