Thermodynamics 1

Lecture 9:

Bendiks Jan Boersma
Wiebren de Jong
Thijs Vlugt
Theo Woudstra

March 8, 2010

Energy Technology

Delft University of Technology

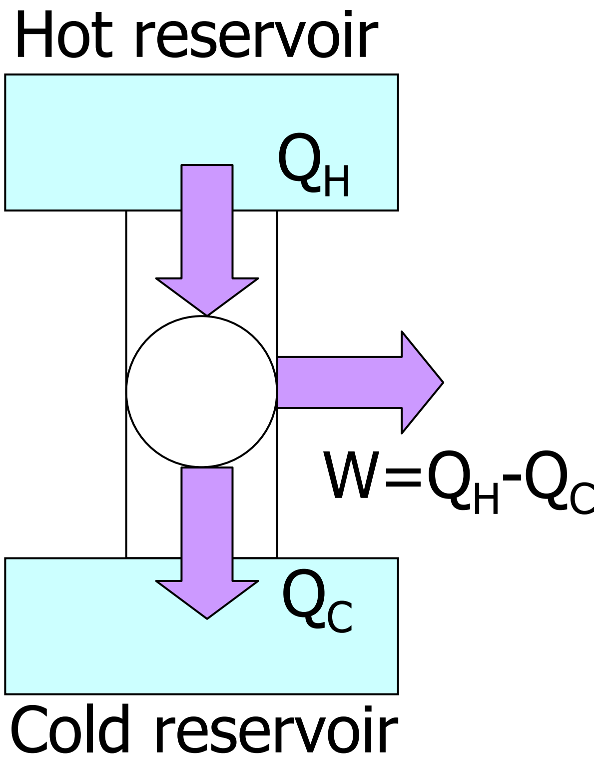
College 8

- Bernoulli's law
- 2nd law of thermodynamics:
  - →Clausius
  - →Kelvin Planck

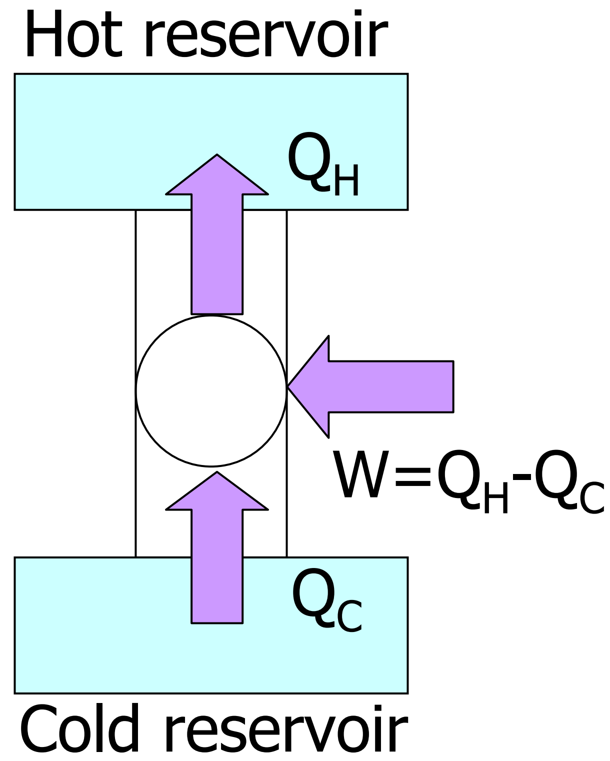
- Carnot cycle

Recapitulation

Clausius: W=0 impossible!

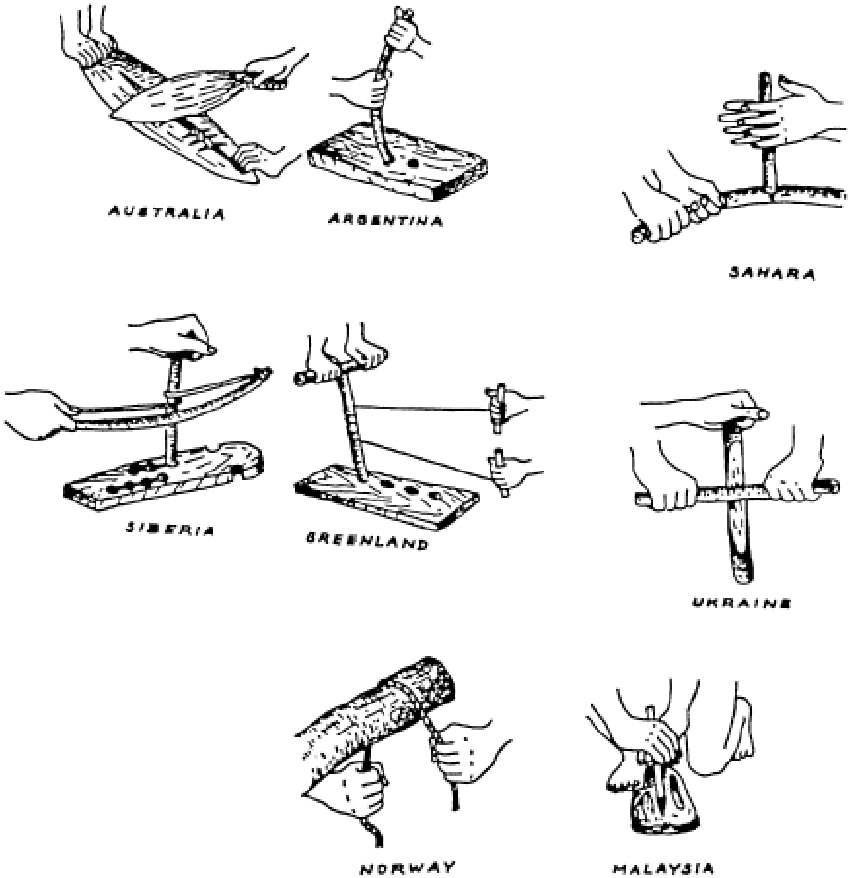


Watch out: definition of positive direction

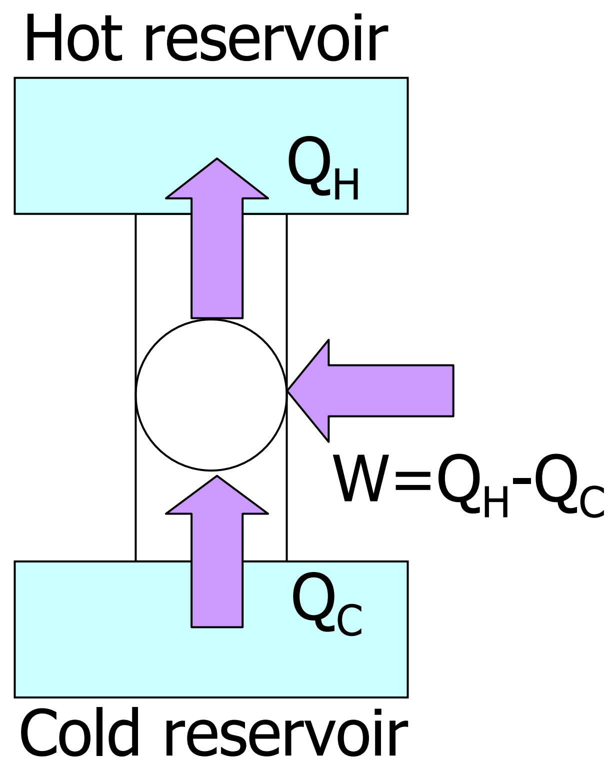


Kelvin-Planck: Q_C=0 impossible!

Recapitulation



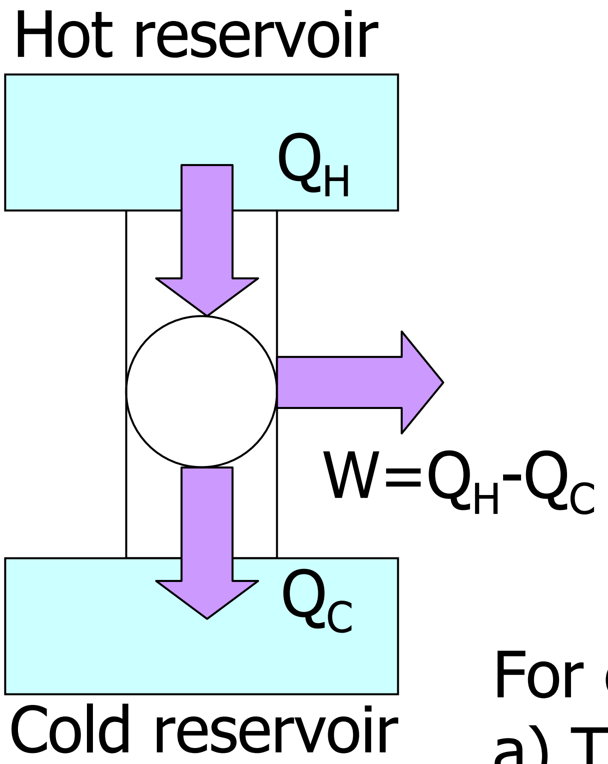
Clausius: W=0 impossible!



$Q_C=0$ possible: Q_H = W (friction)

TUDelft

Power-cycles (reversible)



Thermal efficiency:

$$\eta = \frac{W_{cycle}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

Kelvin-Planck: $Q_C > 0 \quad \rightarrow \quad \eta < 1.0$

For every heat-engine irrespective

a) Type of the medium (gas, liquid)

b) Number of processes, as part of the cycle.

c) Kind of process; idealized or real process

Power-cycles

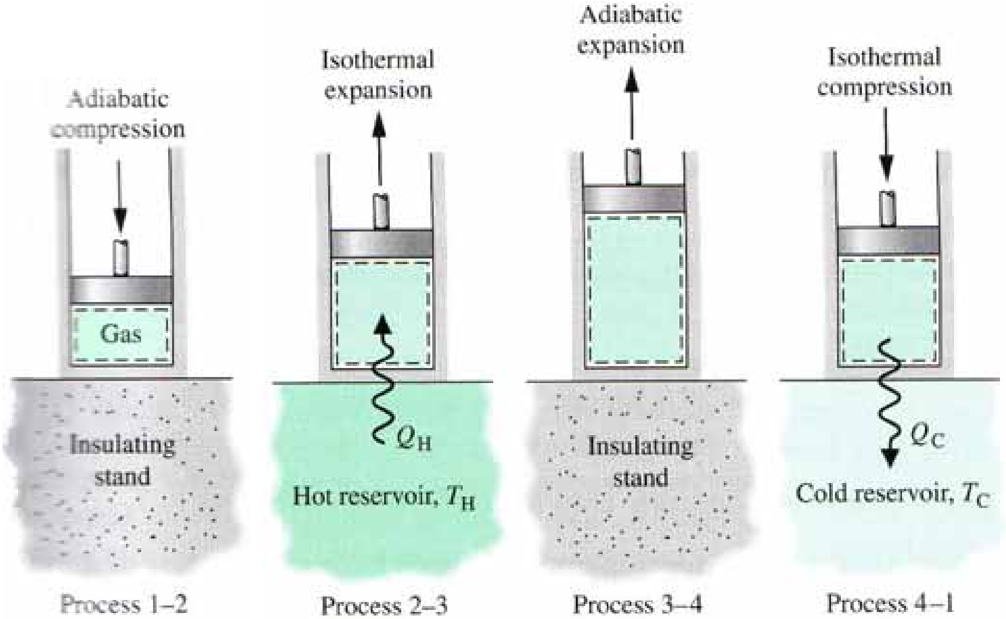
The thermal efficiency of an irreversible power cycle is always smaller than the thermal efficiency of a reversible power cycle if both operate between the same heat-reservoirs

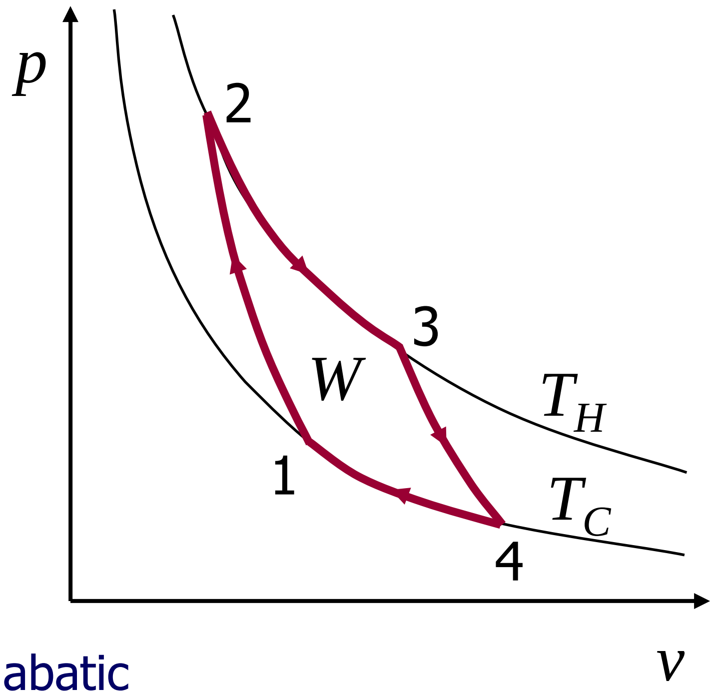
$$\boxed{\eta_{irr} < \eta_{rev} \ \text{(and } \eta_{rev} < 1\text{)}}$$

All reversible power-cycles that operate between the same two heat-reservoirs have the same thermal efficiency

$$\boxed{\eta_{rev,1} = \eta_{rev,2}}$$

The Carnot power cycle process

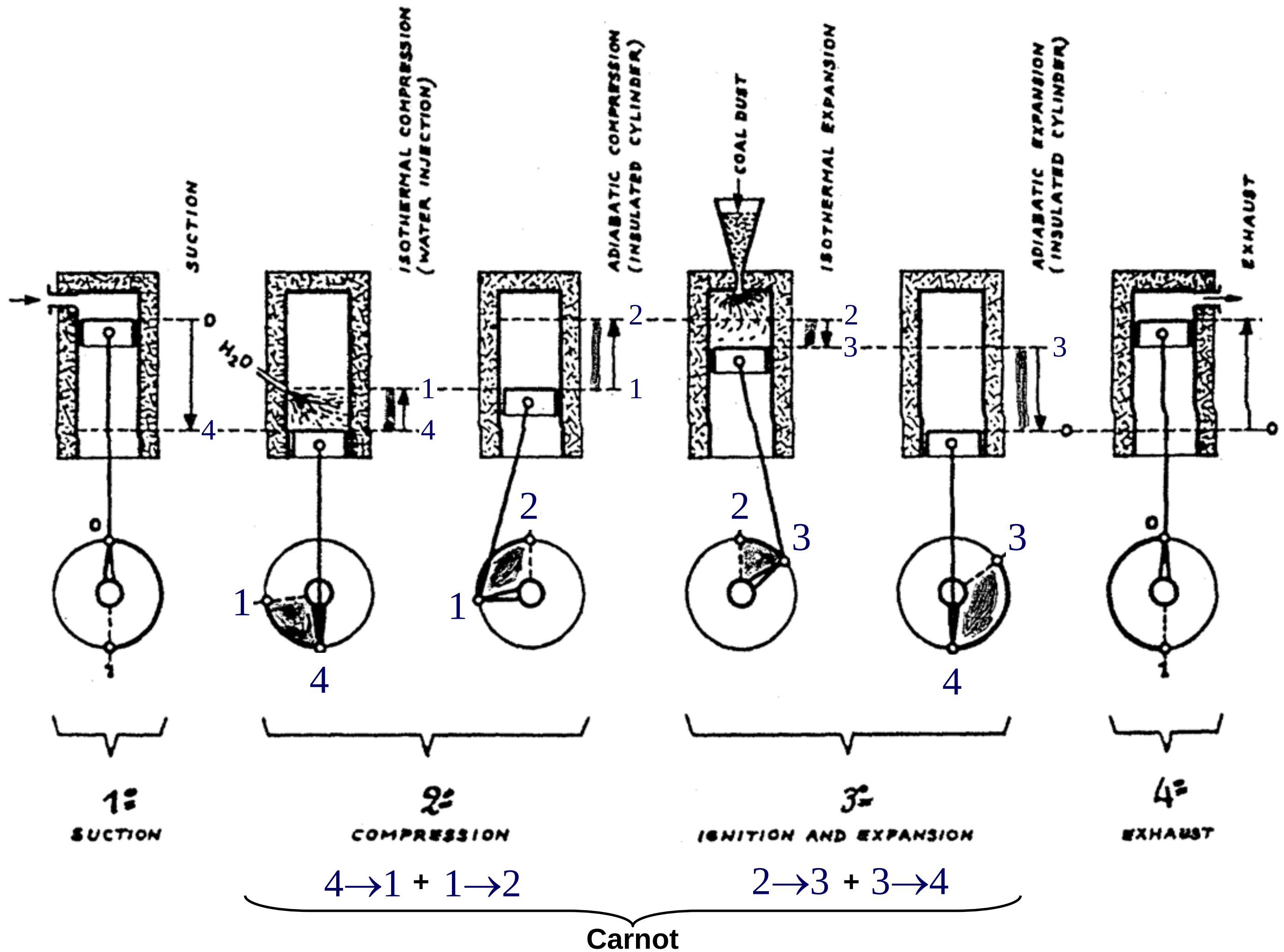




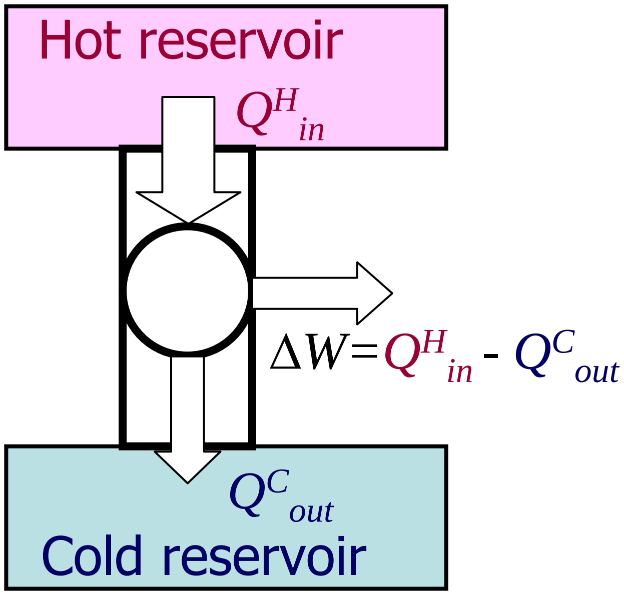
A reversible cycle comprising 2 isothermal and 2 adiabatic process steps

- 1-2 adiabatic compression, T increases from T_C to T_H
- 2-3 expansion of the gas at const. $T=T_H$ (isothermal)
- 3-4 adiabatic expansion, T decreases from T_H to T_C
- 4-1 compression of gas at const. $T=T_C$ (isothermal)

Schematic of a Carnot-like combustion



Maximum Efficiency of Power-cycles

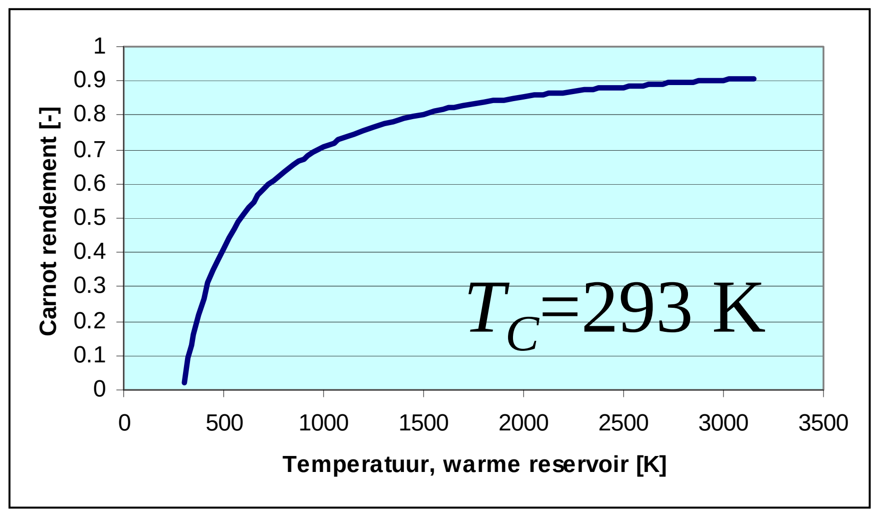


$$\left(\frac{Q^C_{out}}{Q^H_{in}}\right)_{Carnot} = \frac{T_C}{T_H}$$

Thermal efficiency

$$\eta = \frac{W^{cyc}}{Q^H_{in}} = 1 - \frac{Q^C_{out}}{Q^H_{in}}$$

$$\eta^{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$



Analyzing the efficiency of a Carnot cycle

- from the first law, we know that $$\eta^{rev} = 1 - \frac{Q^C_{out}}{Q^H_{in}}$$
- from the second law, we know that the value of η^{rev} (for reversible Carnot-like cycles) does not depend on working fluid, rather η^{rev} is a function of the reservoir temperatures $f(T_H,T_C)$ only
- thus, the ratio $Q^C{}_{out}/Q^H{}_{in}$ is also only a function $f(T_H,T_C)$, as $$\frac{Q^C_{out}}{Q^H_{in}} = f(T_C, T_H)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{Q^C_{out}}{Q^H_{in}} = \frac{f(T_C, T')}{f(T_H, T')} = \frac{f(T_C)}{f(T_H)} = \frac{T_C}{T_H}$$

this is then assumed /chosen

because T' is unspecified, while l.h.s. is universal

choosing an arbitrary reference temperature T' with $Q_C/Q'=f(T_C,T')$ and $Q_H/Q'=f(T_H,T')$

- this is a confirmation of the **Kelvin-temperature scale** (which was proposed from the ideal gas behavior earlier)

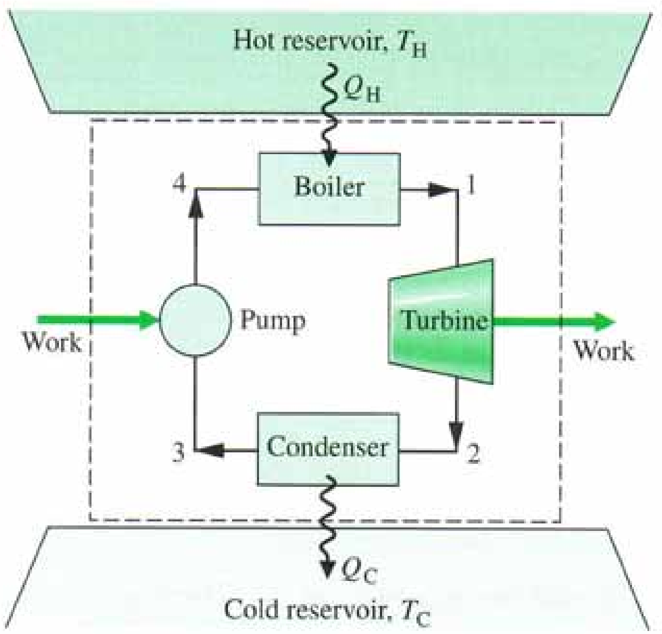
Carnot cycle for ideal (perfect) gas

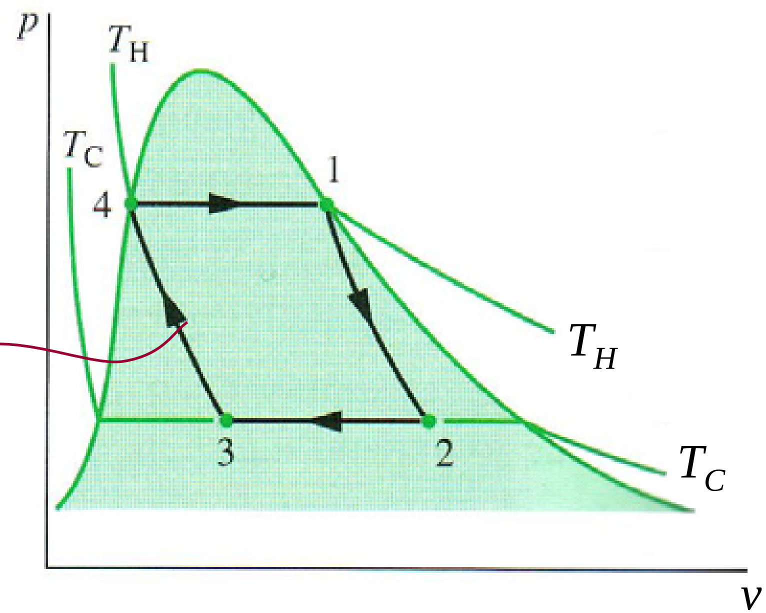
Zie versie met aantekeningen voor deze afleiding

Carnot vapor power cycle

The most obvious isothermal expansion is given by an evaporation step. The isotherm is then also an isobar.

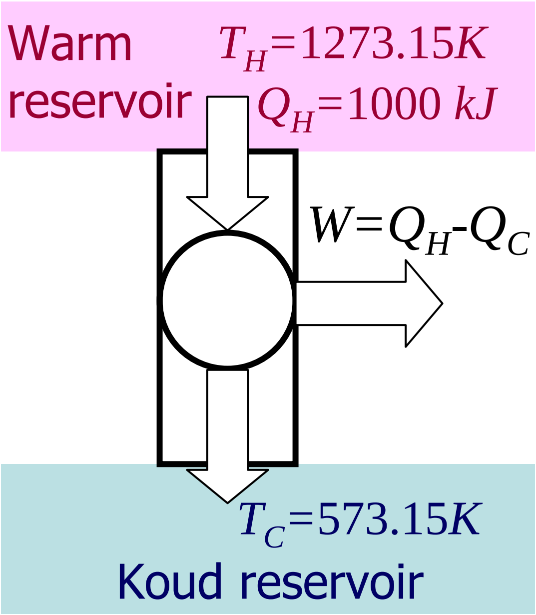
Ditto for condensation as an isothermal compression





The compression of a two-phase system has (technical) disadvantages and power-cycles with full condensation will be discussed later

Voorbeeld: opgave 5.21



Een reversibel Carnot vermogenskringproces ontvangt 1000 kJ energie door warmteoverdracht uit een reservoir met temperatuur 1000°C en geeft warmte af aan een reservoir met temperatuur 300°C

Bereken het thermisch rendement en de netto geleverde arbeid, in kJ

Voorbeeld: opgave 5.28

Een uitvinder beweert onderstaande data te hebben verkregen met een vermogenskringproces dat werkt tussen twee reservoirs van 727°C en 127°C

(a) Q_H=400 kJ, W^{cyc}=200 kJ, Q_C=200 kJ;

(b) Q_H=400 kJ, W^{cyc}=240 kJ, Q_C=160 kJ;

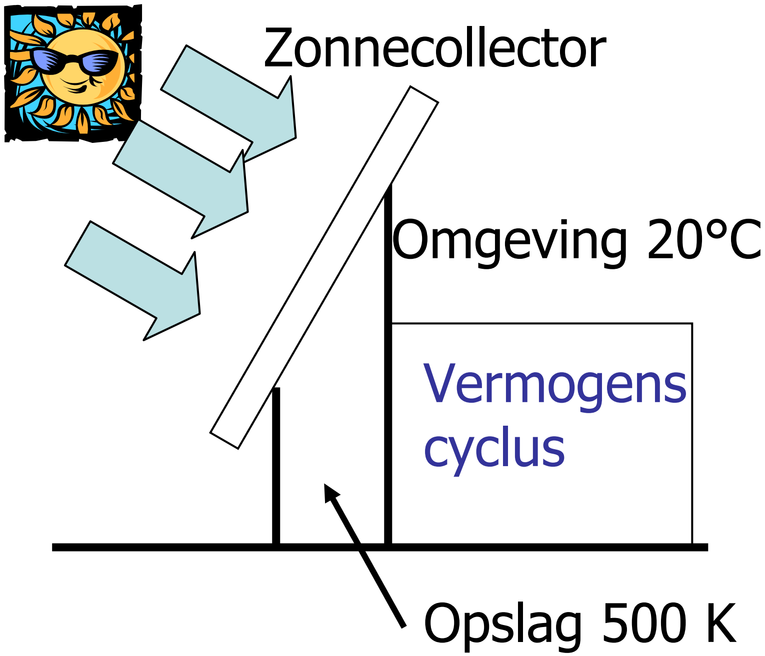
(c) Q_H=400 kJ, W^{cyc}=210 kJ, Q_C=200 kJ;

Ga na of zijn beweringen in overeenstemming zijn met de principes van de Thermodynamica

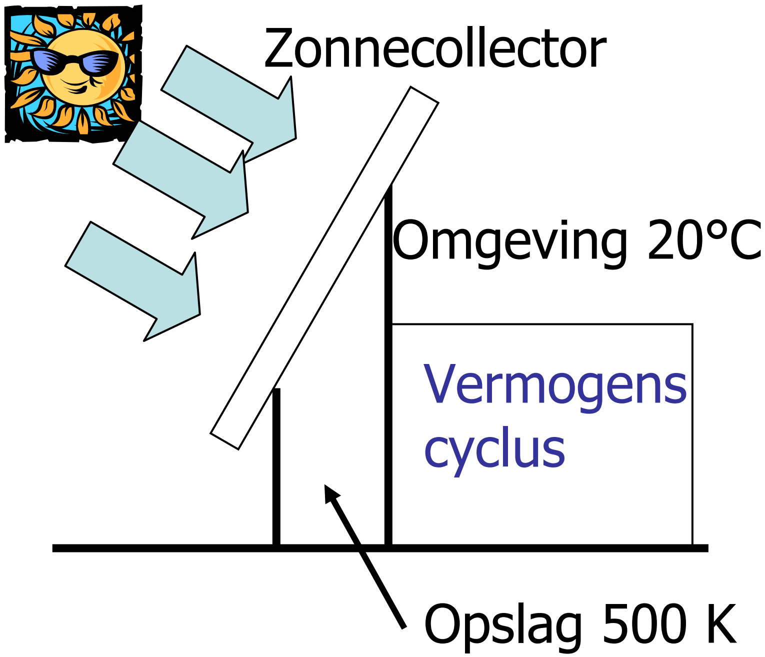
$$\eta = \frac{W_{kringproces}}{Q_H}$$

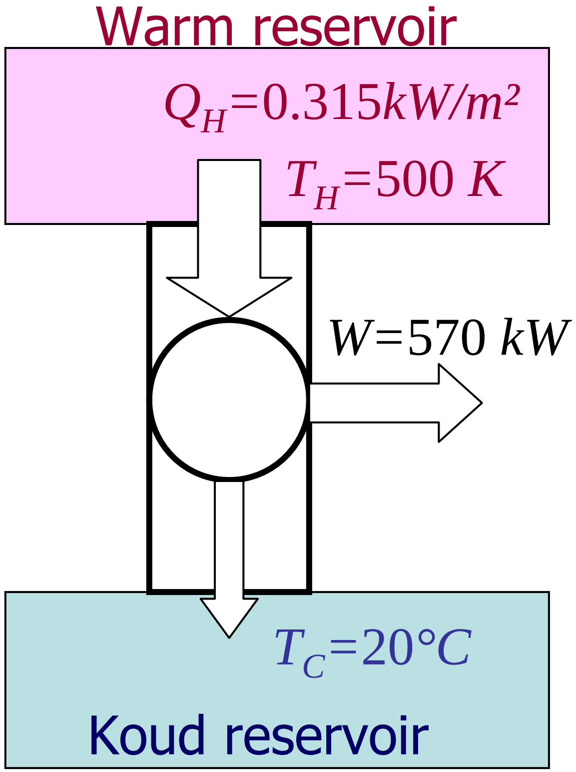
Voorbeeld: opgave 5.33

- De figuur laat een systeem voor benutting van zonnestraling voor de productie van elektriciteit in een vermogenskringproces zien
- De zonnecollector ontvangt zonnestraling met een vermogen van 0.315 kW per m² oppervlakte en levert energie aan een opslageenheid dat een constante temperatuur van 500 K heeft
- Het vermogenskringproces ontvangt energie door warmteoverdracht vanuit de opslag, produceert 570 kW elektriciteit en staat energie af aan de omgeving bij een temperatuur van 20°C
- Voor quasi-statisch bedrijf, bepaal de minimum theoretische zonnecollector oppervlakte, in m²



Voorbeeld: opgave 5.33





$$\eta^{rev} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{(20 + 273.15)K}{500\,K} = 0.414$$

$$\eta = \frac{W_{kringproces}}{Q_H} \Rightarrow Q_H = \frac{W_{kringproces}}{\eta} = \frac{570\,kW}{0.414} = 1377\,kW$$

$$A = \frac{Q_H}{0.315\ kW/m^2} = \frac{1377\,kW}{0.315\ kW/m^2} = 4371 m^2$$

Voorbeeld: opgave 5.50

- Een kilogram lucht met een ideaal gas gedrag doorloopt een Carnot-vermogenskringproces dat een thermisch rendement van 60% heeft
- De warmte overgedragen aan de lucht gedurende de isotherm expansie is 40 kJ
- Aan het begin van de isotherm expansie is de druk 7 bar en is het volume 0.24 m³

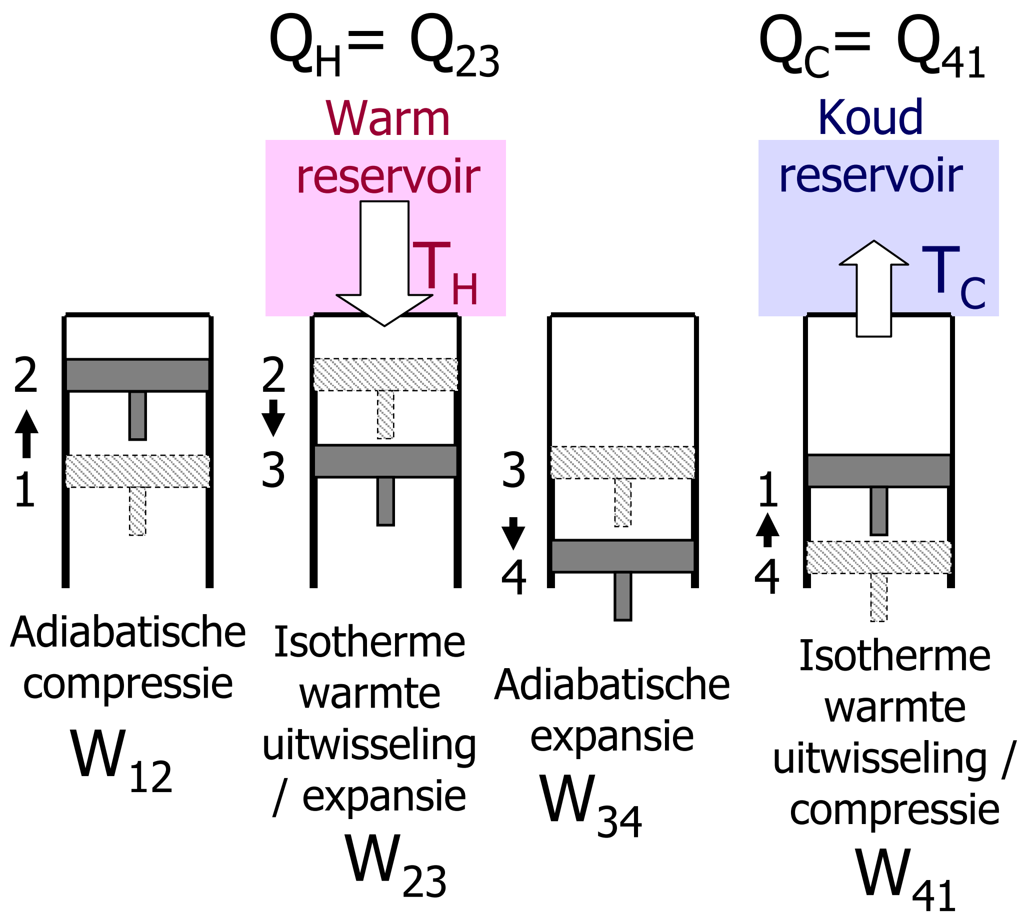
Bereken:

- De hoogste en laagste temperatuur voor het kringproces, in K
- Het volume aan het eind van de isotherm expansie, in m³
- De arbeid en warmte overdracht voor de vier deel processen, in kJ
- Schets het kringproces in een p-v diagram

T / K	u / kJ/kg
580	419.55
590	427.15
230	164.00
240	171.13

uit tabel A-22

Voorbeeld: opgave 5.50



$$m = 1 kg$$

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 0.60 \Rightarrow \frac{T_C}{T_H} = 0.40$$

$$2 \rightarrow p_2 = 7\,bar = 7.10^5\,Pa; V_2 = 0.24\,m^3$$

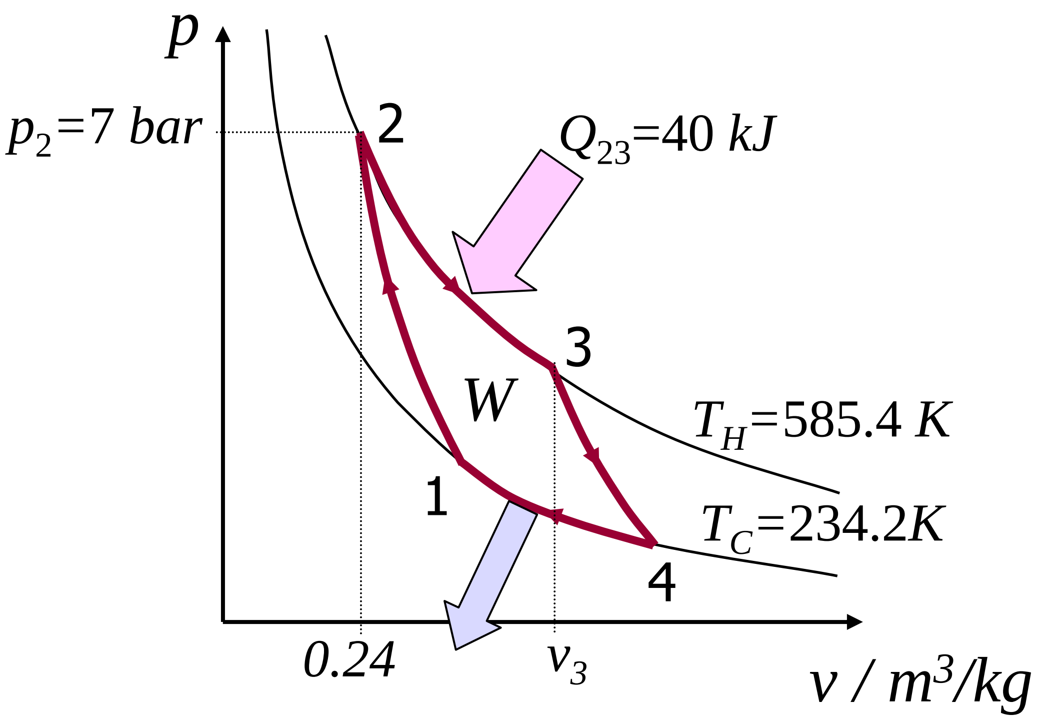
$$pV = mRT \Rightarrow T = \frac{p\frac{V}{m}}{R}$$

$$T_H = \frac{p\frac{V}{m}}{R} = \frac{7.10^5 \frac{0.24}{1.0}}{\frac{8.314}{28.97.10^{-3}}} = 585.4\,K$$

$$T_C = 0.40 T_H = 234.2 K$$

TUDelft

Voorbeeld: opgave 5.50



$$W_{23} = Q_{23} = 40kJ$$

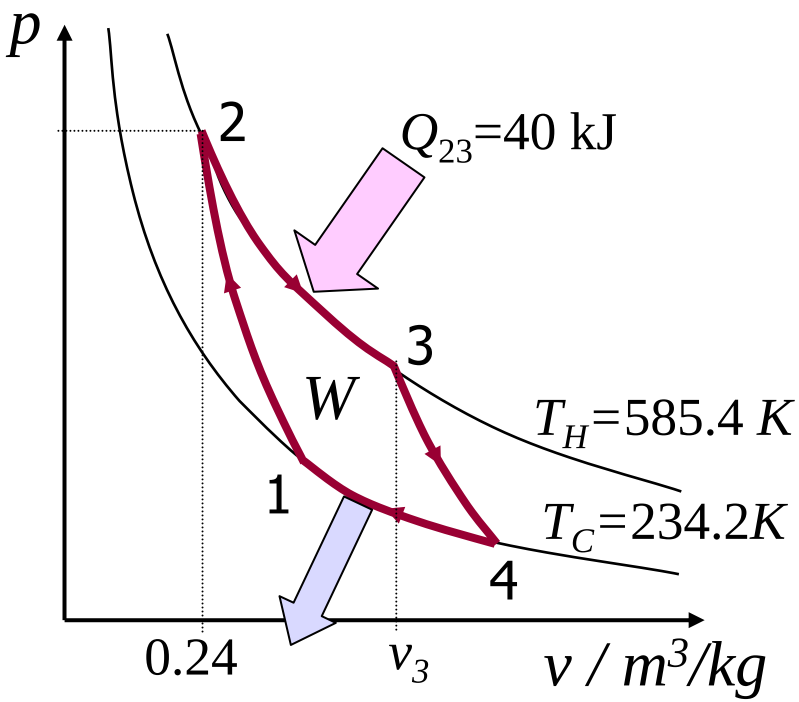
$$pV = mRT$$

$$W_{23} = mRT_H \ln\frac{V_3}{V_2} = p_2V_2 \ln\frac{V_3}{V_2}$$

$$\ln\frac{V_3}{V_2} = \frac{W_{23}}{p_2V_2} \Rightarrow V_3 = V_2 e^{\frac{W_{23}}{p_2V_2}}$$

$$V_3 = 0.24e^{\frac{40}{700*0.24}} = 0.305m^3$$

Voorbeeld: opgave 5.50



T / K	u / kJ/kg
580	419.55
590	427.15
230	164.00
240	171.13

$$\eta = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 0.60 \Rightarrow \frac{Q_C}{Q_H} = 0.40$$

$$Q_C = 0.40 * Q_H = 0.40 * Q_{23} = 0.40 * 40 = 16kJ$$

$$Q_{41} = -Q_C = -16kJ$$

$$Q_{12} = Q_{34} = 0 \qquad W_{23} = Q_{23} \qquad W_{41} = Q_{41}$$

$$\sum W = \sum Q \Rightarrow W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = Q_{23} + Q_{41}$$

$$-W_{12} = W_{34}$$

$$-W_{12} = m(u_2 - u_1)$$

$$Tabel\_A22 : -W_{12} = m(423.65 - 167.0) = 256.7kJ$$

Aanwijzigingen voor zelfstudie

- H5 nu behandeld (Koel- en Warmtepomp kringprocessen volgende keer). Dit voor de volgende keer goed doorlezen
- Maak enkele van de opgaven 5.1 t/m 5.22 (tweede wet formuleringen van Clausius en Kelvin-Planck)
- Maak enkele van de opgaven 5.23 t/m 5.32 (ideaal arbeids-kringprocessen)
- Maak twee of meer van de opgaven 5.46 t/m 5.49

- Voor het volgende college staan delen van hoofdstuk 6 op het programma