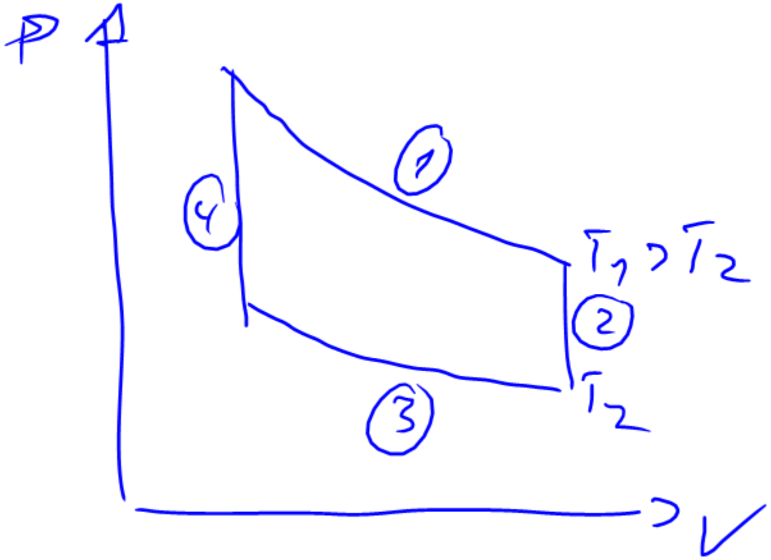
2.7 STIRLING-MOTOR (1) (1816)

2x Isothermen

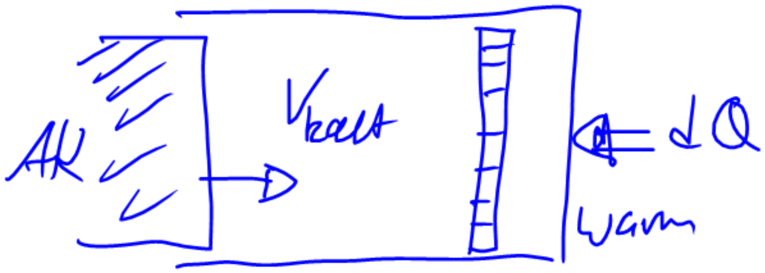
2x Isochoren



- 2 Temperaturreservoirs
- Arbeitskolben
- Verdrängerkolben
- Schwungrad

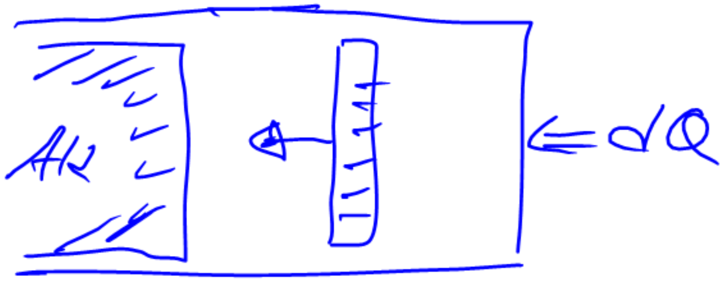
2.7 STIRLING-MOTOR (2)

③ Isotherme bei T_{kalt}



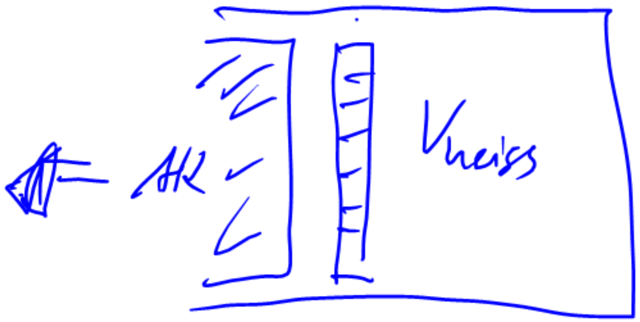
kalt $V_{kalt} \searrow$ $V_{heiss} = const$ $p \nearrow$

④ Isochore ZA



$V_{heiss} \nearrow$ $V_{kalt} \searrow$

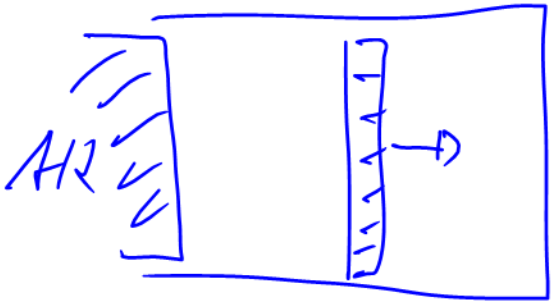
① Isotherme ZA bei T_{warm}



$V_{kalt} \nearrow$

$V_{heiss} \approx const$

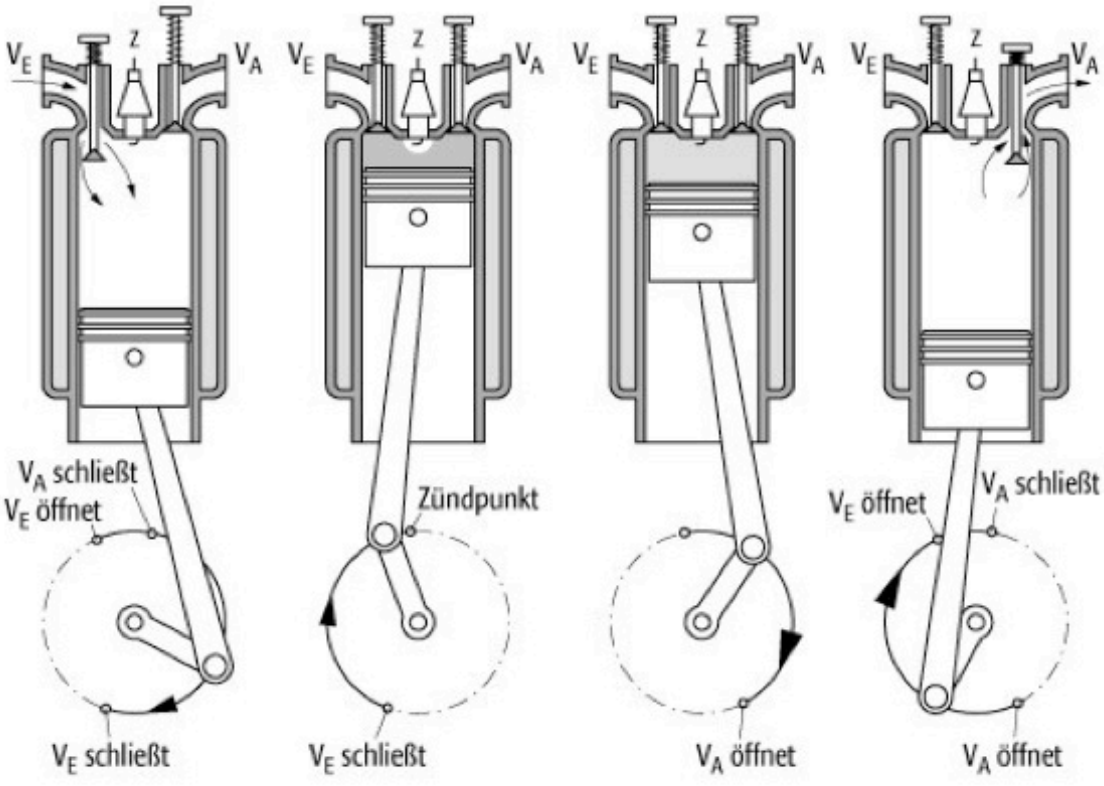
② Isochore ZA



$V_{kalt} \nearrow$

$V_{heiss} \searrow$

2.7 OTTO-MOTOR



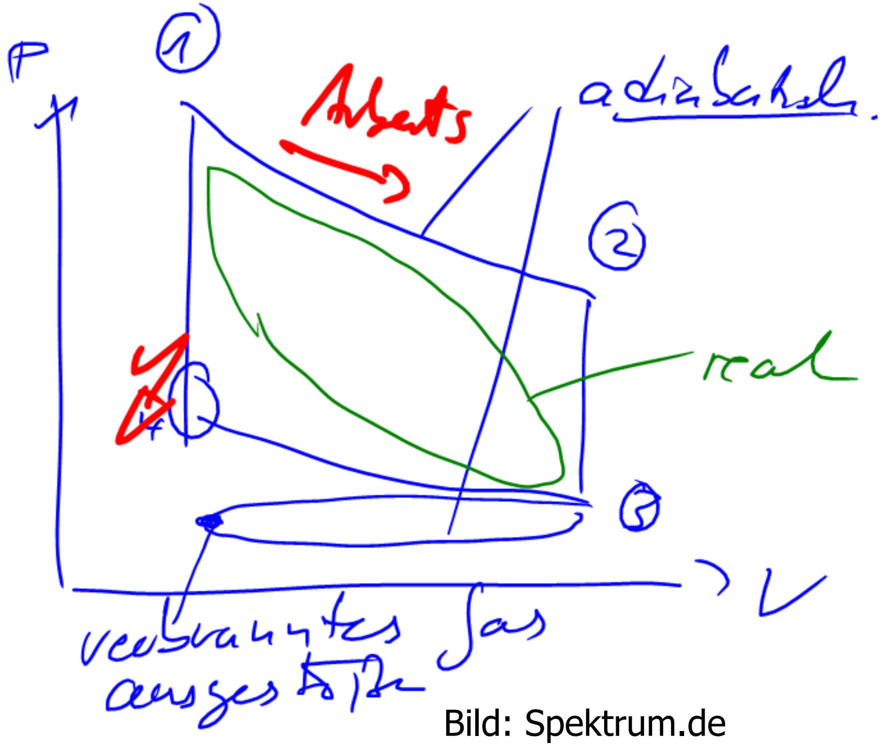
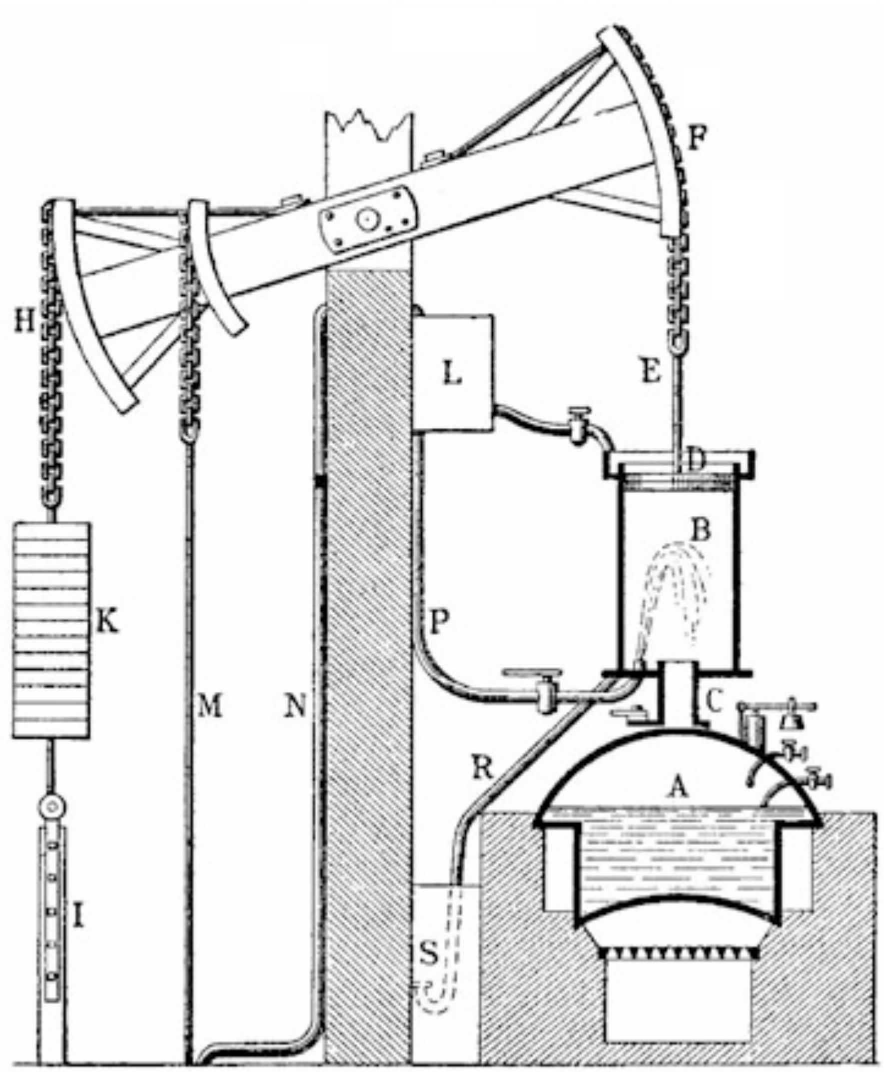
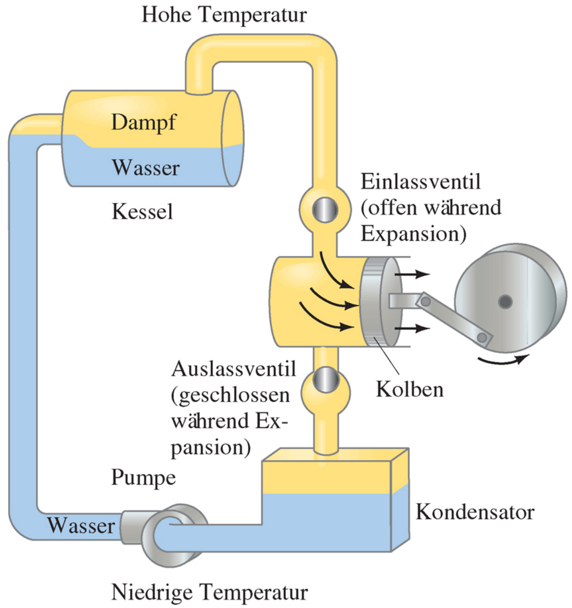


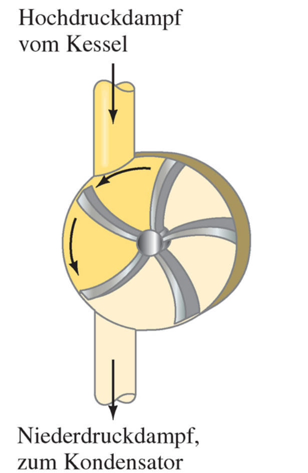
Bild: Spektrum.de

2.7 DAMPFMASCHINE (UND TURBINE)





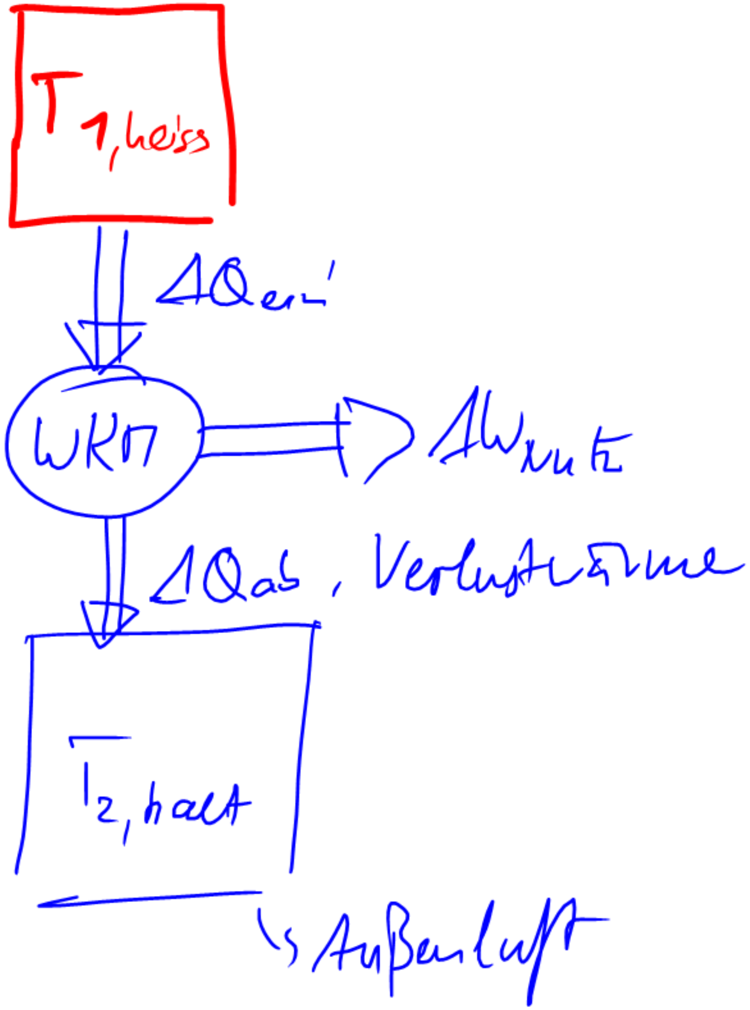
(a) Reziproker Typ



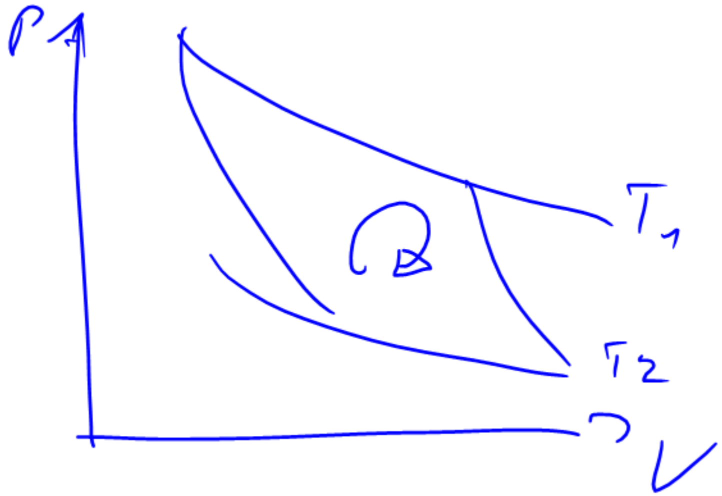
(b) Turbine (Kessel und Kondensator nicht gezeigt)

Bilder: Wikipedia, Giancoli

2.7 ABSCHLUSS: WÄRMEKRAFTMASCHINEN



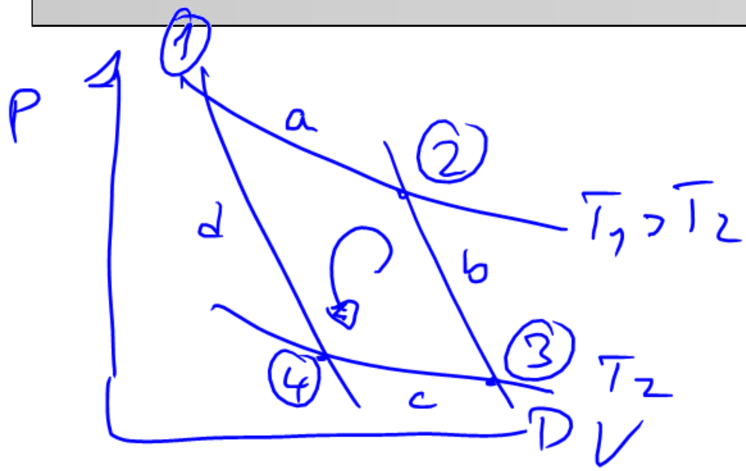
Carnot-Prozess



$$\eta^{\text{carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Das ist der maximale Wirkungsgrad!

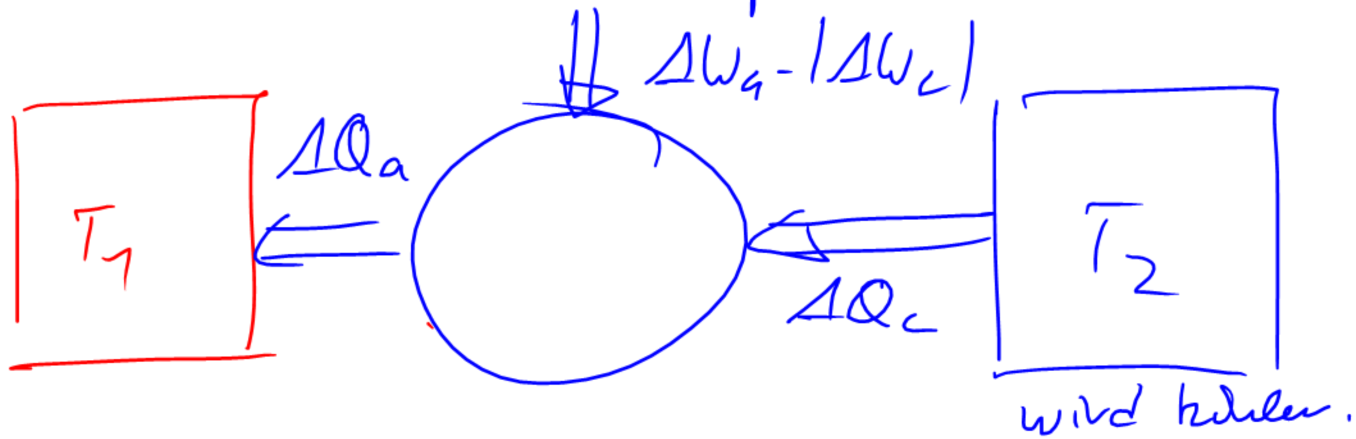
2.7 WÄRMEPUMPE UND KÄLTEMASCHINE



nach wie vor: $|\Delta W_d| = |\Delta W_b|$

a) jetzt: isotherme Kompression mit Wärmeabgabe $\Delta Q_a = -\Delta W_a$ bei <u>hoher</u> T_1. ΔW_a wird reingesteckt.

c) jetzt: isotherme Expansion mit Wärmeaufnahme ΔQ_c bei niedriger Temperatur T_2



2.7 WÄRMEPUMPE UND KÄLTEMASCHINE (2)

Wärmepumpe: z.B. im Haushalt $T_2 = 263\,K = -10°C$

$T_1 = 293\,K = 20°C$

Carnot

„Leistungszahl" $\varepsilon_{WP} = \dfrac{\text{abgegebene Wärme bei } T_1}{\text{netto aufgebrachte Arbeit}} = \dfrac{|\Delta Q_a|}{|\Delta W_a| - |\Delta W_c|} = \dfrac{1}{\eta}$

↳ „COP" - coefficient of performance

$$= \frac{n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}}{nR \cdot T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}} \qquad \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$= \frac{T_1}{T_1 - T_2} \qquad (= 9{,}77)$$

Kältemaschine (Kühlschrank)

Leistungszahl: $\varepsilon_{KM} = \dfrac{\text{aufgenommene Wärme bei } T_2}{\text{am System geleistete Arbeit}}$

$$\overset{\text{Carnot}}{=} \frac{\Delta Q_c}{\Delta W_a - |\Delta W_c|}$$

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

2.8 ENTROPIE UND 2. HAUPTSATZ

"Wärme fliesst von allein nur von einem wärmeren zu einem kälteren Körper, nie umgekehrt."

"Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmereservoirs."

"Unmöglichkeit eines Perpetuum Mobiles 2. Art!"

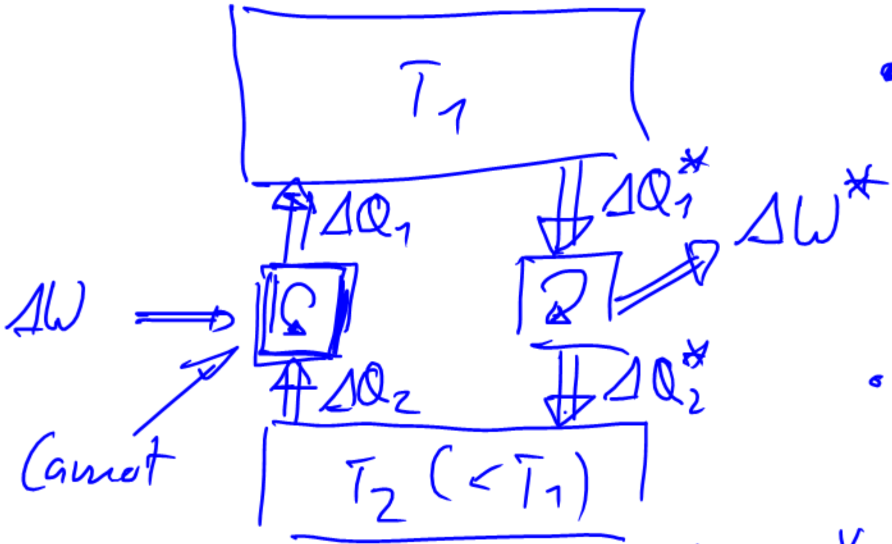
"Es gibt keine periodisch arbeitende Wärmekraftmaschine, die zwischen Reservoirs mit Temperaturen T_1 und T_2 ($T_1>T_2$) arbeitet und einen Wirkungsgrad größer als $\eta=1-T_1/T_2$ (Carnot-Maschine) hat."

2.8 BEWEIS

Gedankenexperiment!

Annahme: es gibt eine Maschine (*) mit $\eta^* > \eta_{carnot}$

Experiment



- $\eta^* = \frac{|\Delta W^*|}{\Delta Q_1^*} \Rightarrow |\Delta W^*| = \eta^* \cdot \Delta Q_1^*$ (1)
- $\varepsilon_{WP} = \frac{\Delta Q_1}{\Delta W} \xRightarrow{\text{Carnot}} \varepsilon_{WP} = 1/\eta_{carnot}$

$\Delta W = \eta^{carnot} \cdot \Delta Q_1$ (2)

- betreibe so, dass $\Delta Q_1 = \Delta Q_1^* \Rightarrow T_1 = const$

$\Rightarrow \Delta W^* = \frac{\eta^*}{\eta} \cdot \Delta W$

aber: $\eta^* > \eta \Rightarrow \Delta W^* > \Delta W \Rightarrow$ Maschine verrichtet netto Arbeit.

$\Delta Q_2^* = \Delta Q_1^* - \Delta W^* < \Delta Q_1 - \Delta W = \Delta Q_2 \Rightarrow T_2$ sinkt (1. HS)

$\Delta Q_2 - \Delta Q_2^* = \Delta W^* - \Delta W$ ⇒ Wärme bei T_2 wird zu 100% in Arbeit umgewandelt ↯ ⇒ 2. HS ⇒ $\cancel{\eta^* > \eta_{carnot}}$

2.8 REDUZIERTE WÄRME

Carnot: $\eta = \frac{\Delta Q_a + \Delta Q_c}{\Delta Q_a} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

$1 + \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q_a} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \boxed{\frac{\Delta Q_a^{rev}}{T_1} + \frac{\Delta Q_c^{rev}}{T_2} = 0}$

definiere: $\frac{\Delta Q}{T}$ bzw. $\frac{dQ}{T}$ =: reduzierte Wärme

irreversibel arbeitende Maschine: $\Delta U_{a,c}^{isotherm} = 0 \Rightarrow \begin{array}{l} \Delta W_a^{irr} + \Delta Q_a^{irr} = 0 \\ \Delta W_c^{irr} + \Delta Q_c^{irr} = 0 \end{array}$

$\Rightarrow -(\Delta W_a^{irr} + \Delta W_c^{irr}) = \Delta Q_a^{irr} + \Delta Q_c^{irr}$

Carnot

aber: $-\frac{(\Delta W_a^{irr} + \Delta W_c^{irr})}{\Delta Q_a^{irr}} = \frac{\Delta Q_a^{irr} + \Delta Q_c^{irr}}{\Delta Q_a^{irr}} = \eta^{irr} < \eta^{rev} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

$1 + \frac{\Delta Q_c^{irr}}{\Delta Q_a^{irr}} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \boxed{\frac{\Delta Q_a^{irr}}{T_1} + \frac{\Delta Q_c^{irr}}{T_2} < 0}$