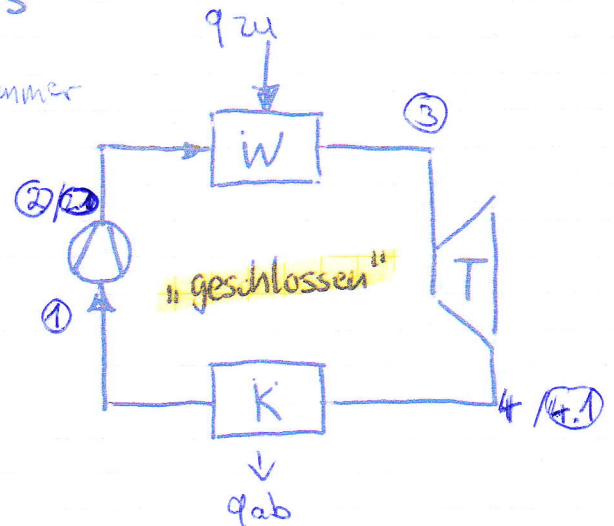
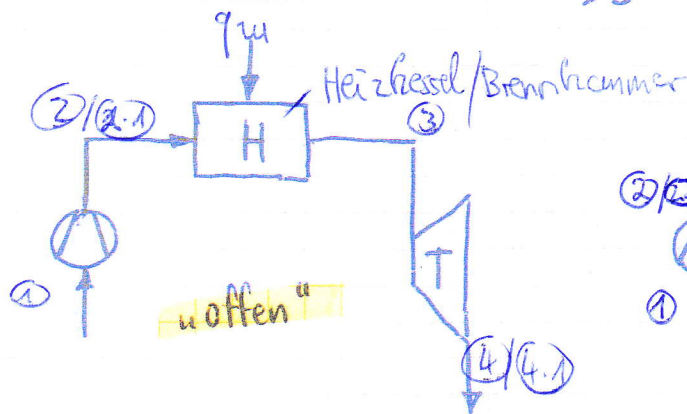
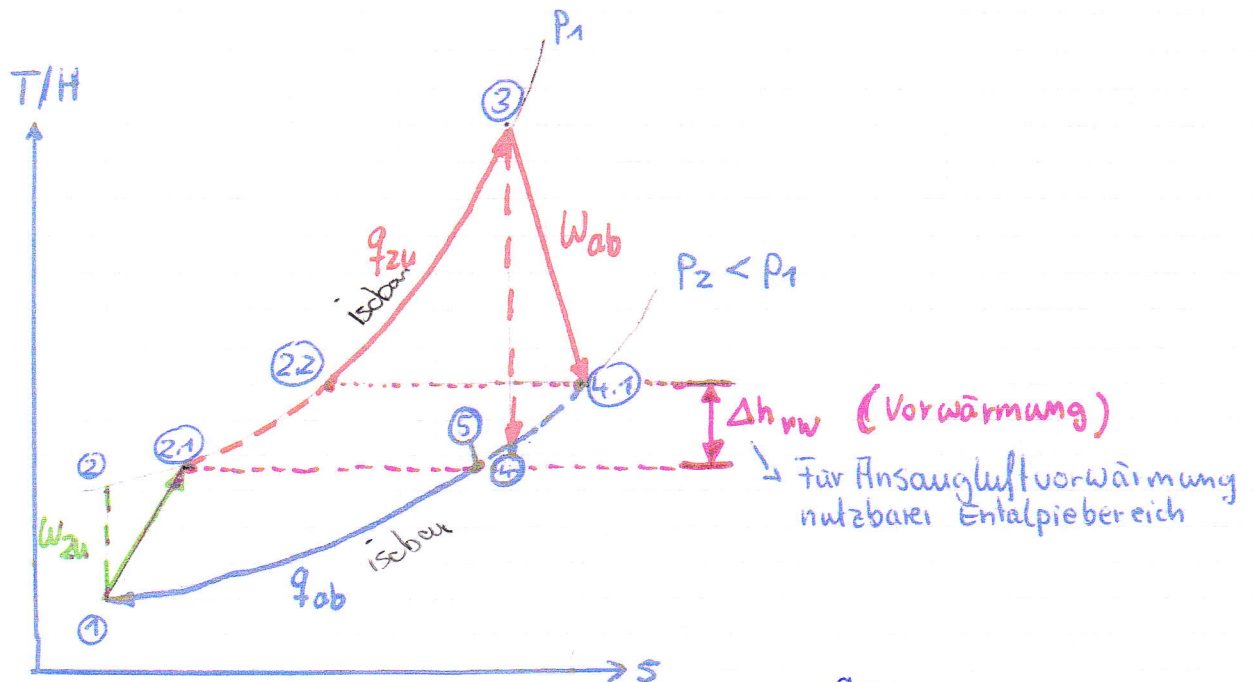


Gasturbine + Vorwärmung [Joule Prozess]



- 1-2 : adiabate Kompression
- 1-2.1 : polytrope " (real)
- 2-3 : isobare Erwärmung
- 3-4 : adiabate Entspannung
- 3-4.1 : Polytrope Entspannung (real)
- 4.1-4 : Enthalpie, nutzbar für Vorwärmung
- 4.1/4-1 : isobare Abkühlung

Gasturbine + Vorwärmung [Joule Prozess]

Kompression: $T_{2,1} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{\eta_i}$

Expansion: $T_{4,1} = T_3 + (T_4 - T_3) \cdot \eta_i$

ohne Vorwärmung:

$$q_{zu} = c_p (T_3 - T_{2,1})$$

$$q_{ab} = c_p (T_1 - T_{4,1})$$

$$W_{zu} = c_p (T_{2,1} - T_1)$$

$$W_{ab} = c_p (T_{4,1} - T_3)$$

$$W_{KP} = W_{zu} + W_{ab}$$

$$P_{\text{Notz (elektrisch)}} = \dot{m} (W_{zu} + W_{ab})$$
$$= \dot{m} \cdot c_p \cdot [T_{2,1} - T_1 + T_{4,1} - T_3]$$

$$\eta_{th} = \frac{-W_{KP}}{q_{zu}}$$

$$P_m = \dot{m} \cdot q_{zu}$$

mit Vorwärmung:

$$q_{WT} = c_p (T_{2,2} - T_{2,1}) = c_p (T_{4,1} - T_4)$$

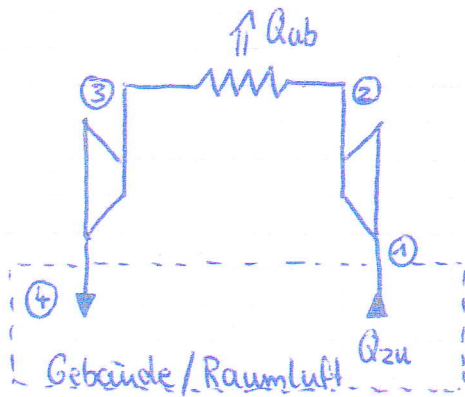
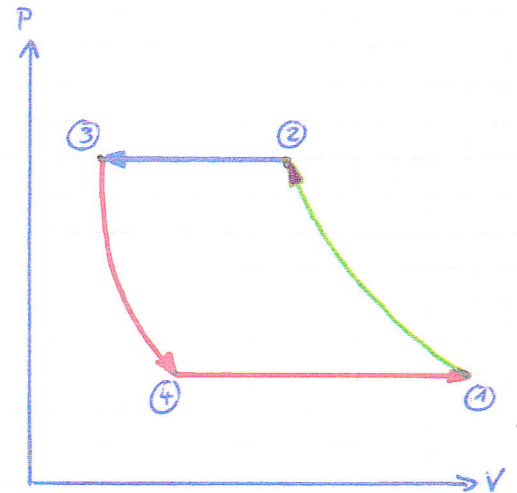
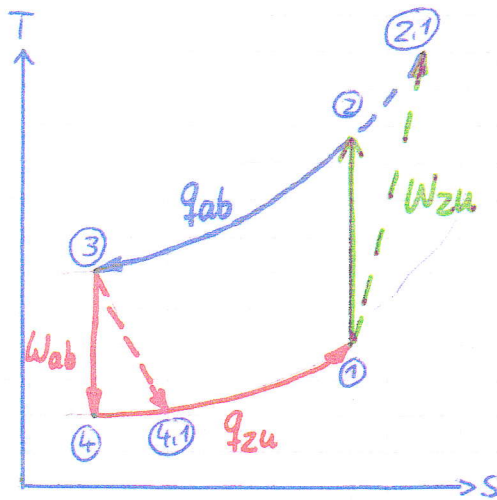
$$q_{zu}^* = c_p (T_3 - T_{2,2}) = c_p (T_3 - T_{2,1}) - q_{WT}$$

$$q_{ab}^* = c_p (T_1 - T_5) = c_p (T_1 - T_{4,1}) + q_{WT}$$

$$W_{KP} = W_{zu} + W_{ab}$$

$$\eta_{th}^* = \frac{-W_{KP}}{q_{zu}^*}$$

Gasturbine als Kältemaschine (linkslaufender Joule-Prozess)



1-2 : Isentrope Verdichtung durch Kompressor

1-2,1 : polytrope " " "

2-3 : Isobares Kühlen im Kühler

3-4 : Isentrope Entspannung in Turbine (Entstehen der Kaltluft)

3-4,1 : Polytrope " " " "

4-1 : Isobares Ansaugen der Außenluft / Raumluft

$$q_{zu,ideal} = c_p \cdot (T_1 - T_4)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

$$P_{Kälte} = \dot{m} \cdot q_{zu,ideal} = \rho \cdot \dot{V} \cdot q_{zu,ideal}$$

Antrieb

$$P_{an} = \dot{m} (W_{zu} + W_{ab}) = c_p \cdot \dot{m} [T_2 - T_1 - T_3 + T_4]$$

$$\varepsilon_L = \frac{P_{Kälte}}{P_{an}}$$

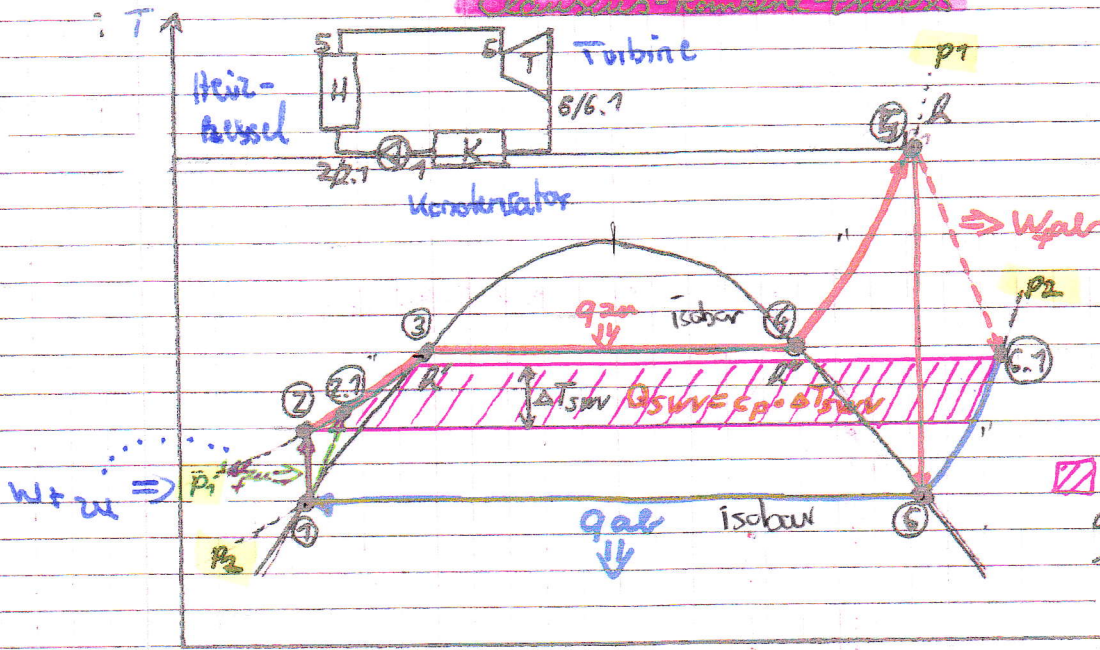
$$\varepsilon_{Carnot} = \frac{T_u}{T_o - T_u}$$

Dampfkräfteranlagen Clausius-Rankine-Prozess

Schaltung!

$W_{ab} = \text{negativ}$

$W_{zu} = \text{positiv}$



Erwärmung des Wasserbereichs

$$q_{sw} = c_p \cdot \Delta T_{sw} \Rightarrow s$$

1-2 Druckerhöhung, Wasserpumpe

Izentropische Kompression

1-2.1 — " —

(real) Polytrope Kompression

2-3 Erwärmung Wasser

Isotherme Erwärmung

3-4 Verdampfung bis Satteldampf

— " —

4-5 Überhitzung Satteldampf

— " —

5-6 Entspannung in der Turbine

Izentropische Entspannung

5-6.1 — " —

(real) Polytrope Entspannung

6.1/6-7 Kondensation des Dampfes

Isotherme Kondensation

$$h_2 \hat{=} \text{aus Dampftafel} = h' / h_2 = h_1 + v_1 \cdot (p_2 - p_1)$$

$$h_3 \hat{=} \text{aus Dampftafel} = h' / h_3 \hat{=} \text{aus Dampftafel} = h''$$

$$h_4 \hat{=} \text{aus U-Dampftafel} \hat{=} h''' \text{ oder } h''' = h'' + c_p \cdot (T_5 - T_4)$$

mit Mollier prüfen

(kann auch nicht auf Glücke liegen)

$$h_{2.1} = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_i} / h_{6.1} = h_6 - \eta_i \cdot (h_6 - h_4)$$

$$W_{1-2} = W_{1-2.1} = h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$q_{2-3} = q_{2-3} = h_3 - h_2$$

$$W_{3-4} = W_{3-4.1} = h_3 - h_4 = c_p \cdot (T_3 - T_4)$$

$$q_{4-5} = q_{4-5} = h_5 - h_4$$

$$W_{5-6} = W_{5-6.1} = h_5 - h_6 = c_p \cdot (T_5 - T_6)$$

$$q_{6-7} = q_{6-7} = h_7 - h_6$$

$$W_{6.1-7} = W_{6.1-7} = h_{6.1} - h_7 = c_p \cdot (T_{6.1} - T_7)$$

$$q_{7-1} = q_{7-1} = h_1 - h_{6.1}$$

Pressearbeit: $w_{kp} = -\sum (q) = -(q_{zu} + q_{ab})$

$w_{kp} = \sum (w_{+}) = (w_{zu} + w_{ab})$

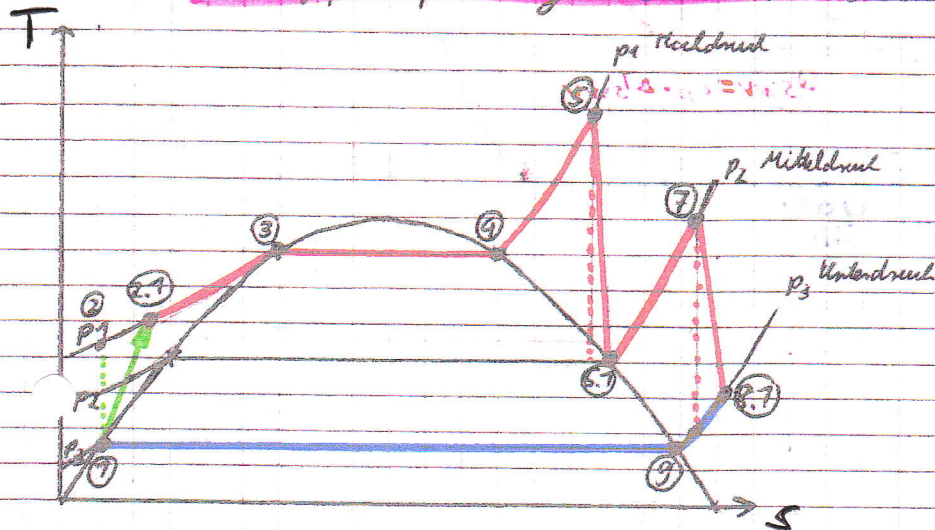
Thermischer Wirkungsgrad

$\eta_{th} = \frac{-w_{kp}}{q_{zu}}$

Innerer Wirkungsgrad

$\eta_i = \frac{w_{isen}}{w_{poly}}$

Dampfstraftanlage mit Zwischenüberhitzung



$h_0 = c_p \cdot T_0$

1-2 Isentrope Kompression

1-2.1 Polytrope Kompression

2-5 Isobare Erwärmung

5-6.1 Polytrope Entspannung

6.1-7 Isobare Erwärmung

7-8.1 Polytrope Entspannung

8.1 Isobare Kondensation (Abkühlung)

Bestimmung aller h aus Dampftafel und h/s -Diagramm.

Berechnungen wie Dampfturbinen ohne ZÜ

Spezifische Wärmeströme

$q_{zu} = (h_5 - h_{2.1}) + (h_7 - h_{6.1})$ $q_{ab} = h_9 - h_{8.1}$

Spezifische Arbeitsströme

$w_{ab} = w_{1-2} + w_{5-6} = (h_{2.1} - h_1) + (h_{6.1} - h_5)$ $w_{zu} = w_{2.1-5} = h_{2.1} - h_1$

Gewonnene Arbeit

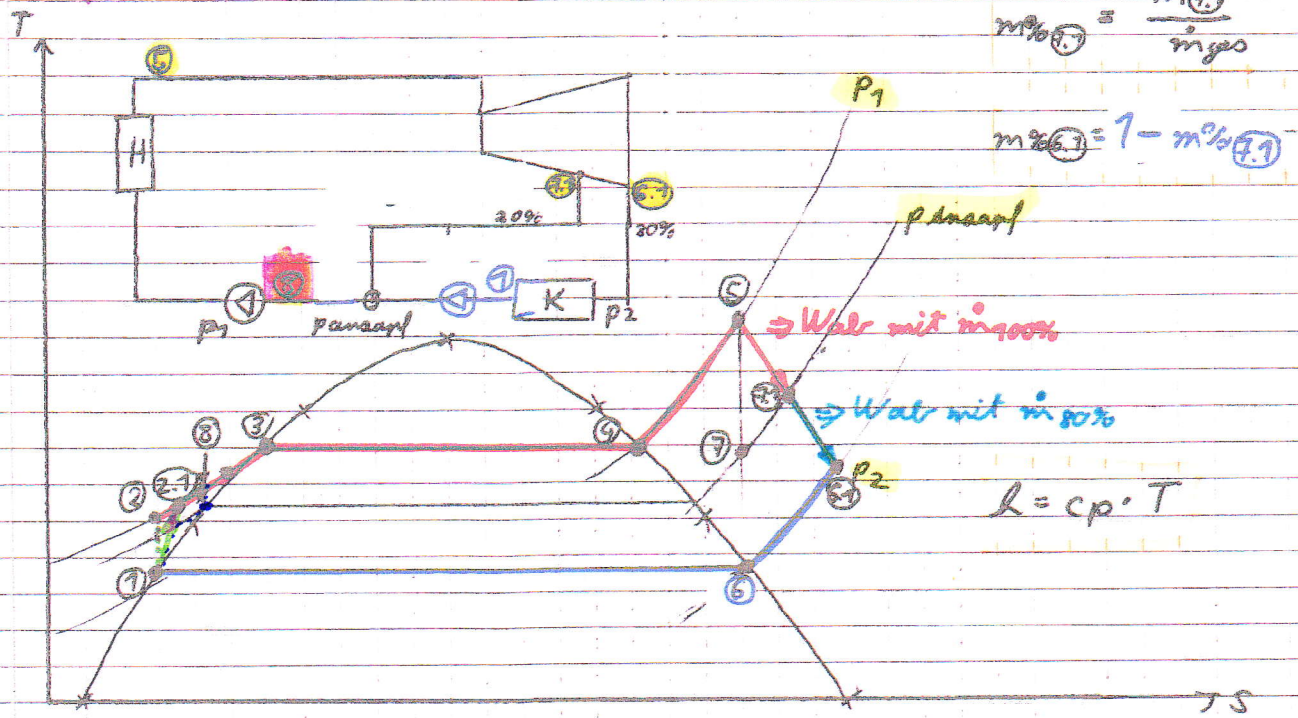
$w_{kp} = -\sum (q) = -(q_{zu} + q_{ab})$ $w_{kp} = \sum (w_{+}) = (w_{zu} + w_{ab})$

Wirkungsgrade

$\eta_{th} = \frac{-w_{kp}}{q_{zu}}$

$\eta_i = \frac{w_{isen}}{w_{poly}}$

Dampfkraftanlage mit Ansapfung



1-2 Isentrope Kompression

1-2.7 Polytrope Kompression

2-5 Isobare Erwärmung

5-7 Isentrope Entspannung bis Ansapfung

5-7.7 Polytrope Entspannung bis Ansapfung

7-6 Isentrope Entspannung

7.7-6.7 Polytrope Entspannung

6.7-1 Isobare Abkühlung

$$h_8 \text{ aus Dampftafel} = h' \quad h_2 = h_1 + v_1 \cdot (p_2 - p_1)$$

$$h_2 \text{ aus Dampftafel} = h' \quad h_2 \text{ aus Dampftafel}$$

$$h_2 \text{ aus U-Dampftafel} = h'' \text{ oder } h''' = h'' + c_p \cdot (T_5 - T_2)$$

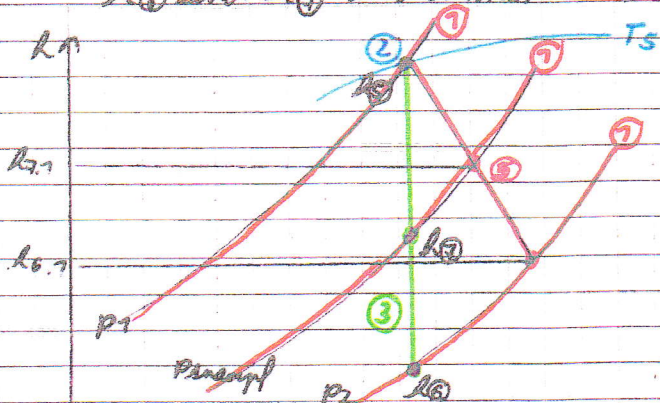
$$h_2 \text{ aus Dampftafel oder Mollier} \quad h_2 \text{ aus Mollier h/s Diagramm}$$

$$h_{2.7} = h_2 - \eta_i \cdot (h_2 - h_2) \quad h_{7.7} = h_5 - \eta_i \cdot (h_5 - h_7)$$

$$h_{2.7} = h_2 + \frac{h_2 - h_2}{\eta_i} \quad h_8 = m\%_{2.7} \cdot h_2 + m\%_{6.7} \cdot h_{6.7} \quad \text{Def. oben}$$

Vorgehen zum bestimmen von h_2 bis $h_{7.7}$ aus Mollierdiagramm

1. p_1, p_{Ansapf}, p_2 Markieren
2. h_2 aus Schnittpunkt p_1 mit T_s ermitteln
3. von h_2 Senkrechte einzeichnen und aus Schnittpunkt mit p_{Ansapf} und p_2 ; $h_{2.7}$ und h_7 bestimmen
4. Mit Formeln $h_{7.7}$ und $h_{6.7}$ bestimmen
5. Einzeichnen und Verbinden



Dampfkraftanlage mit Ansapfung

$$W_{KP, \text{real}} = (h_{6.1} - h_5) + m \cdot (h_{6.1} - h_{7.1}) - \underbrace{(h_{2.1} - h_2)}_{\text{Pumpenenergie}}$$

$$q_{zu} = h_5 - h_8$$

$$\eta_{th} = \frac{-W_{KP}}{q_{zu}}$$

$$P_{el} = W_{KP} \cdot \dot{m}_{ges}$$

ohne Ansapfung

$$W_{KP, \text{real}} = (h_{6.1} - h_6) - (h_{2.1} - h_2) \quad q_{zu, \text{real}} = h_5 - h_{6.1}$$

$$\eta_{th} = \frac{-W_{KP}}{q_{zu}}$$

Brennstoffbedarfsrechnung

$$P_{zu} = q_{zu} \cdot \dot{m}$$

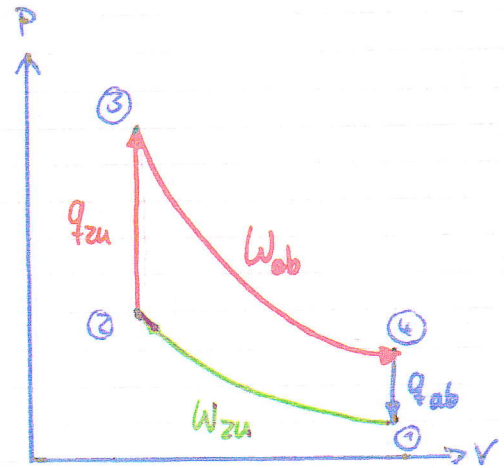
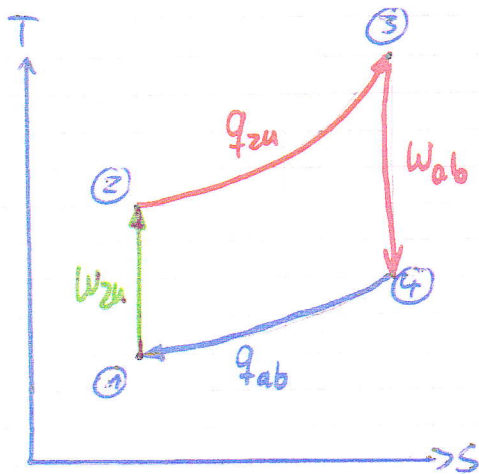
$$P_{zu}^* = \frac{P_{zu}}{\eta_{\text{Kessel}}}$$

Heizwert $H_z \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$

t = Zeitraum

$$\text{Bedarf} = \frac{P_{zu}^*}{H_z} \cdot t$$

Ottoprozess



- 1-2 : adiabale Verdichtung
- 2-3 : isochore Verdichtung
- 3-4 : adiabale Expansion
- 4-1 : isochore Expansion

Verdichtungsverhältnis:

$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

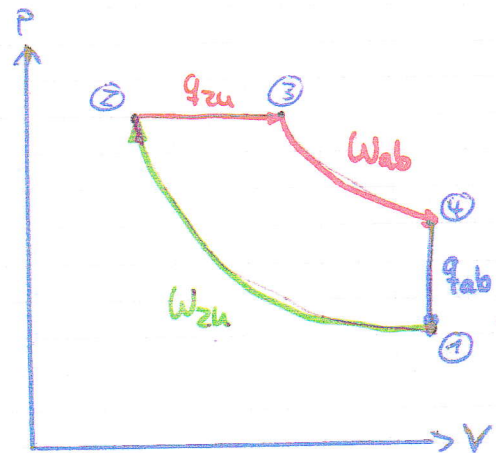
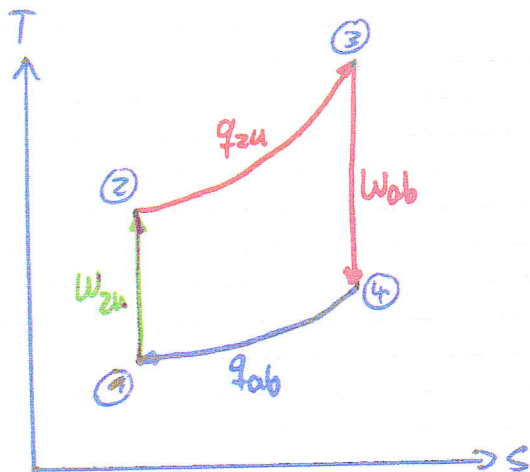
thermische Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{(k-1)}}$$

Arbeitsverhältnis:

$$\tau_w = \frac{W_{12} + W_{34}}{W_{134} + W_{41}}$$

Dieselprozess



- 1-2 : adiabate Verdichtung
- 2-3 : isobare Expansion
- 3-4 : adiabate Expansion
- 4-1 : isochore Abkühlung

Verdichtungsverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

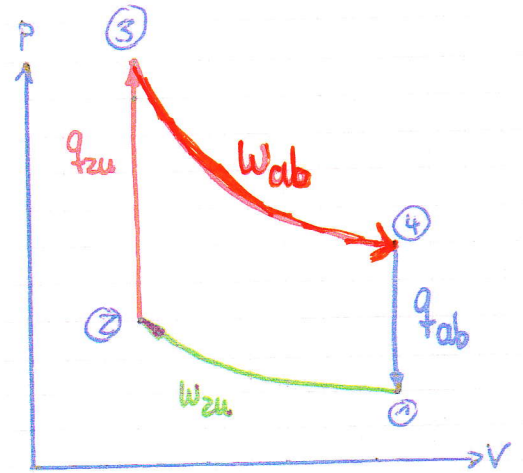
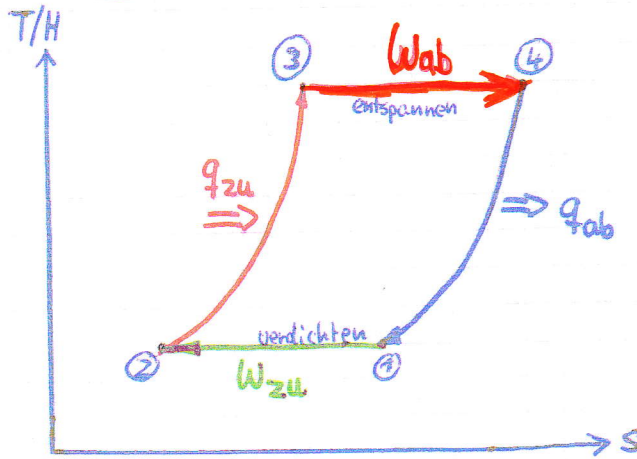
thermische Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}}$$

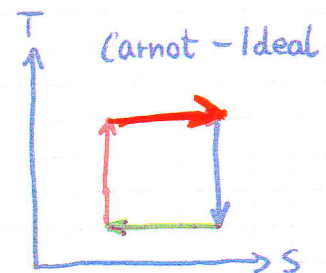
Arbeitsverhältnis:

$$\eta_w = \frac{\eta_{th} [(T_3/T_2) - 1]}{(T_3/T_1) - \frac{(T_3/T_2)^k + k - 1}{k \cdot \varepsilon^{(k-1)}}}$$

Stirlingmotor (Carnot-Prozess)



- 1-2 : Isotherme Kompression
- 2-3 : Isochore Wärmezufuhr
- 3-4 : Isotherme Entspannung
- 4-1 : Isochore Wärmeabfuhr



allg. Gasgl.: $p_1 \cdot V_1 = m \cdot R_i \cdot T_1 \quad \left| \frac{d}{dt} \right.$
 $p_1 \cdot \dot{V}_1 = \dot{m} \cdot R_i \cdot T_1$

Massenstrom : $\dot{m} = \frac{p_1 \cdot \dot{V}_1}{R_i \cdot T_1}$

$n \hat{=}$ Drehzahl

$\dot{V}_1 = V_1 \cdot n ; \dot{m} = m \cdot n$

Nutzarbeit : $W = m \cdot R_i \cdot (T_o - T_u) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$

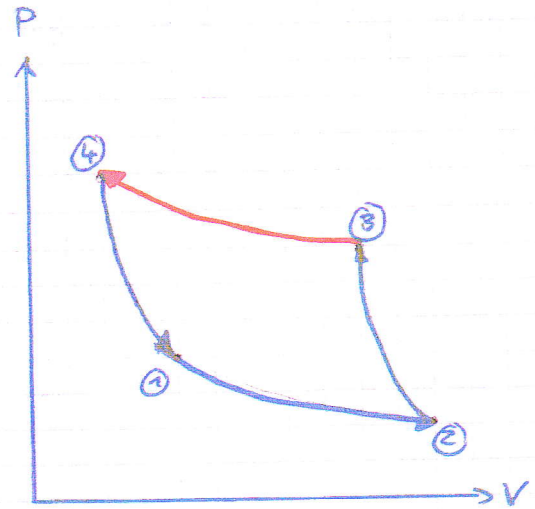
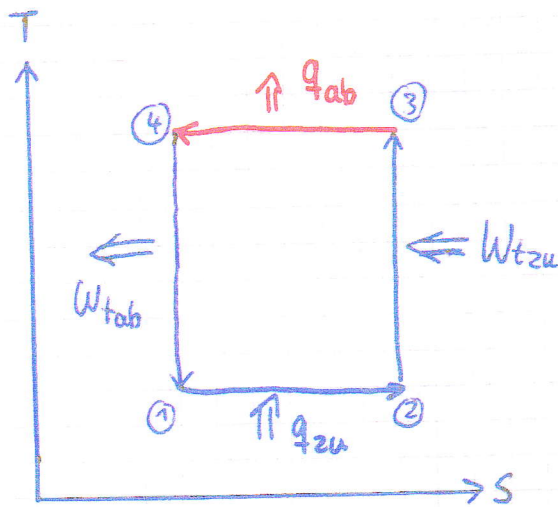
" spez. : $w = R_i \cdot (T_o - T_u) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$

Nutzleistung : $P_{Nutz} = \dot{m} \cdot w = \dot{m} \cdot R_i \cdot (T_o - T_u) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \dot{W}$

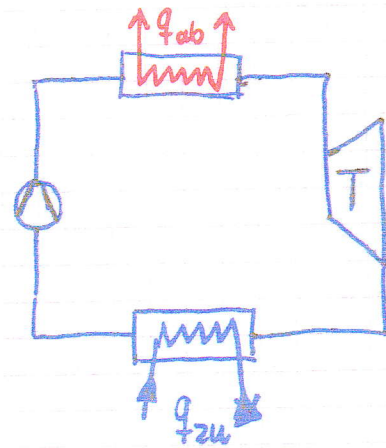
Wirkungsgrad : $\eta = 1 - \frac{T_u}{T_o}$

Wärmepumpe (Carnot-Prozess)

links laufend



- 1-2: isotherme Expansion
- 2-3: adiabate Verdichtung
- 3-4: isotherme Verdichtung
- 4-1: adiabate Expansion



$$c_v = c_p - R_i \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Leistungsziffer Kälte :

$$\epsilon_k = \frac{Q_{zu}}{\Delta W_r}$$

Leistungsziffer WP :

$$\epsilon_{WP} = \frac{Q_{ab}}{\Delta W_t}$$

Sonderfall - Carnot

$$\epsilon_k = \frac{T_u}{T_o - T_u}$$

$$\epsilon_{WP} = \frac{T_o}{T_o - T_u}$$

Mechanische Arbeiten :

$$W_{12r} = W_{t12} = R_i \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$W_{23r} = c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$W_{t23} = \kappa \cdot W_{23}$$

$$W_{34r} = W_{t34} = R_i \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)$$

$$W_{41r} = c_v \cdot (T_1 - T_4)$$

$$W_{t41} = \kappa \cdot W_{41}$$

zugeführte mech. Arbeit: $\Delta W_r = \sum W_{r,i}$

Wärmeleistung um Brauchwasser zu erwärmen: $\Delta W_t = \sum W_{t,i}$

Wärmemengen: 1-2: $q_{12} = -w_{12}$

2-3: $q_{23} = 0$ (isentrop)

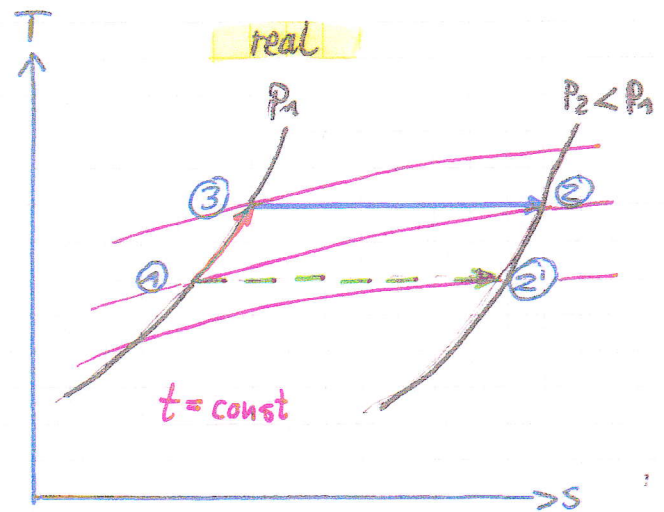
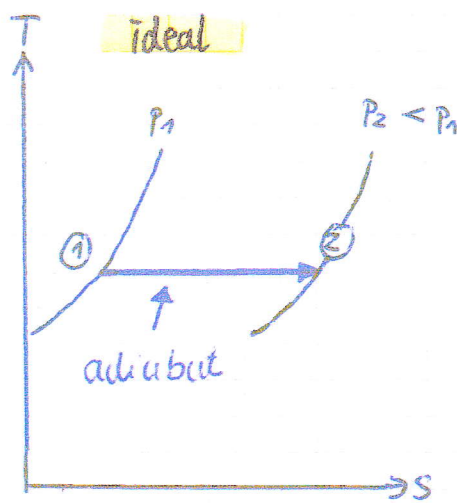
3-4: $q_{34} = -w_{34}$

4-1: $q_{41} = 0$ (isentrop)

Entropieänderung: 1-2: $\Delta s = R_i \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$ [Kühlen]

3-4: $\Delta s = R_i \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_4}\right)$ [Heizen]

Drosselung



- 1-3: Gasvorwärmung $T_3 = T_1 + \Delta T$
- 3-2: Abkühlung $t_2 < t_3$
- 1-2': Abkühlung $t_2' < t_1$

Für real:

$$\Delta h = c_p \cdot \Delta T \quad \Delta T = (P_1 - P_2) \cdot \mu_{JT}$$

Joule-Thomson-Koeffizient: μ_{JT} in $\left[\frac{K}{bar}\right]$

1-3: ~~adi~~ isobare Erwärmung 3-2: adiabate Drosselung

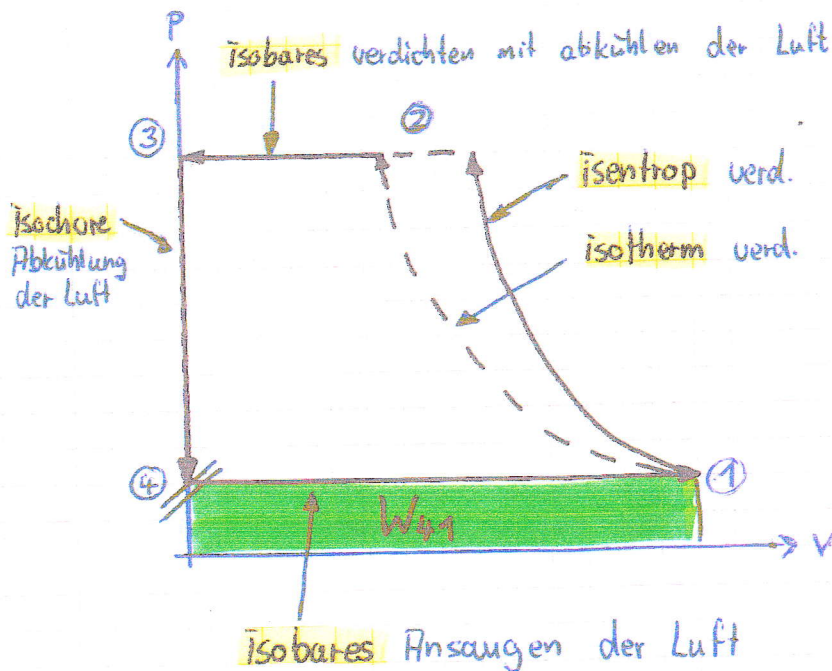
Für ideal:

- $c_1 = c_2$
- $h_1 = h_2$
- $q_{12} = 0$ [kein Wärmeumsatz]

$$\Rightarrow W_{t12} = h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - q_{12} = 0$$

[kein Arbeitsumsatz]

Kompression (Verdichten)



- 1-2 : Verdichtungsarbeit (+) , isentrop oder isotherm
- 2-3 : Ausschleubarbeit (+) , isobar
- 3-4 : Druckwechsel ohne Arbeit ($W_{34}=0$) isochor
- 4-1 : Ansaugarbeit , vom Gas an den Kolben (-)
isobar

$$w_{t \text{ isoth}} = R_c \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$$w_{t \text{ isen}} = \frac{k}{k-1} \cdot R_c \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Antriebsleistung wenn $\dot{V}$ gegeben:

$$\dot{V} = v \cdot \dot{m}$$

$$p \cdot V = m \cdot R_c \cdot T$$

$$p \cdot v = R_c \cdot T \Rightarrow v = \frac{R_c \cdot T}{p} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

$$\Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{V}}{v}$$

$$\Rightarrow P_{\text{isoth}} = \dot{m} \cdot w_{\text{isoth}}$$

$$P_{\text{isen}} = \dot{m} \cdot w_{\text{isen}}$$