Moderne theoretische Physik IIIa
Statistische Physik

KIT WS 20/21 Th. Schwetz-Mangold

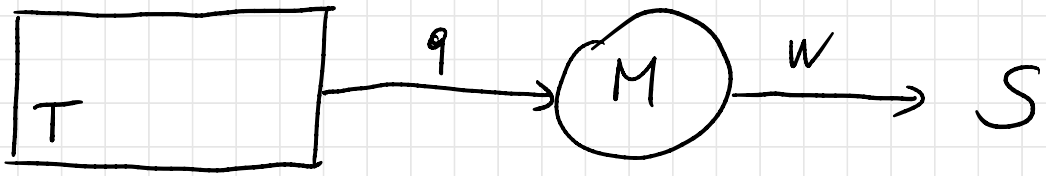
VO 9b - Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschinen

Anwend. des 1. HS + 2. HS

- Umwandlung von Wärme in Arbeit
- zyklische Prozesse: „Maschine" ist nach einem Zyklus wieder im gleichen Makrozust.

Perpetuum mobile der 2. Art



Wärmereservoir: R

1. HS: ein Zyklus: $\Delta E_M = 0$

$\Delta Q = q$, $\Delta W = -W$

$\Rightarrow \Delta E_M = q - W = 0 \Rightarrow q = W$

-) verträglich mit 1. HS (Energieerhaltung)

(Perpetuum mobile 1. Art: $q = 0$, $w > 0$
Arbeit aus „Nichts", Widerspr. mit 1. HS)

-) aber im Widerspruch mit 2. HS!

betrachte abgeschl. Syst.:

Reservoir "R", Maschine "M",

Arbeitsspeicher "S" z.B. Feder, Gewicht

$$\Delta S = \Delta S_R + \Delta S_M + \Delta S_S \geq 0 \qquad (2.\text{HSa})$$

Freiheitsgrade: $f_R, f_M \sim N_A$, $f_S \sim 1$

$\Rightarrow$ $S_S \ll S_R, S_M$, $\Delta S_S \approx 0$

$\Delta S_M = 0$ (1 Zyklus, gleicher Makrozust.)

$$\Delta S_R = -\frac{q}{T} \qquad (2.\text{HSb})$$

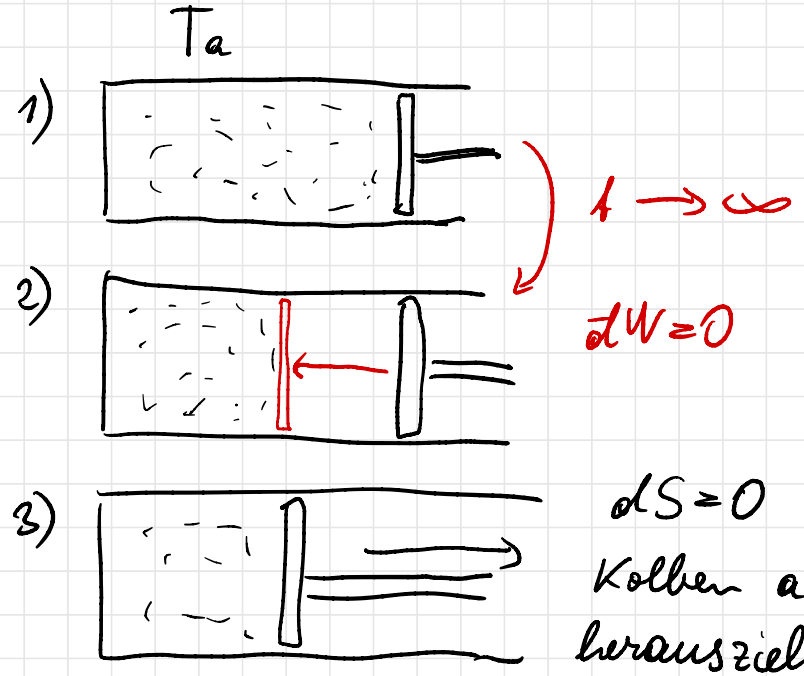
$dS = \frac{đQ_{qs}}{T}$ (quasistat.)

weil $đW = 0$ gilt $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ auch für nicht-quasistat. Prozesse

$$\Delta S = -\frac{q}{T} < 0 \Rightarrow$$

Widerspruch zu 2. HSa !

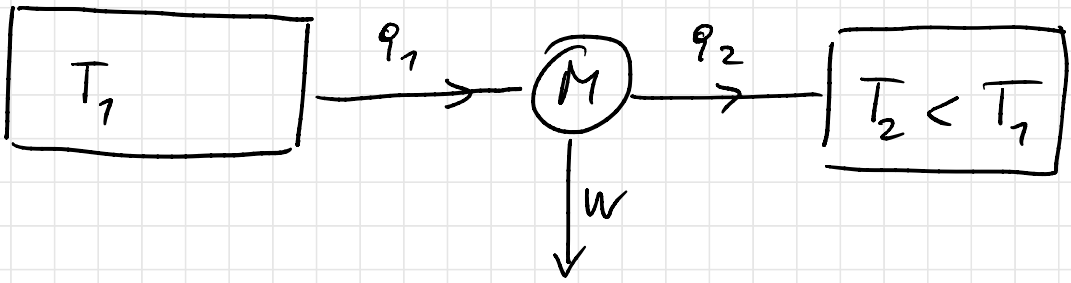
Bsp.



4) Kontakt mit Wärmebad bringen

$\Rightarrow T_b \to T_a$ unter Aufnahme $q = W$

Wärmekraftmaschine



1. HS: 1 Zyklus: $\Delta E_M = q_1 - q_2 - W = 0$

$\Rightarrow W = q_1 - q_2$

2. HS: $\Delta S = \Delta S_{R_1} + \Delta S_{R_2} + \Delta S_M + \Delta S_S \geq 0$

$\Delta S_{R_1} \rightarrow -\frac{q_1}{T_1}$; $\Delta S_{R_2} \rightarrow +\frac{q_2}{T_2}$; $\Delta S_M = 0$; $\Delta S_S \approx 0$

$$\Delta S = \frac{q_2}{T_2} - \frac{q_1}{T_1} \geq 1$$

$$\boxed{\frac{q_2}{q_1} \geq \frac{T_2}{T_1}}$$

(PM 2. Art: $q_2 = 0$)

Wirkungsgrad:

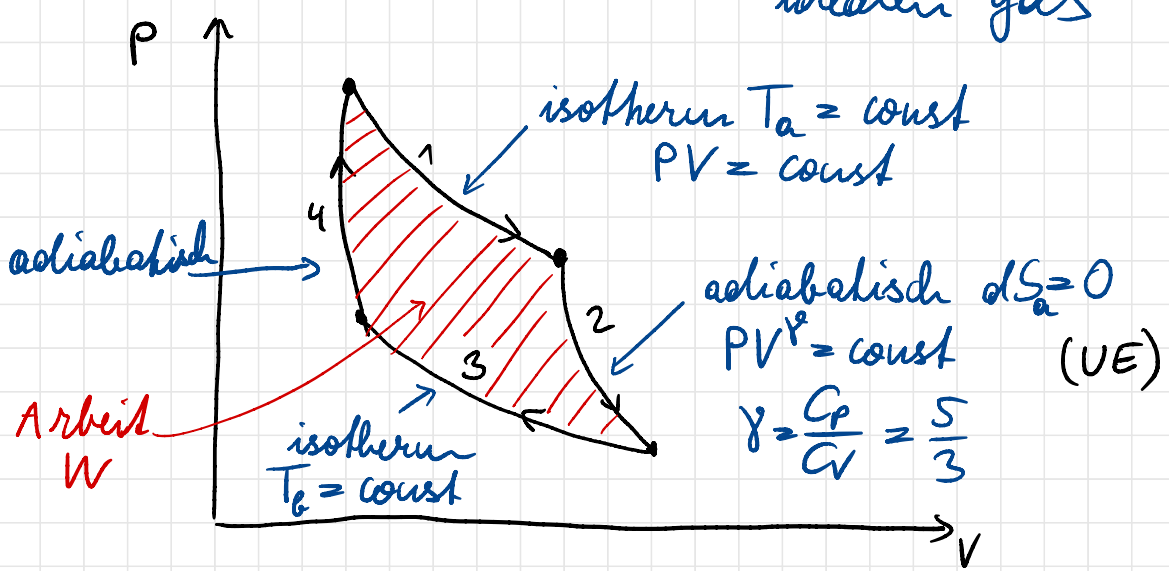
$$\eta = \frac{\text{erzeugte Arbeit}}{\text{zugeführten Wärme}} = \frac{W}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{q_2}{q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

ideale Wärmekraftmaschine

$$\boxed{\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_2}{T_2}}$$

bsp.: Carnot-Prozess „M": Volumen mit idealem Gas



1 und 3: isotherm $T = \text{const}$

$\Rightarrow$ Kontakt mit Wärmebad mit

T_a bzw. T_b $\Rightarrow$ Wärmeübertrag $q_a, -q_b$

2: adiabat. Expansion: $T_b < T_a$ (vo q_a)

$$\Delta S_{gas} = \frac{q_a}{T_a} - \frac{q_b}{T_b} = 0 \qquad (1 \text{ Zyklus})$$

$$\Delta E_{gas} = 0 \Rightarrow W = q_a - q_b = \oint p\,dV$$

↑ Fläche im P-V-Diagr

$$\eta_{carnot} = \frac{W}{q_a} = \frac{T_a - T_b}{T_a} = \eta_{ideal}$$

Gesamtentropieänderung:

$$\Delta S = \underbrace{\Delta S_{R_1}}_{-\frac{q_a}{T_a}} + \underbrace{\Delta S_{R_2}}_{\frac{q_b}{T_b}} + \underbrace{\Delta S_{gas}}_{=0} + \underbrace{\Delta S_S}_{=0} = 0$$

↑

$\Delta S \geq 0$ 2. HS

$\Delta S = 0 \Leftrightarrow$ reversibel

•) Bsp.: Kohlekraftwerk $T_1 \approx 540°C$

Kühlturm: $T_2 \approx 40°C$

$$\eta_{ideal} = \frac{813\,K - 313\,K}{813\,K} \approx 62\%$$

reale Gasturbinen $\eta \approx 45\%$

η wird maximal für T_1 groß, T_2 klein

↓

begrenzt d. Umgebungstemperatur

–) Kraftwärmekopplung: nütze q_2 zum Heizen

–) η_{ideal}: alle Prozesse quasistatisch ($\Delta S = 0$)

↙

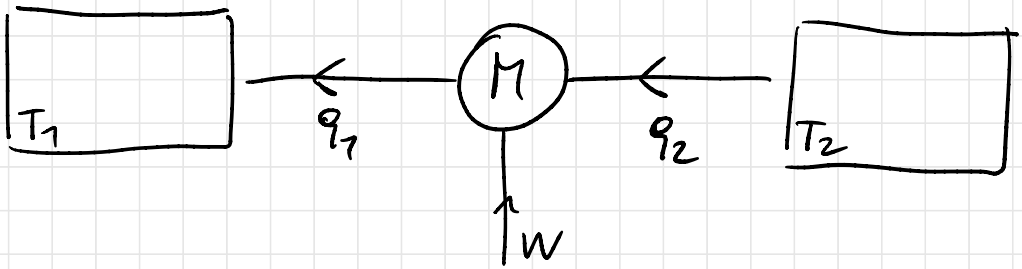
„unendlich langsam"

in Realität sd. Prozesse nie vollst. quasistat., immer irreversibel:

$\Delta S > 0$, $\eta < \eta_{ideal}$

Wärmepumpe:

$T_1 > T_2$



1. HS: $q_2 + W = q_1$

2. HS: $\Delta S = \frac{q_1}{T_1} - \frac{q_2}{T_2} \geq 0 \qquad \frac{q_1}{q_2} \geq \frac{T_1}{T_2}$

$$\eta = \frac{q_1}{W} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{1}{1 - \frac{q_2}{q_1}}$$

→ Heizleistung

↑ aufgewendete Arbeit

$$\eta \leq \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Bsp.: Heizung $T_1 \approx 40°C$
Außentemperatur $T_2 \approx 0°C$

→ $\eta_{ideal} \approx 7{,}8$, real: $\eta \approx 3-4$

Kühlschrank

$$\gamma = \frac{q_2}{w} \leq \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Bsp.: $T_1 \approx 25°C$, $T_2 \approx 5°C$

$\gamma_{ideal} \approx 14$

Bem.: $\gamma \to 0$ für $T_2 \to 0$

→ „unendl. viel" Arbeit um $T = 0$ zu erreichen