

iii): Wärmeaufnahme der RWQ:

$$\Delta Q_{RWQ} \stackrel{(5.7)}{=} \Delta U_{RWQ} = \int_{\Delta S_{RWQ}} T_{RWQ} dS_{RWQ} \quad (5.12)$$

$$\rightarrow \boxed{\Delta Q_{RWQ}^{rev} < \Delta Q_{RWQ}^{irr}} \quad (5.13)$$

iv) Arbeitsaufnahme der RAQ

$$(5.10) \rightarrow \Delta W_{RAQ} = -\Delta U_{AB}^{TS} - \Delta Q_{RWQ}$$

$$\stackrel{(5.13)}{\rightarrow} \boxed{\Delta W_{RAQ}^{rev} > \Delta W_{RAQ}^{irr}} \quad (5.14)$$

→ Theorem maximaler Arbeit

Von allen Prozessen $A \rightarrow B$ ist der Arbeitsübertrag auf die RAQ maximal (und der Wärmefluss in die RWQ minimal) bei reversiblen Ablauf

= Optimierung der mech. Energieausbeute durch Minimierung der Wärmeverluste

Bemerkungen

(i) ΔW_{RAQ}^{rev} , ΔQ_{RWQ}^{rev} sind unabh. vom konkreten

Prozess

→ idealisierte, reversible Prozesse liefern Schranke für reale Prozesse

(ii) $\Delta S > 0 \hat{=}$ Teil der mögl. Arbeit ($\Delta W_{RAQ}^{rev} - \Delta W_{RAQ}^{irr}$) wird in Wärme dissipiert ($\Delta Q_{RWQ}^{irr} - \Delta Q_{RWQ}^{rev}$)
 $\hat{=}$ dissipative Prozesse im Gesamtsystem (Reibung)

(iii) Wärmepumpe: $\Delta Q_{RWQ} < 0$, $\Delta W_{RAQ} < 0$

$$\begin{aligned} (5.13) &\rightarrow \boxed{-\Delta Q_{RWQ}^{rev} > -\Delta Q_{RWQ}^{irr}} \\ (5.14) &\rightarrow \boxed{-\Delta W_{RAQ}^{rev} < -\Delta W_{RAQ}^{irr}} \end{aligned} \quad (5.15)$$

maximale Wärmeaufnahme aus RWQ bei minimaler Arbeit von RAQ bei reversiblen Ablauf

b) Spezialfall: 2 HS der TD

- Wärmefluss von RWQ \rightarrow TS ($\Delta Q_{RWQ} < 0$), keine RAQ
- reversibler Ablauf:

$$\Delta S^{TS} = \int dS^{TS} = - \int dS^{RWQ} = - \int \frac{dQ_{RWQ}}{T} = \int \frac{dQ_{rev}^{TS}}{T}$$

$$\rightarrow \boxed{dS = \frac{dQ_{rev}}{T}} \quad (5.16)$$

1. Teil des 2. HS der TD

- Irreversibler Ablauf

$$\begin{aligned} \Delta S^{TS} &= - \int dS^{RWQ} + \Delta S = - \int \frac{dQ_{RWQ}}{T_{RWQ}} + \Delta S \\ &= \int \frac{dQ_{irr}^{TS}}{T_{RWQ}} + \Delta S > \int \frac{dQ_{irr}^{TS}}{T_{RWQ}} \\ T_{RWQ} &\neq T^{TS} !! \end{aligned}$$

$$\rightarrow \boxed{dS > \frac{dQ_{irr}}{T}} \quad (5.17)$$

Umgebungstemperatur

2. Teil des 2. HS der TD

- Grundrelation der TD: (5.16) & (5.17) & $dQ = dU - dW_m - dW_k$

$$\rightarrow \boxed{T dS \geq dU - dW_m - dW_k} \quad (5.18)$$

5.4 Wirkungsgrade von Maschinen

- System: TS \rightarrow RWQ: heißes System T_h , $dW_h = 0$
RWQ: kaltes System T_k (keine Arbeit!)
RAQ
- Bilanzen: 1. HS: $dQ_h + dQ_k + dW_{RAQ} = 0$ (5.19)
rev. Abl. \rightarrow 2. HS: $dS_h + dS_k = 0 \Leftrightarrow \frac{dQ_h}{T_h} + \frac{dQ_k}{T_k} = 0$ (5.20)

a) Thermodynamische Maschine

- Prinzip: s. Bild

• Maschinenwirkungsgrad

(5.20) $\rightarrow dQ_k = \frac{T_k}{T_h} (-dQ_h)$ (5.19) $\rightarrow dW^{RAQ} = \left(1 - \frac{T_k}{T_h}\right) (-dQ_h)$

$\rightarrow \eta_w = \frac{dW^{RAQ}}{-dQ_h} = 1 - \frac{T_k}{T_h} = \frac{T_h - T_k}{T_h}$ (5.21)

... universell

Bemerkung

(i) $T_h \uparrow, T_k \downarrow \rightarrow \eta \uparrow$

(ii) $\eta_w = 1$ für $T_k = 0 \rightarrow dW^{RAQ} = -dQ_h !!$

\rightarrow Je kleiner T_k , desto weniger Wärme wird zur Entropiekompensation benötigt.

(iii) $T_h = T_k \rightarrow \eta_w = 0$

\rightarrow 2.HS (Formulierung nach Lord Kelvin)

Ein Prozess, dessen einziges Resultat ist, dass Wärme aus einer Wärmequelle in Arbeit umgewandelt wird ist nicht möglich

$\hat{=}$ Es gibt kein Perpetuum-mobile 2. Art

* irreversibler Ablauf:

(5.14) $\Delta W_{rev}^{RAQ} > \Delta W_{irr}^{RAQ} \rightarrow \eta_w^{rev} > \eta_w^{irr}$ (5.23)

b) Kühlschrank

- Prinzip-s. Bild, Umkehrung der TD-Maschine
- idealer Ablauf: $-dQ_k$ maximal und $-dW^{RAQ}$ minimal

\rightarrow Koeffizient der Kühlleistung

(5.19) & (5.20) \rightarrow

$\eta_k = \frac{-dQ_k}{-dW^{RAQ}} = \frac{T_k}{T_h - T_k}$ (5.24)

Bemerkungen: (i) $\eta_k \uparrow \hat{=}$ wirtschaftl. arbeitend

(ii) $T_h \approx T_k \hat{=} \eta_k \rightarrow \infty \hat{=} \text{keine K\u00fchllastung}$
 n\u00f6tig

(iii) $T_k \rightarrow 0 \hat{=} \eta_k = 0 \hat{=} T_k = 0$ wird nicht
 erreicht

($\Delta W^{RAQ} \rightarrow \infty$)
 $\hat{=} 3. \text{HS. der TD (eine Formulierang)}$

• irreversibler Ablauf:

(5.14): $(-\Delta W_{\text{rev}}^{RAQ})^{-1} > (-\Delta W_{\text{irr}}^{RAQ})^{-1}$
 $\rightarrow \boxed{\eta_{\text{rev}}^{RAQ} > \eta_{\text{irr}}^{RAQ}} \quad (5.25)$

c) W\u00e4rmepumpe

• Prinzip: s. Bild, wie K\u00fchlschraube, aber kaltes System
 wird k\u00fchlt

• ideal: dQ_h maximal und $-dW^{RAQ}$ minimal
 \rightarrow Warmeleistungskoeffizient

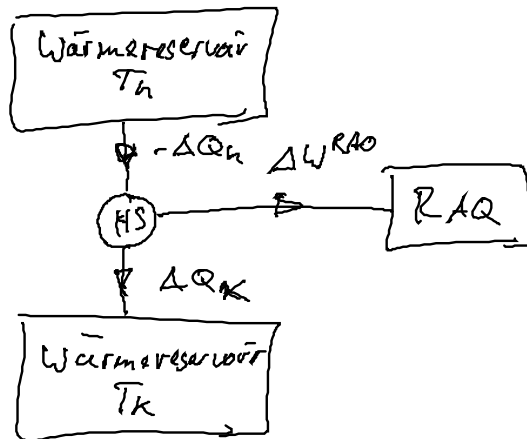
(5.19) & (5.20) $\boxed{\eta_p = \frac{dQ_h}{-dW^{RAQ}} = \frac{T_h}{T_h - T_k}} \quad (5.26)$

• irreversibler Ablauf

$\boxed{\eta_p^{\text{rev}} > \eta_p^{\text{irr}}}$

5.5 Der Carnot-Zyklus

- Realisierung von TD-Maschinen erfordert Hilfsystem HS:

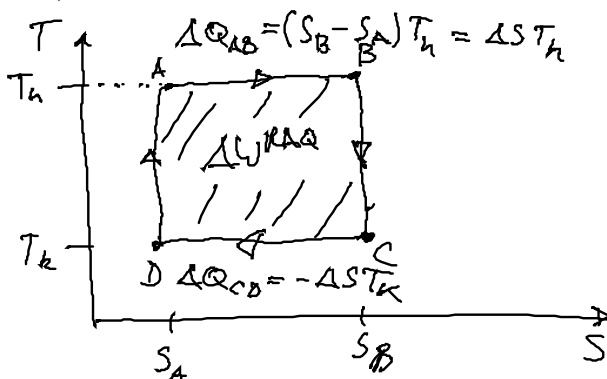


Aufgabe des HS: reversible Verteilung von $-\Delta Q_h$ auf ΔW_{RAQ} und ΔQ_k

Anforderung: keine Nettoveränderung in HS

→ Kreisprozess: Bsp. Carnot-Zyklus (1796-1832)

- Indikatordiagramm für HS



AB ... isotherme Expansion
 BC ... isentrope Exp.
 CD ... isotherme Kompression
 DA ... isentrope Kompression

Wirkungsgrad:

$$1. HS: \Delta W_{RAQ} = \Delta Q_{AB} + \Delta Q_{CD} = \Delta S (T_h - T_k) = \boxed{\text{shaded area}} \quad (5.28)$$

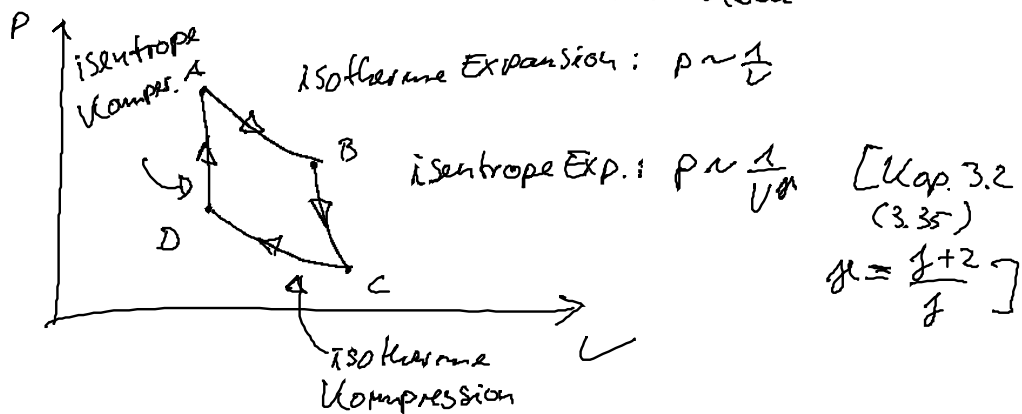
$$\rightarrow \eta_w = \frac{\Delta W_{RAQ}}{\Delta Q_{AB}} = \frac{T_h - T_k}{T_h} \quad (5.29)$$

Bem:

$$\eta_w^{Real} \approx 0.3 - 0.4 \eta_w$$

Grund (1) Reibung
 (2) Abweichungen

- "Realisierung": ideales Gas im Kolben von quasi-stationär



- Historisches:

Clausius erkannte für ideale Kreisprozesse:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$\rightarrow dS = \frac{dQ}{T}$... totales Differential einer neuen Zustandsfunktion: Entropie

- Messung von T.S:

(i) Messung ΔW^{RAQ} , $\Delta Q_{AB} \rightarrow \frac{T_A}{T_B}$
 & Festlegung von Referenzpunkt \rightarrow abs. Kelvinstaka
 durch: Tripelpt. H_2O bei $T = 273,16 K$
 $[0^\circ C = 273,16 K]$

(ii) Messung von $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ } \rightarrow S Messung
 Ref. pkt. $S=0$ bei $T=0$