

Thermodynamische Prozesse

thermodynamischer Prozess = quasistationäre Änderung des Gleichgewichtszustandes eines Systems durch Änderung makroskopischer Parameter und Wärmeaustausch.

wir betrachten exemplarisch Prozesse an einem homogenen Medium (Gas / Flüssigkeit / Festkörper) :

Zustandsgrößen: Energie E , Volumen V , Teilchenzahl N

→ abgeleitete Zustandsgrößen (z.B. mittels phänomenologischer Zustandsgleichungen oder Stat. Physik) z.B.

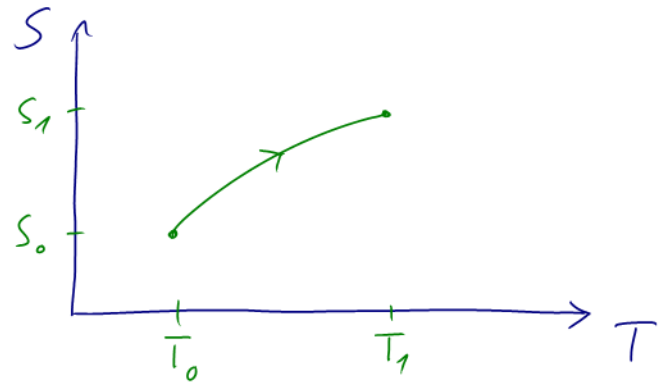
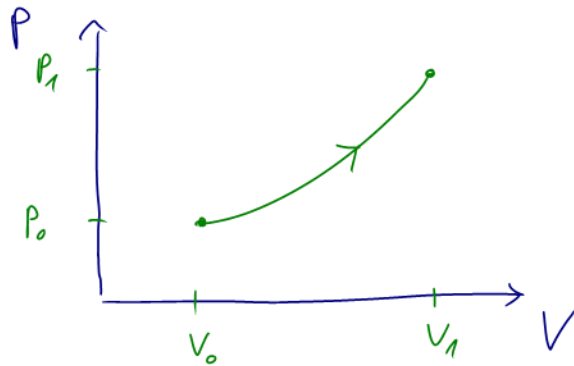
Entropie $S(E, V, N)$, Temperatur T , Druck P , ...

i. d. R. sind je 3 Zustandsgrößen hinreichend zur Beschreibung des th.-dyn. Gleichgewichts des Mediums:

oft zweckmäßig: (i) P, V, N

(ii) S, T, N

→ thermodynamischer Prozess bei konstanter Teilchenzahl N kann als Kurve im P - V oder S - T dargestellt werden:



beachte: thermodynamische Prozesse sind (hier!) immer quasistationär und damit reversibel!

Bezeichnungen:

Prozess bei konstanter /m Druck : isobar

Temperatur : isotherm

Volumen : isochor

Entropie : isentrop

Prozess ohne Wärmeaustausch : adiabatisch

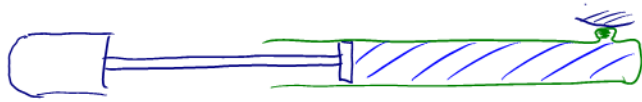
↺
↑
(sofern Prozess
quasistationär)

Beispiele :

- adiabatische Kompression
- Carnot-Prozess



Adiabatische kompression: z.B. mittels Luftpumpe



$$p_0 = 1 \text{ bar}$$

$$V_0 = 0.1 \text{ l}$$

$$T_0 = 300 \text{ K}$$

$$\rightarrow \delta Q = 0$$



$$p_1 = 10 \text{ bar} !$$

$$V_1 = ?$$

$$T_1 = ?$$

1) $\delta Q = 0 \rightarrow$ Entropie S konstant

2) Luft $\approx$ ideales Gas: • Zustandsgleichungen

$$E = \frac{3}{2} N k T$$

$$pV = N k T$$

$$\bullet S(E, V) = k N \ln(V E^{3/2}) + \alpha$$

Zustandsgleichungen: $E(p, V) = \frac{3}{2} p V$

$$\begin{aligned} \rightarrow S(p, V) &:= S(E(p, V), V) = kN \ln \left(V \left(\frac{3}{2} p V \right)^{\frac{3}{2}} \right) + c \\ &= kN \ln \left(\underline{\underline{V^{\frac{5}{3}} p}} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{3}{2} kN \ln \frac{3}{2} + c = \underline{\underline{\text{konst}}} \end{aligned}$$

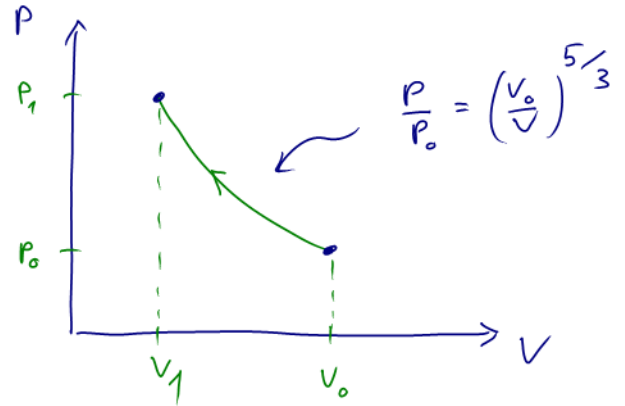
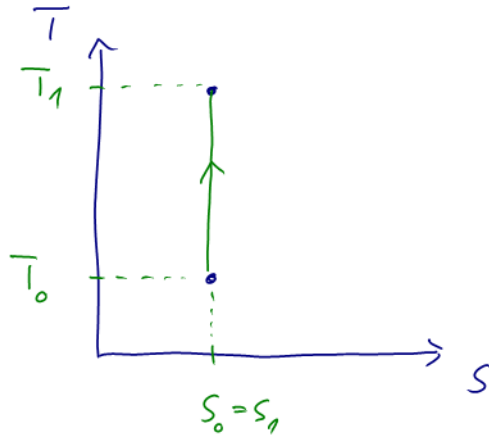
$$\begin{aligned} \rightarrow \underbrace{V_1^{\frac{5}{3}} p_1}_{\text{konst}} &= V_0^{\frac{5}{3}} p_0 \quad ; \quad \text{d.h.} \quad V_1 = V_0 \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{3}{5}} = V_0 \left(\frac{1}{10} \right)^{0.6} \\ &\approx \frac{V_0}{4.0} = 0.025 L \end{aligned}$$

$\frac{V_1}{V_0} = \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{3}{5}}$

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} N k T_0 &= p_0 V_0 \\ N k T_1 &= p_1 V_1 \end{aligned} \right\} \rightarrow T_1 &= T_0 \frac{p_1 V_1}{p_0 V_0} = T_0 \frac{p_1}{p_0} \cdot \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{-\frac{3}{5}} = T_0 \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{5}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{d.h. } T_1 &= T_0 \cdot 10^{0.4} = 2,5 \cdot 300 \text{ K} = \underline{\underline{750 \text{ K}}} \\ &(\hat{=} \underline{\underline{477^\circ \text{C}}}) \end{aligned}$$

adiabatische Kompression im T-S- und p-V-Diagramm:



Carnot-Prozess

↳ Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832):

Wie effizient ist die beste Dampfmaschine der Welt?

→ Thermodynamik!

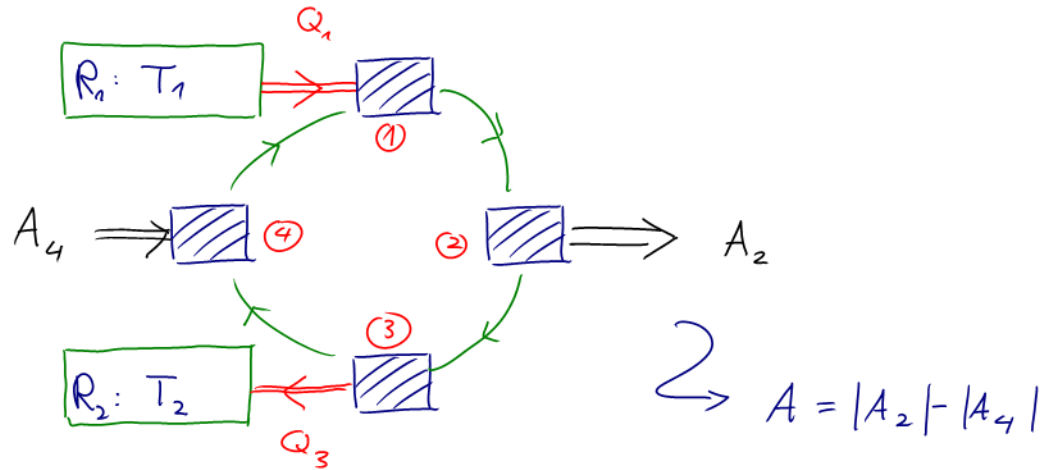
Carnot-Prozess

Carnot-Wirkungsgrad



Carnots Problem: finde optimalen kreisprozess eines Mediums zwecks Umwandlung von Wärme in Arbeit unter Verwendung zweier Wärmereservoirs der Temperaturen T_1 und $T_2 < T_1$.

Schematisch:



maximiere Wirkungsgrad

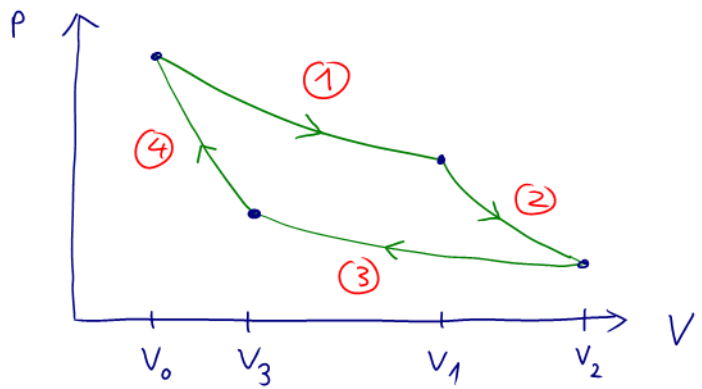
$$\eta := \frac{A}{|Q_1|} = \frac{\text{geleistete Arbeit}}{\text{eingesetzte Wärme}}$$

Carnots Lösung:

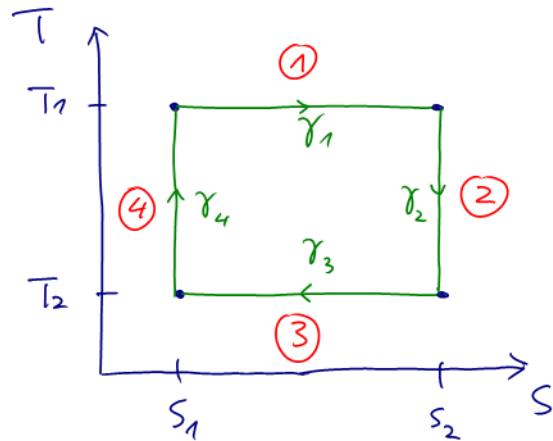
- ① isotherme Expansion des Mediums bei Temperatur T_1 unter Aufnahme von Wärme Q_1 aus R_1
- ② adiabatische Expansion des Mediums unter Verrichtung von Arbeit A_2 von Vol. V_1 auf V_2 bis $T = T_2$
- ③ isotherme Kompression des Mediums bei Temp. T_2 unter Abgabe an Wärme Q_2 in R_2
- ④ adiabatische Kompression des Mediums von V_3 auf V_0 und $T = T_1$ unter Aufnahme von Arbeit A_3

Bem: ① und ② dienen der Abgabe von Arbeit,
③ und ④ zwecks Rückführung in den Ausgangszustand.

im p-V-Diagramm:
(kompliziert!)



einfacher im T-S-Diagramm:



$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4$$

→ Bilanz: $0 \stackrel{!}{=} \int_{\gamma} dE = \underbrace{\int_{\gamma} T ds}_{Q_{\text{ges}}} - \underbrace{\int_{\gamma} p dV}_A$

d.h. $A = Q_{\text{ges}} = \int_{\gamma} T ds = (T_1 - T_2) \cdot (s_2 - s_1)$

$Q_1 = \int_{\gamma_1} T ds = T_1 \cdot (s_2 - s_1)$



Wirkungsgrad des Carnot-Prozess:

$$\eta_c = \frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

nächste Vorlesung: Kreisprozess ($\hat{=}$ Wärmekraftmaschine)

mit $\eta > \eta_c$ würde den 2. Hauptsatz verletzen und kann es daher nicht geben!

┌ Dampfmachine: $T_1 \approx 120^\circ\text{C} \hat{=} 393\text{K}$
 $T_2 \approx 20^\circ\text{C} \hat{=} 293\text{K}$ $\rightarrow \eta_c = 0,25$ (theoretisch!)

Gaskraftwerk: $T_1 \approx 600^\circ\text{C} \hat{=} 873\text{K}$
 $T_2 \approx 20^\circ\text{C} \hat{=} 293\text{K}$ $\rightarrow \eta_c = 0,66$ (theoretisch!)
real: $\eta \approx 0,50$! ┘