Letzte Stunde

- Isobare Zustandsänderungen (konst. Druck)
  - Enthalpie $H=U+p\,V$

- Adiabatische Zustandsänderungen
  - kein Wärmeaustausch mit der Umgebung (dQ=0)
  - bei guter Isolation oder sehr schneller Prozessführung
  - Temperaturänderungen bei Kompression/Expansion
  - $p\,V^{\varkappa}$ = const. mit Adiabatenexponent $\varkappa=c_p/c_v$

Heute

- 14. Wärmekraftmaschinen

http://www.ep1.rub.de/lehre/veranstaltungen/ws0910/physikcbg/

Dampflokomotive (Baujahr 1918) in Bochum-Dahlhausen

Kraft-Wärmekopplung mit Stirling-Motor (2009)

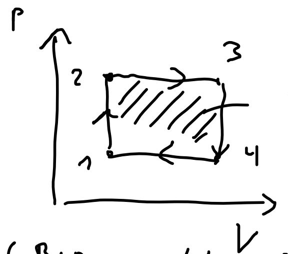
14. Wärmekraftmaschinen und 2. Hauptsatz, Entropie

Technische Anwendungen der Zustandsänderungen

- Wärmekraftmaschinen
- Kältemaschinen / Wärmepumpe

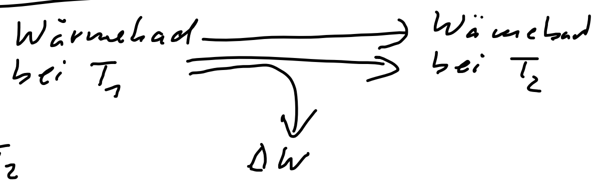
Arbeiten zyklisch

- am Ende vom Zyklus gleicher Zustand
  p, V, T
- wenn nicht: überhitzen
  explodieren
  bleibt stehen



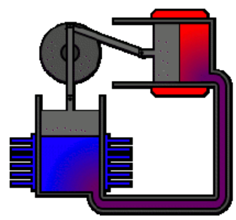
zur Verfügung stehende Arbeit

(Bsp. nicht möglich)

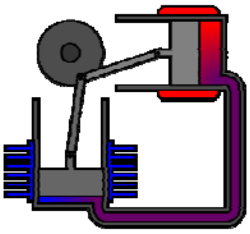


$T_1 > T_2$

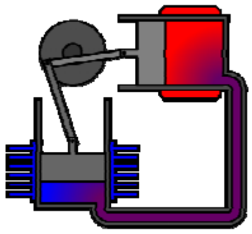
14.1. Kreisprozess: Heißluftmotor/Stirling-Motor



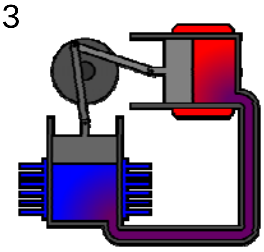
1



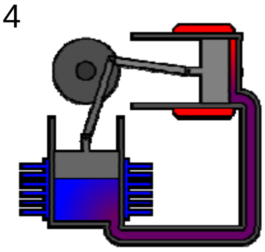
2



3



4



1 -> 2 Gasexpansion bei Heiß und Radbeschleunigung

2 -> 3 Gastransfer von Heiß zu Kalt

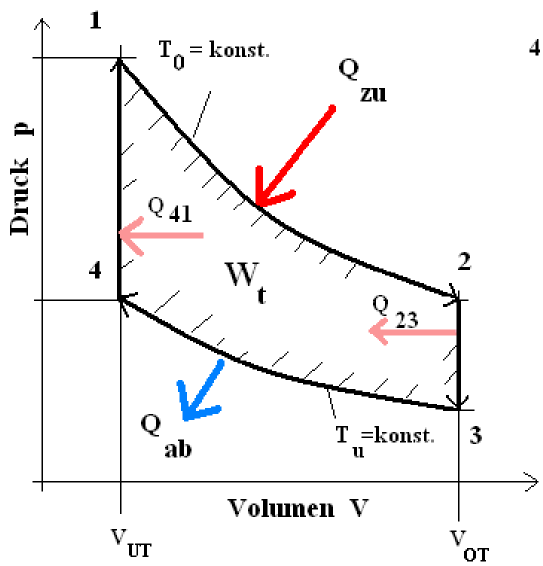
3,4 -> 1 Gasverdichtung und Transfer zu Heiß
(kleine negative Radbeschleunigung)

Nach einem Zyklus: Rad beschleunigt, Gas im Ausgangzustand

Bilder: http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
Robert Stirling (1790 – 1878)

Wärmekraftmaschine: Stirlingmotor

Stirling - Prozess



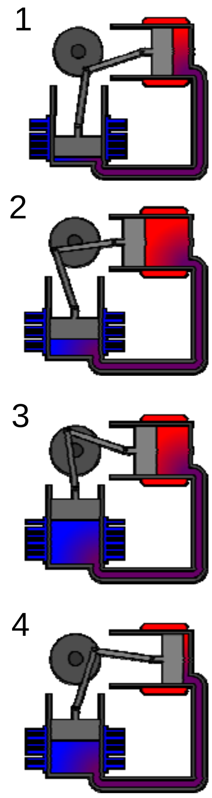
1 - 2	Isotherme Expansion	Bild 1
2 - 3	Isochore Wärmeabfuhr	Bild 2
3 - 4	Isotherme Kompresion	Bild 3
4 - 1	Isochore Wärmezufuhr	Bild 4

Abgegebene technische Arbeit:

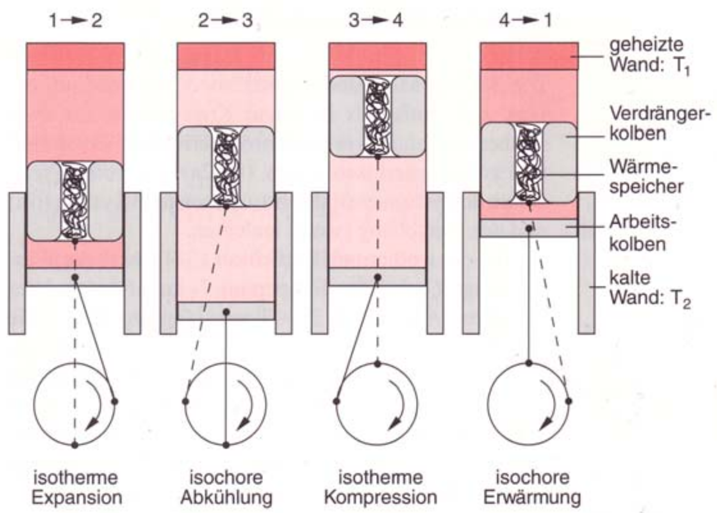
$$W_t = Q_{zu} - |Q|_{ab}$$

Innerer Wärmeaustausch mit dem Verdrängerkolben (Regenerator):

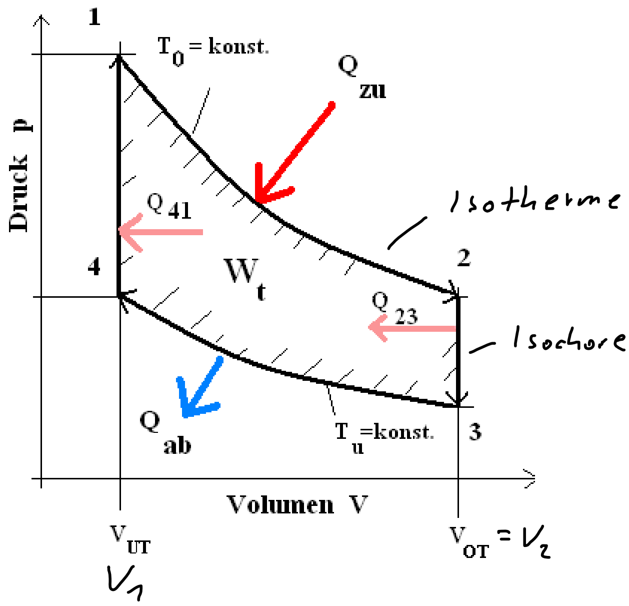
$$\underline{Q_{41}} = |Q|\underline{_{23}}$$



Stirlingmotor mit Regenerator



Regenerator könnte bei (T1+T2)/2 arbeiten und eine hohe Wärmekapazität besitzen. Bei der isochoren Abkühlung wird der Regenerator mit Wärmeenergie versorgt. Mit dieser Energie kann sich der Regenerator und des heiße Wärmebad den Aufwand für die Gaserwärmung bei der isochoren Erwärmung teilen.
Das heiße Wärmebad muss weniger Energie abgeben als ohne Regenerator.
Damit steigt der Wirkungsgrad des Stirling-Motors.



Stirling-Motor

1-2 Isotherme Expansion

$$Q_{zu} = -W_{12} = nRT_0 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

2-3 Isochore Abkühlung

$$\Delta U = \Delta Q$$

$$Q_{23} = n\, c_V\, (T_u - T_0)$$

3-4 Isotherme Kompression

$$Q_{ab} = -W_{34} = nRT_u \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$$

4-1 Isochore Erwärmung

$$Q_{41} = n\, c_V\, (T_0 - T_u)$$

Energiebilanz

$$Q_{23} + Q_{41} = 0$$

$$W_T = W_{12} + W_{34}$$

$$-W_T = Q_{zu} + Q_{ab}$$

$$-W_T = Q_{zu} + Q_{ab}$$

$$= nRT_0 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} + nRT_u \cdot \ln \underbrace{\frac{V_1}{V_2}}_{-\ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$-W_T = nR\left(T_0 - T_u\right) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Versuch

$$n = \frac{0{,}14\,\ell}{22{,}4\,\ell} \cdot \text{mol}$$ → Zylindervolumen

$$R = 8{,}3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \qquad \frac{V_2}{V_1} = \frac{2}{1}$$

Wirkungsgrad

$$\boxed{\eta = \frac{|W|}{Q_{zu}}} = \frac{nR(T_0 - T_u) \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}}{nRT_0 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} = \boxed{\frac{T_0 - T_u}{T_0}}$$

14.2. Kreisprozess von Carnot

idealer Kreisprozess

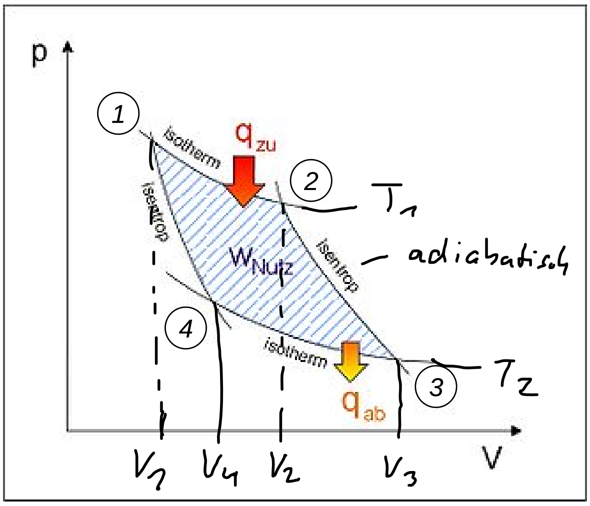
Wie kann man den maximalen Wirkungsgrad erhalten?

– Wärmeverluste minimieren

adiabatisch verdichten / expandieren

$dQ = 0$

– vollständig umkehrbarer Prozess /reversibel/



Carnotscher Kreisprozess

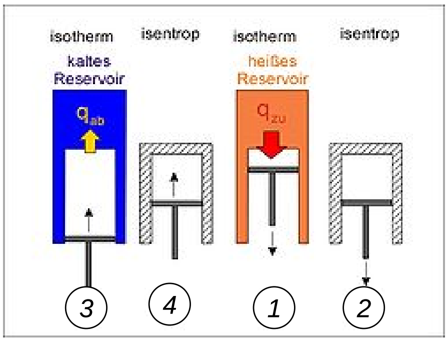
1-2 Isotherm Wärme Q_{12}

→ Ausdehnung ⇒ Arbeit

$$-W_{12} = Q_{12} = n \cdot R\, T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

2-3 Adiabatisch

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\chi - 1}$$



3-4 Isotherme Kompression

$$+W_{34} = -Q_{34} = n R\, T_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}$$

4-1 adiabatisch

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\chi - 1}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$-W_{23} = c_V \cdot m\,(T_1 - T_2) = W_{41} \qquad (q_{\text{Summe}} = 0)$$

Gesamtarbeit

$$-W = -W_{12} - W_{34} = n\,R\left(T_1 \cdot \ln\frac{V_2}{V_1} - T_2 \cdot \ln\frac{V_3}{V_4}\right)$$

$$-W = n\,R\,(T_1 - T_2) \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}$$

Wirkungsgrad $\eta = \dfrac{\text{in Arbeit umgewandelte Wärmemenge}}{\text{zugeführte Wärmemenge}}$

$$\eta = \frac{|W|}{Q} = \frac{n\,R\,(T_1 - T_2) \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}}{n\,R\,T_1 \cdot \ln\frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

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

$T_1 > T_2$ in Kelvin!

T_2 minimal

T_1 maximal

Bsp. Dampfmaschine James Watt 1769

$T_1 = 110\,°C \qquad T_2 = 55\,°C$

$$\eta = 1 - \frac{(55+273)\,K}{(110+273)\,K} = 0{,}14$$

$\rightarrow$ weitere Verluste

effekt. Wirkungsgrad $\simeq 7\,\%$

Dampfturbine

$T_1 = 480\,°C \qquad T_2 = 80\,°C$

$\Rightarrow \quad \eta \approx 50\,\%$

aber effektiv auch nur $\simeq 20\,\%$

Zusammenfassung

- Carnot-Wärmekraftmaschine
  - Kreisprozess, reversibel arbeitend zwischen zwei Wärmereservoiren
    - Isotherme Aufnahme von Wärme mit Temperatur T_1
    - Adiabatische Expansion
    - Isotherme Abgabe von Wärme bei der Temperatur $T_2<T_1$
    - Adiabatische Kompression
- Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine
  - Wirkungsgrad $\eta=|W|/Q$
    - verrichtete Arbeit W / aufgenommene Wärme Q
    - Maximal möglicher Wirkungsgrad (erreicht im Carnot-Prozess)

      $\boldsymbol{\eta=(T_1-T_2)/T_1}$ $\quad$ $(T_2<T_1)$ $\quad$ T in Kelvin!