



# Thermodynamik I – Übung 6

Folien von Dominic Landolf, angepasst durch Pascal Hodel

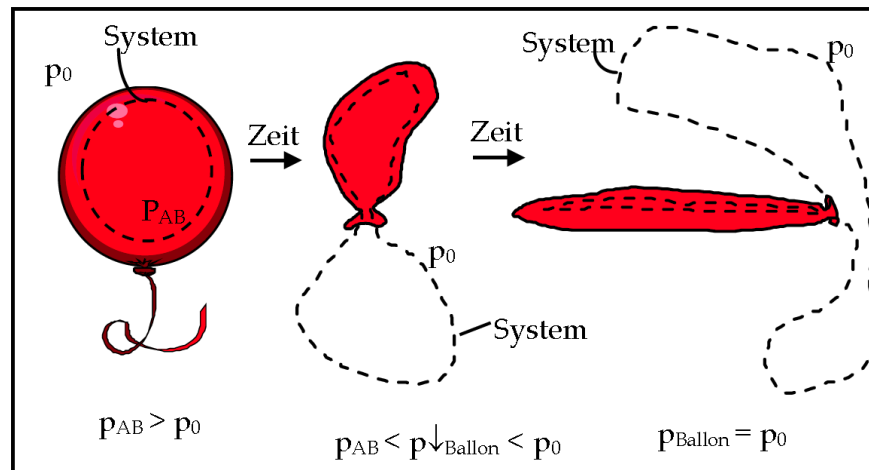
# Ablauf

- Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik
- Reversible vs. Irreversible Prozesse
- Kreisprozess nach Carnot
  - Thermischer Wirkungsgrad
  - Schlussfolgerungen
- Entropie
  - Ideale Gase

# Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

- Prozesse laufen **spontan** nur in eine vorgegebene Richtung ab

- Beispiel:



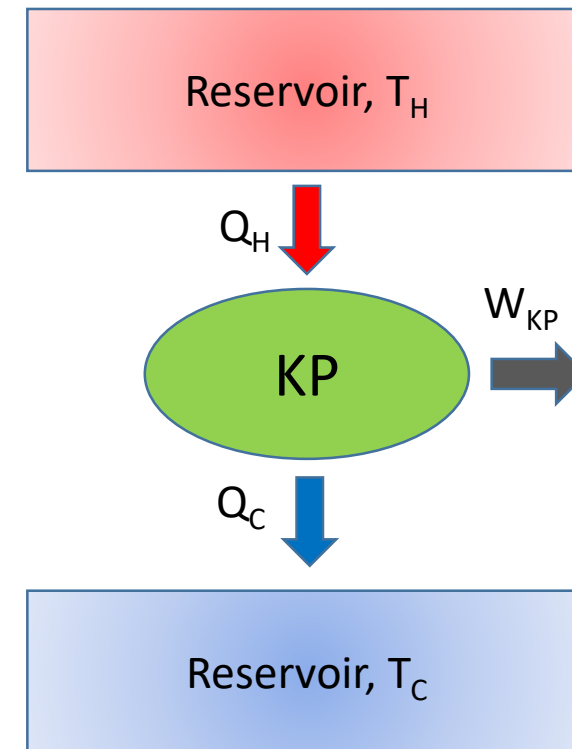
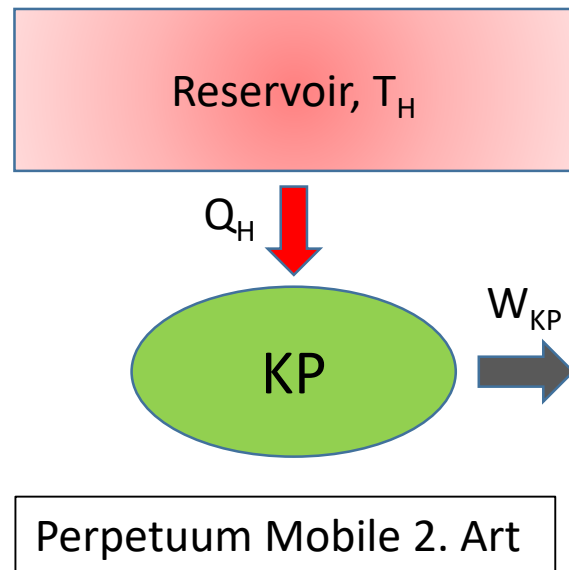
- Der zweite Hauptsatz erlaubt uns eine Aussage über folgende 2 Dinge zu machen:
  - Richtung, in welche Prozess ablaufen wird
  - Anteil der vorhandenen Energie, die in Arbeit umgewandelt werden kann

# Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

- 2 Formulierungen für den zweiten Hauptsatz:
  - **Formulierung nach Clausius:**  
*Wärme kann nicht von selbst (spontan) von einem Körper mit tieferer Temperatur auf einen Körper mit höheren Temperatur übertragen werden.*
  - **Formulierung nach Kelvin-Planck:**  
*Ein Kreisprozess kann zugeführte Wärme nicht zu 100% in Arbeit umwandeln.  
Es gibt immer Abwärme.*

# Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

- Erklärung zur Formulierung nach Kelvin-Planck:



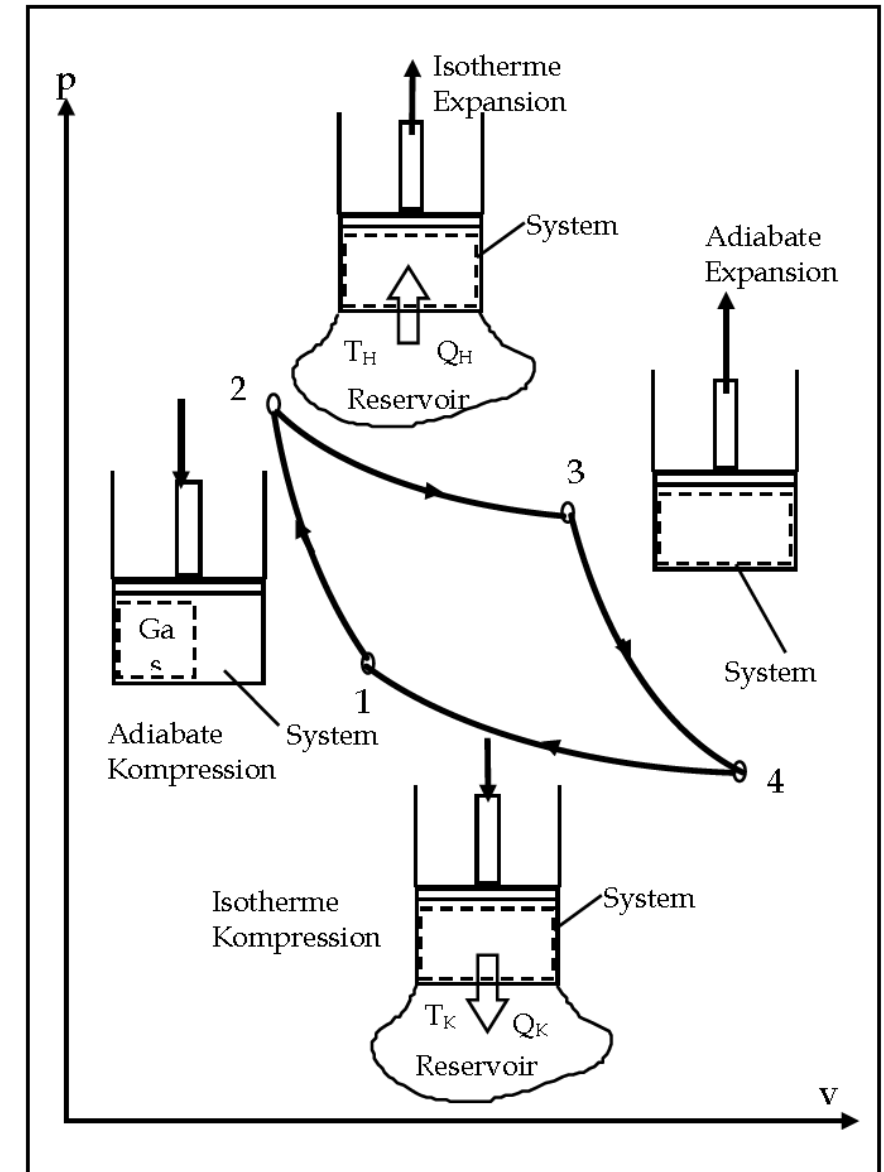
- 1. Hauptsatz würde bei linker Situation verlangen, dass gesamte Wärme  $Q_H$  zu Arbeit  $W_{KP}$  umgewandelt wird
- 2. Hauptsatz sagt nun aber, dass dies unmöglich ist, da jeder KP ein zweites Reservoir auf tieferer Temperatur braucht, an das Abwärme abgegeben werden kann

# Reversible vs. Irreversible Prozesse

- Prozess ist **reversibel** resp. **umkehrbar** wenn Ausgangszustand im System und allen Teilen der Umgebung wieder hergestellt werden kann.
- Bei einem reversiblen Prozess wird genau die abgeführte und verlustlos gespeicherte Energie benötigt um das System wieder in den Ausgangszustand zurückzuführen.
- Reale Prozesse sind immer irreversibel

# Kreisprozess nach Carnot

- Der Carnotprozess beschreibt einen idealisierten Kreisprozess, welcher aus 4 **reversiblen** Teilprozessen besteht:
  - 1→2: Adiabate Kompression ( $T_C \rightarrow T_H$ )
  - 2→3: Isotherme Expansion (Wärme  $Q_H$  aus Reservoir  $T_H$  bezogen)
  - 3→4: Adiabate Expansion ( $T_H \rightarrow T_C$ )
  - 4→1: Isotherme Kompression (Wärme  $Q_C$  an Reservoir  $T_C$  abgegeben)
- Für die Temperaturen gilt also:
  - $T_1 = T_4 = T_C$
  - $T_2 = T_3 = T_H$



# Kreisprozess nach Carnot

- **Wärme-Kraft-Maschine:**

Wird der Carnot Prozess im **Uhrzeigersinn** betrieben, leistet er Arbeit. D.h. Wärme wird aus heissem Reservoir bezogen und zu einem gewissen Teil in Arbeit umgewandelt. Rest wird als Abwärme ans kalte Reservoir abgegeben.

- **Wärmepumpe / Kältemaschine:**

Beim Durchgang im **Gegenuhrzeigersinn** muss Arbeit hineingesteckt werden um Wärme aus dem kalten Reservoir auf höheres Temperaturniveau ins warme Reservoir zu verschieben



# Kreisprozess nach Carnot – Thermischer Wirkungsgrad

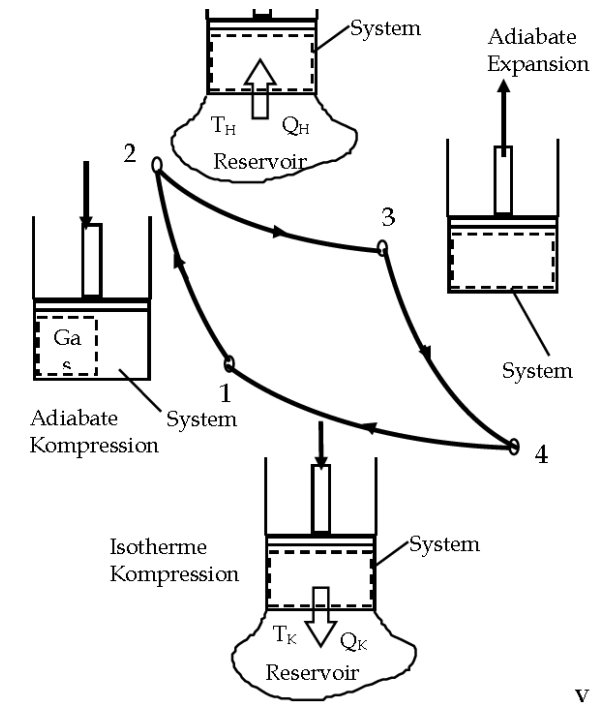
- Der thermische Wirkungsgrad für einen Kreisprozess gibt das Verhältnis zwischen geleisteter Arbeit und zugeführter Wärme wider:

$$\eta_{th} = \frac{W_{KP}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}}$$

- Laut 1. Hauptsatz gilt lediglich  $\eta_{th} \leq 1$  (für  $Q_{ab}=0$ )
- Da nun aber laut 2. Hauptsatz  $Q_{ab} \neq 0$  gilt für den thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th} < 1$
- Der Wirkungsgrad macht also eine Aussage darüber, wieviel Wärme in Arbeit umgewandelt wird

# Kreisprozess nach Carnot – Thermischer Wirkungsgrad

- In einem Carnot Prozess gilt:
  - $Q_{23} = Q_{zu} = Q_H$  bzw.  $Q_{41} = Q_{ab} = Q_C$
  - $\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H}$  (Beweis Kap. 6.6)



- Damit folgt für den thermischen Wirkungsgrad von einem Carnot Prozess:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

# Kreisprozess nach Carnot – Schlussfolgerungen

- Der thermische Wirkungsgrad eines Carnot Prozesses besagt, wieviel Arbeit theoretisch maximal aus einem (idealen/reversiblen) Prozess gewonnen werden kann, der zwischen 2 bestimmten Wärmereservoirs (mit  $T_H$  und  $T_C$ ) abläuft
- Alle reversiblen Kreisprozesse, die zwischen denselben Wärmereservoirs arbeiten, haben denselben thermischen Wirkungsgrad
- Thermische Wirkungsgrade von **irreversiblen** Kreisprozessen sind immer kleiner als von reversiblen Kreisprozessen zwischen den selben thermischen Reservoirs (da Irreversibilität Verlust von möglicher Arbeitsleistung bedeutet)

# Entropie

- Die Entropie beschreibt 2 Dinge:
  - Die Richtung, in welche ein Prozess spontan abläuft
  - Mass für Irreversibilität eines Prozessablaufs  
(Chemie: Mass der Unordnung)
- Die Entropie  $S$  ist eine **Zustandsgrösse** und hat die Einheit **J/K**.
- Erzeugte Entropie  $S_{\text{erz}}$  ist jedoch **keine Erhaltungsgrösse** (Entropie wird bei irreversiblen Prozessen produziert, kann jedoch nicht vernichtet werden)
- Ein Prozess wird spontan immer in **Richtung der zunehmenden Entropie** verlaufen

# Entropie

- **Isentrope Prozesse:**

Prozess bei konstanter Entropie (Zustandsgrösse!)

- Wichtig für heutige Übung:

**Ein reversibler adiabater Prozess ist gleichzeitig ein isentroper Prozess**

- Mehr dazu in der nächsten Übung

# Isentroper Prozess – ideale Gase

- Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten:  $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$
- Für  $c_p$  und  $c_v$  konstant (also auch  $\kappa$  konstant) kann für einen isentropen Prozess folgendes geschrieben werden:

$$p \cdot v^\kappa = \textit{konst.}$$

➔ eine isentrope Änderung ist ein polytroper Prozess  
mit Polytropenkoeffizient  $n = \kappa$