

II. Wärmelehre

II.2. Die Hauptsätze der Wärmelehre

1. Hauptsatz der Wärmelehre

- Formulierung des Energieerhaltungssatzes unter Einschluss der Wärmenergie:
- die Zunahme der **Inneren Energie U** eines Systems ist gleich der Summe aus **zugeführter Wärmemenge ΔQ** und der **am System geleisteten Arbeit ΔW**

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

$$U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$$

$\Delta Q > 0$ falls Wärmeenergie dem System zugeführt wird

$\Delta Q < 0$ falls Wärmeenergie vom System abgeführt wird

$\Delta W > 0$ falls Arbeit von außen am System geleistet wird

$\Delta W < 0$ falls Arbeit vom System geleistet wird

- in einem abgeschlossenen System ist die Innere Energie konstant

Zustandsänderungen

- Die Zustandgrößen Druck p , Volumen V , Temperatur T beschreiben den Zustand eines Gases vollständig.

Zusammenhang gegeben durch ideale Gasgleichung $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

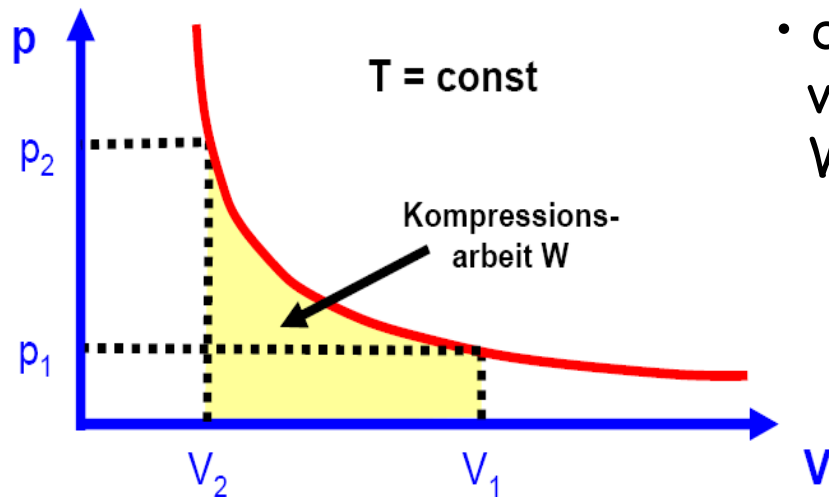
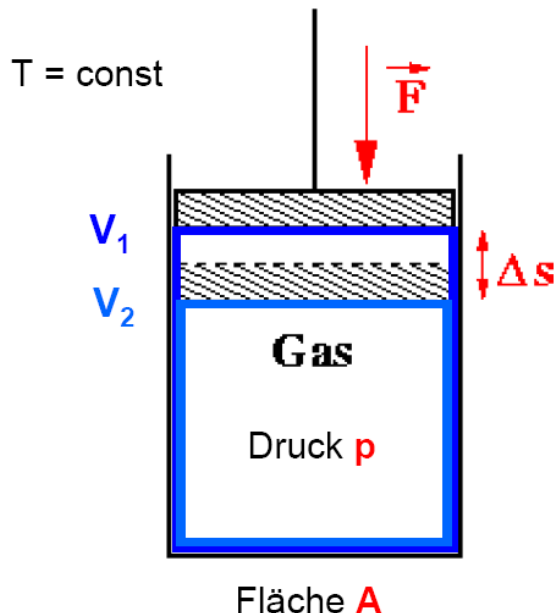
- mit idealer Gasgleichung lassen sich auch Zustandsänderungen beschreiben, solange Zustandsänderungen so langsam erfolgen, dass man das System als stets im Gleichgewichtszustand ansehen kann: **quasistationäre Zustandsänderungen**

- **Zustandsänderungen:**

- **isothermer Prozess:** $\Delta T=0$; die Temperatur bleibt konstant
- **adiabatischer Prozess:** $\Delta Q=0$; es findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt
- **isobarer Prozess:** $\Delta p=0$; der Druck bleibt konstant
- **isochorer Prozess:** $\Delta V=0$; das Volumen bleibt konstant

Isotherme Zustandsänderung

- **isotherme Kompression:**



- ein Wärmebad garantiert, dass der Kompressionsvorgang isotherm erfolgt
- der Kolben muss so langsam bewegt werden, damit immer ein Temperaturausgleich stattfindet und T konstant bleibt
- bei isothermer Zustandsänderung ($\Delta T=0$) ist $\Delta U = 0$, denn $U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$
- die dem Gas zugeführte Arbeit wird vom Gas als Wärmeenergie an das Wärmebad abgegeben

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W = 0; \Rightarrow \Delta Q = -\Delta W$$

$$\Delta W = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s = p \cdot \Delta V$$

$$\Rightarrow W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

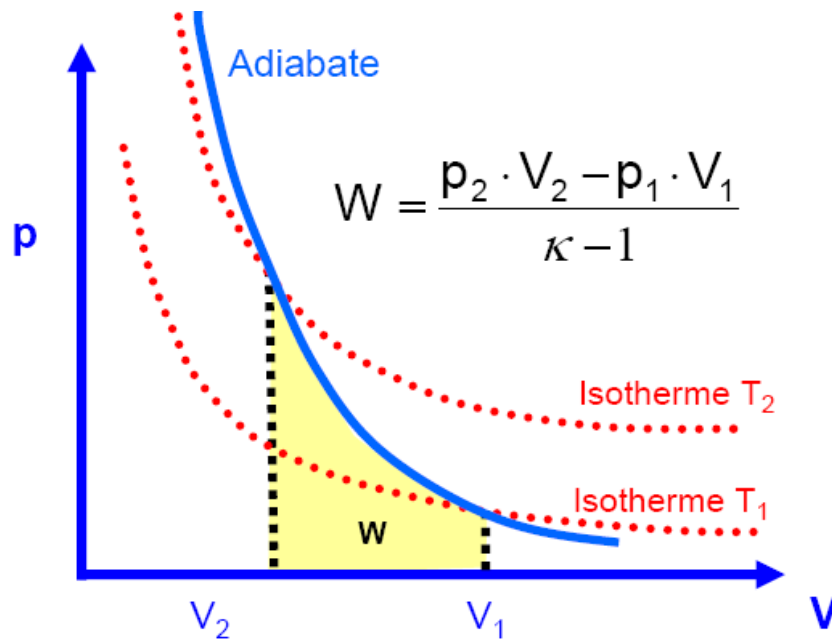
geleistete Arbeit = Fläche unter Kurve

Adiabatische Zustandsänderung

- **adiabatische Zustandsänderung:** kein Wärmeaustausch mit der Umgebung: $\Delta Q=0$; System ist wärmeisoliert

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \Rightarrow \Delta W = \Delta U$$

Von außen am System geleistete Arbeit ($\Delta W > 0$) geht in die Erhöhung der inneren Energie $\Rightarrow$ Temperaturänderung



Adiabatengleichung:

$$p \cdot V^{\kappa} = \text{const}; \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} > 1$$

zugehörige Kurven (**Adiabaten**) im p-V-Diagramm verlaufen steiler als Isotherme

geleistete Arbeit = Fläche unter Kurve

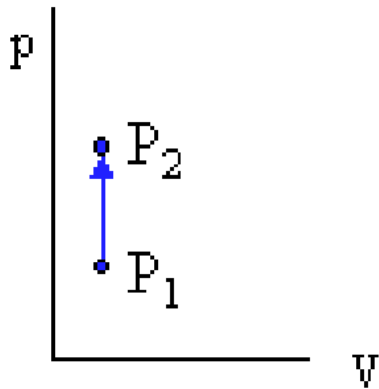


adiabatische
Zustandsänderung

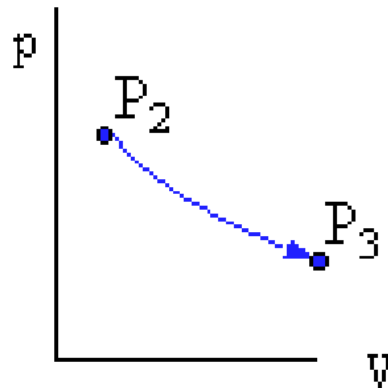
Kreisprozesse

- **Kreisprozesse** = Abfolge von Zustandsänderungen, die zum Ausgangspunkt zurückführen

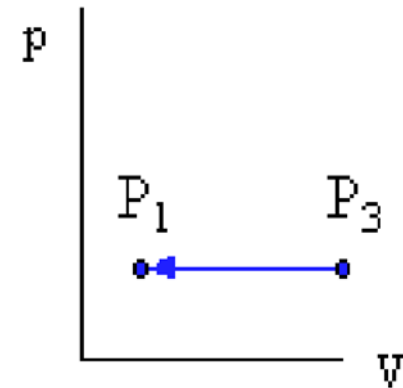
konstantes Volumen



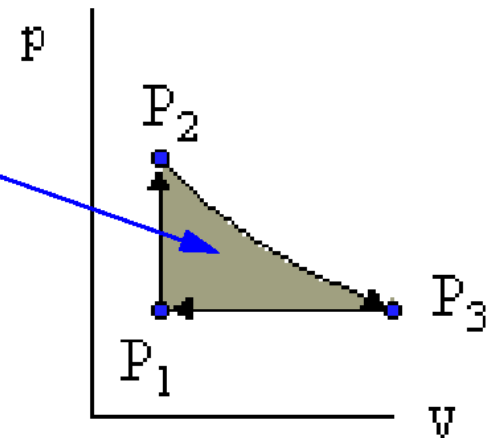
isotherme Expansion
(konstante Temperatur)



Kompression
bei konstantem Druck



eingeschlossene Fläche
= vom System verrichtete Arbeit

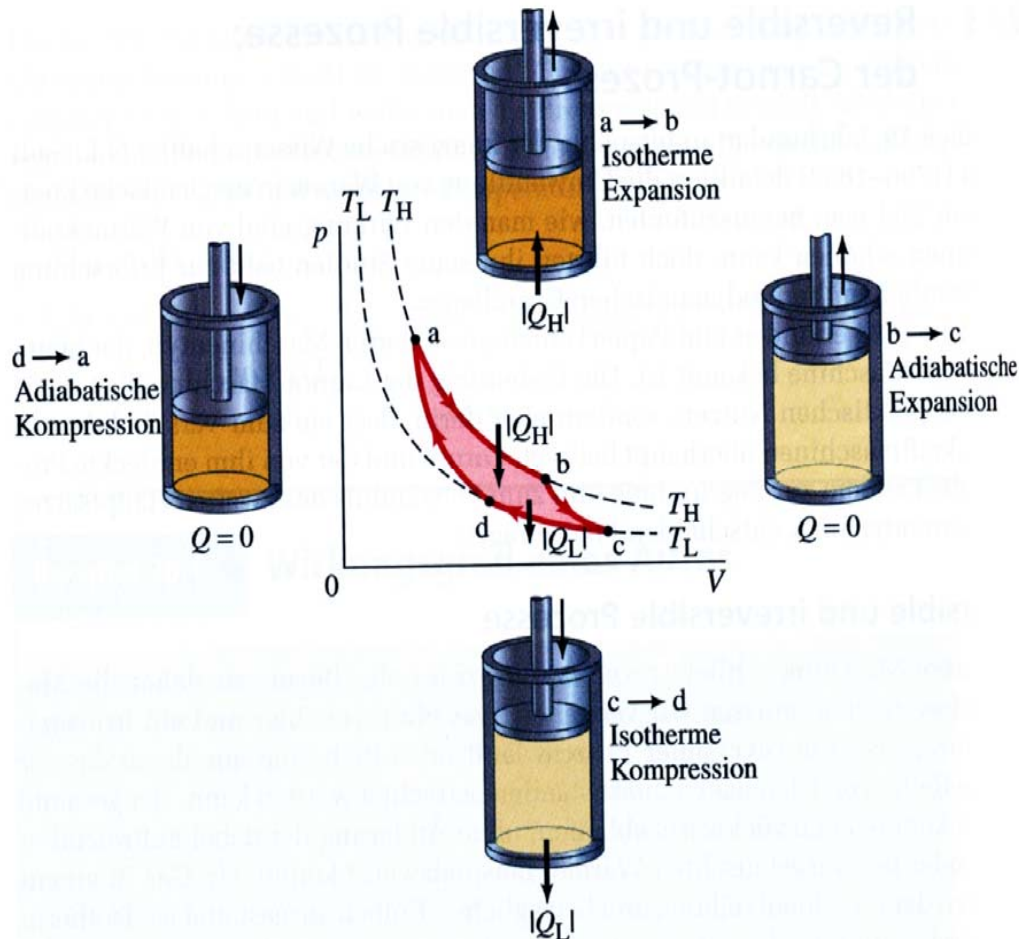


Der Carnotsche - Kreisprozess



Sadi Carnot
1776-1832

- Der **Carnot-Prozess** ist ein Kreisprozess, der als ideale, periodisch arbeitende Maschine aus der thermischen Energie eines Wärmereservoirs Arbeit zu gewinnen erlaubt (allerdings lässt sich die Wärmemenge nicht vollkommen in Arbeit umsetzen).

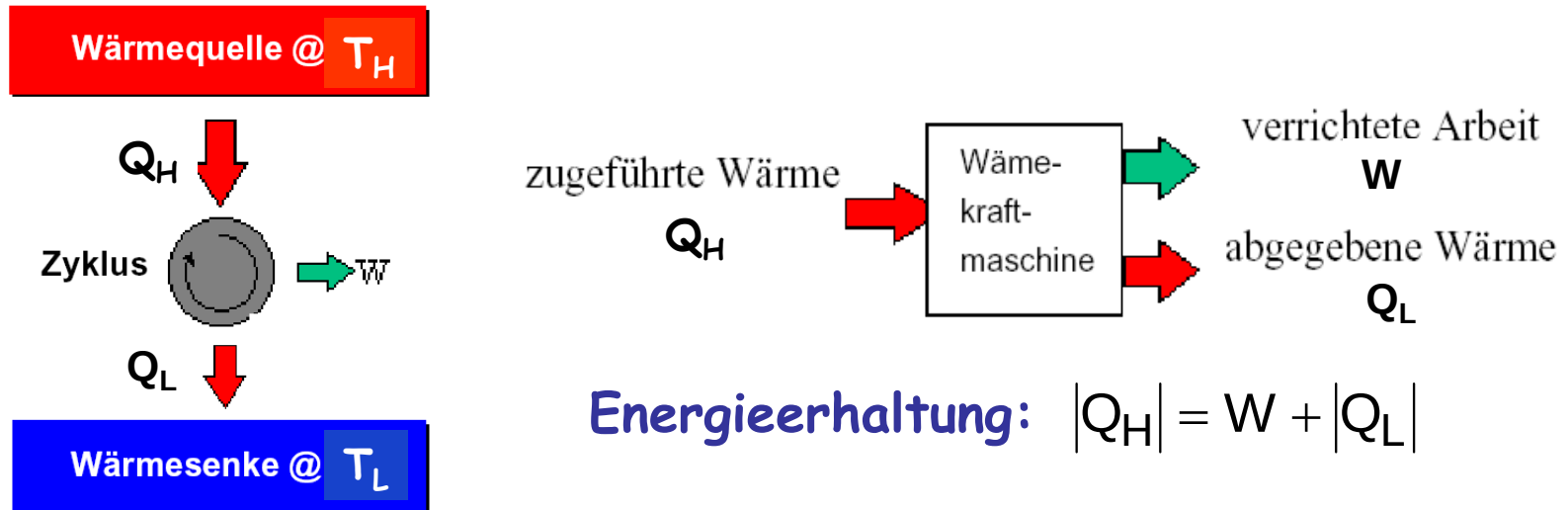


Der **Carnot-Prozess** besteht aus 4 Zustandsänderungen:

- 1.) **isotherme Expansion:**
 $V_a \rightarrow V_b$ bei T_H ; Zufuhr $|Q_H|$
- 2.) **adiabatische Expansion:**
 $V_b \rightarrow V_c$; $T_H \rightarrow T_L$; $\Delta Q=0$
- 3.) **isotherme Kompression:**
 $V_c \rightarrow V_d$ bei T_L ; Abgabe $|Q_L|$
- 4.) **adiabatische Kompression:**
 $V_d \rightarrow V_a$; $T_L \rightarrow T_H$; $\Delta Q=0$

Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses

- der Carnot-Prozess repräsentiert das Prinzip einer jeden Wärmekraftmaschine, wie z.B. Dampfmaschine, Verbrennungsmotoren, etc.



- Welcher Anteil der zugeführten Wärmemenge Q_H wird in mechanische Arbeit überführt?

• **Wirkungsgrad** $\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} < 1$

Beispiel: $T_H = 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373.15\text{ K}$; $T_L = 0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$; $\eta = \frac{100}{373,15} = 27\%$

II. Hauptsatz der Wärmelehre

- Es ist unmöglich, Wärmeenergie mit einer **periodisch** arbeitenden Maschine vollkommen in mechanische Energie umzuwandeln; d.h. der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine ist stets $\eta < 1$

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

sonst würde ungeordnete kinetische Energie (Wärme) vollkommen in geordnete kinetische Energie (Arbeit) umgesetzt werden

- **Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, deren einzige Wirkung darin besteht, eine gegebene Wärmemenge vollständig in Arbeit zu verwandeln**
- Der Betrieb einer Wärmekraftmaschine erfordert eine Temperaturdifferenz
- Alle realisierbaren Wärmekraftmaschinen haben wegen Verlusten (z.B. Beispiel durch Reibung) Wirkungsgrade, die kleiner sind als bei einer Carnot-Maschine, die bei identischen Temperaturen des heißen bzw. kalten Reservoirs arbeitet.

II. Hauptsatz der Wärmelehre: Entropie

- Es gibt viele Prozesse, die den ersten Hauptsatz der Wärmelehre (Energieerhaltung) nicht verletzen; aber dennoch nicht beobachtet werden:

Beispiel: warmer Stein springt hoch und kühlt sich dabei ab

- in diesem Beispiel würde sich die **ungeordnete** thermische Bewegungsenergie der Moleküle vollkommen in eine geordnete Bewegung umwandeln.
- die **Entropie S** ist ein Maß für die Unordnung in einem System

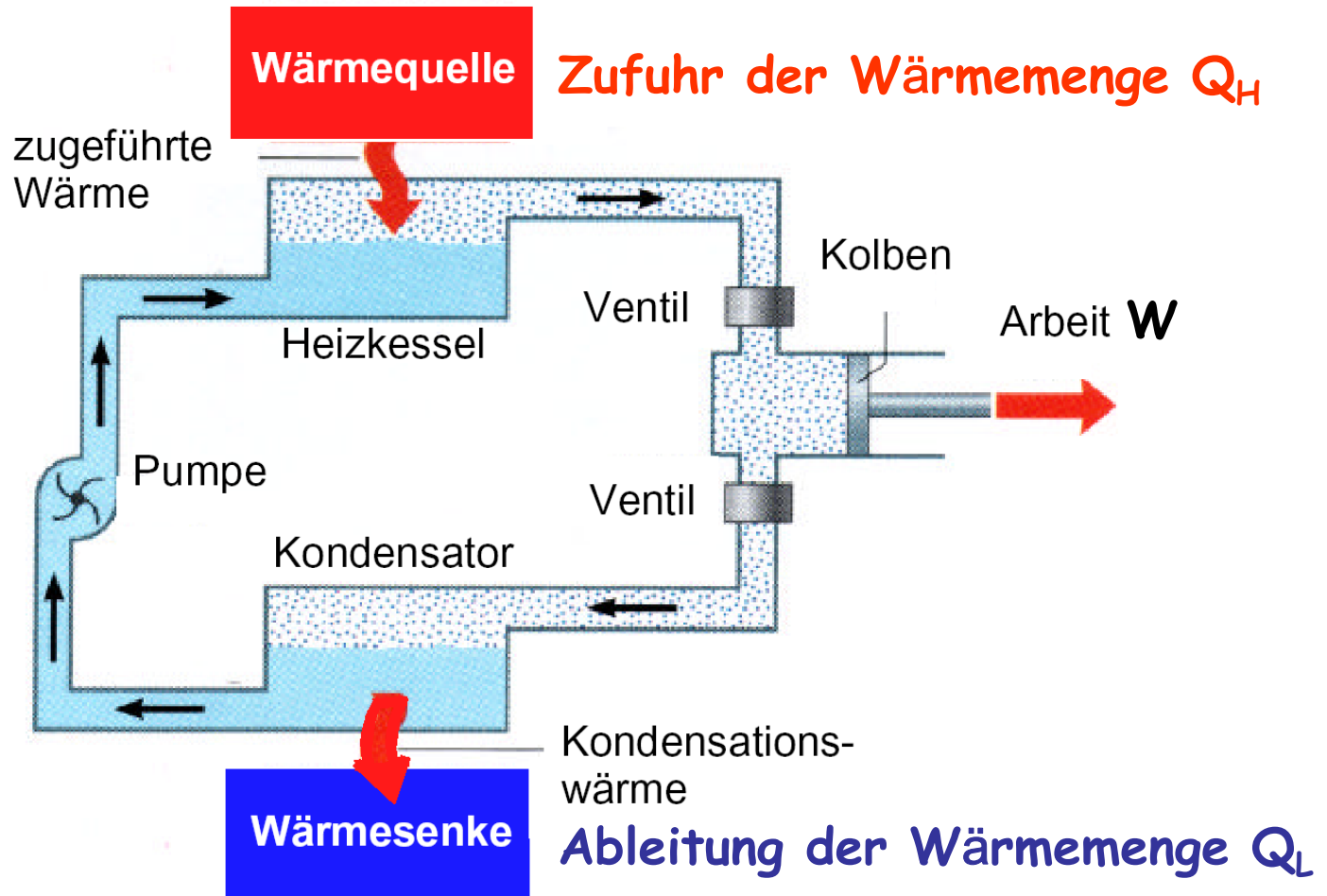
$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

andere Formulierung des 2. Hauptsatzes:

in einem abgeschlossenen System kann die Entropie niemals abnehmen

(damit ist das Beispiel eines springenden und sich dabei abkühlenden Steins ausgeschlossen)

Prinzip einer Dampfmaschine

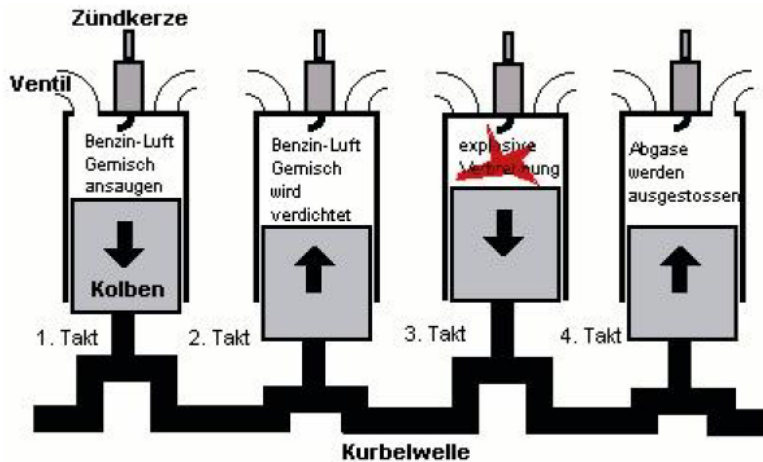


Nutzarbeit $W = \text{zugeführte Wärmemenge } Q_H - \text{abgeführte Wärmemenge } Q_L$

Wirkungsgrad $\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

Otto - Motor

Zustandsänderungen beim 4-Takt-Otto-Motor

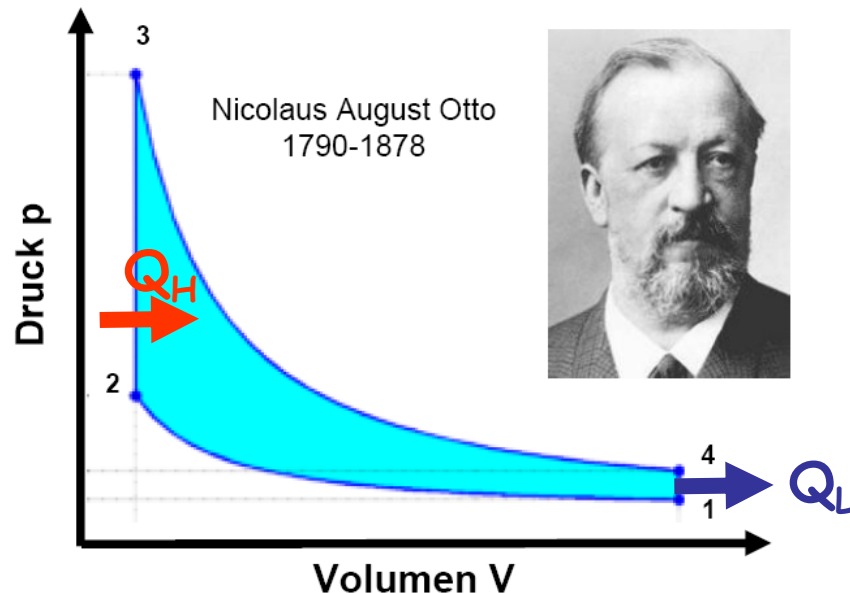


1. Takt: **Ansaugen** des Benzin-Luft-Gemisches bei 1

2. Takt: **Verdichten** (adiabatische Kompression): 1→2

3. Takt: **Arbeitstakt:** **Wärmezufuhr (Q_H)** durch Verbrennung (Zündung durch Zündfunken im oberen Totpunkt); **isochore Kompression** 2→3 und anschließende **adiabatische Expansion:** 3→4

4. Takt: **Auspufftakt:** Öffnen des Auslassventils und Abgabe der Wärmemenge Q_L : 4→1

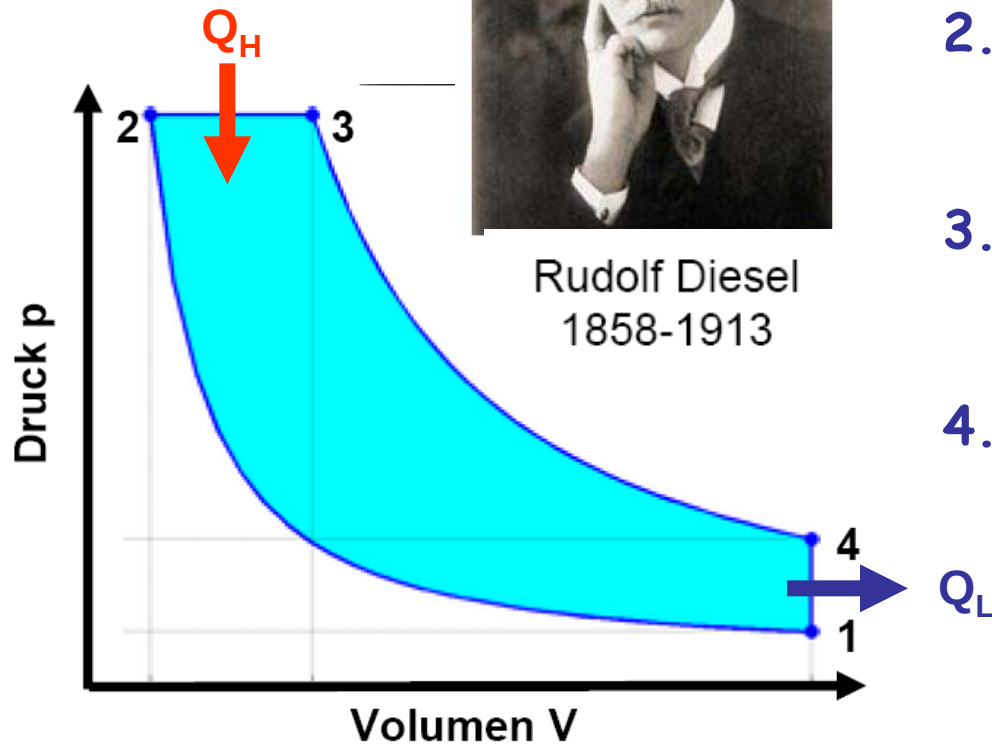


Diesel-Motor

Zustandsänderungen beim 4-Takt-Diesel-Motor



Rudolf Diesel
1858-1913



1. Takt: **adiabatische Kompression**
 $1 \rightarrow 2$

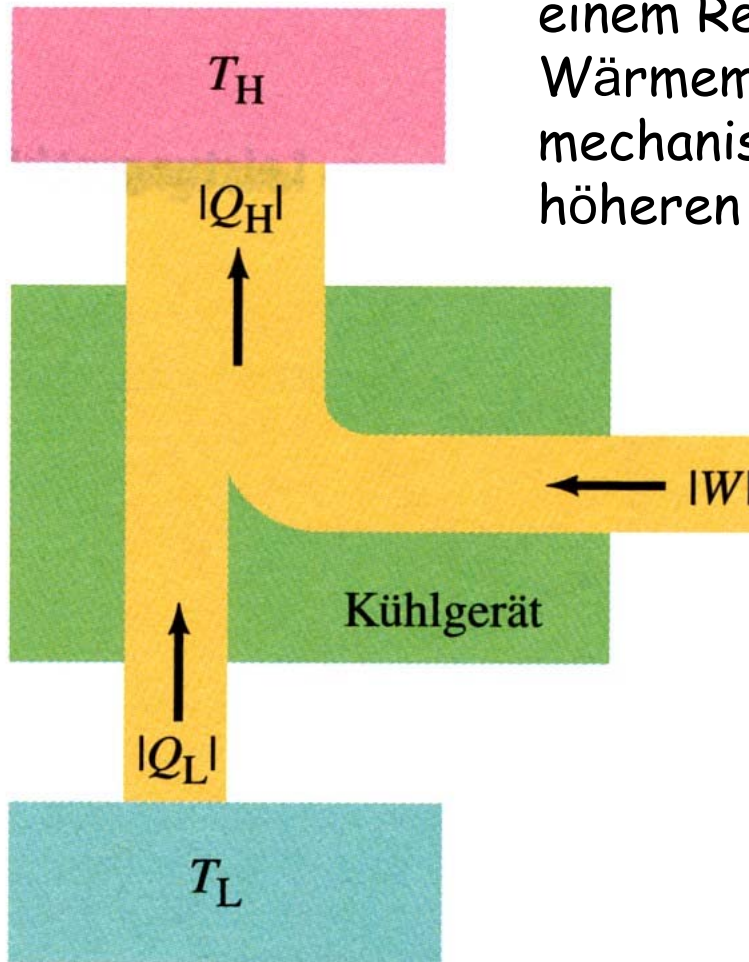
2. Takt: **Wärmezufuhr Q_H** bei
konstantem Druck: $2 \rightarrow 3$

3. Takt: **adiabatische Expansion**
 $3 \rightarrow 4$

4. Takt: **isochore Wärmeabfuhr Q_L**
 $4 \rightarrow 1$

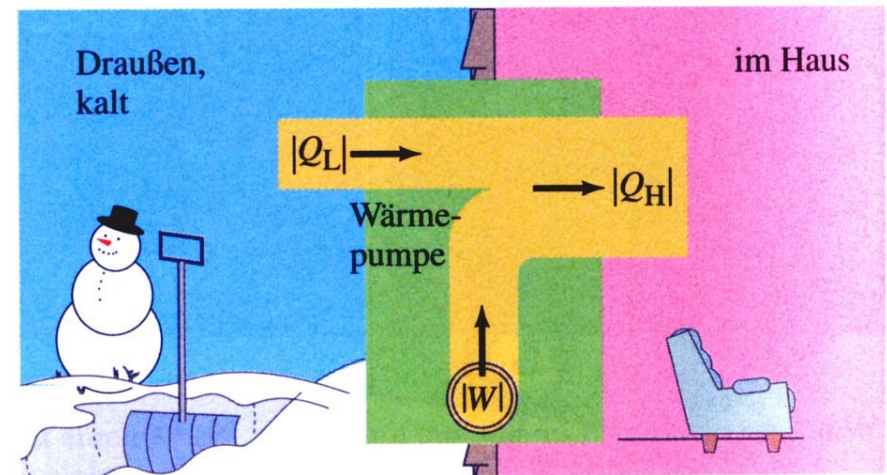
Wärmepumpe

- Rückwärtslaufende Wärmekraftmaschine

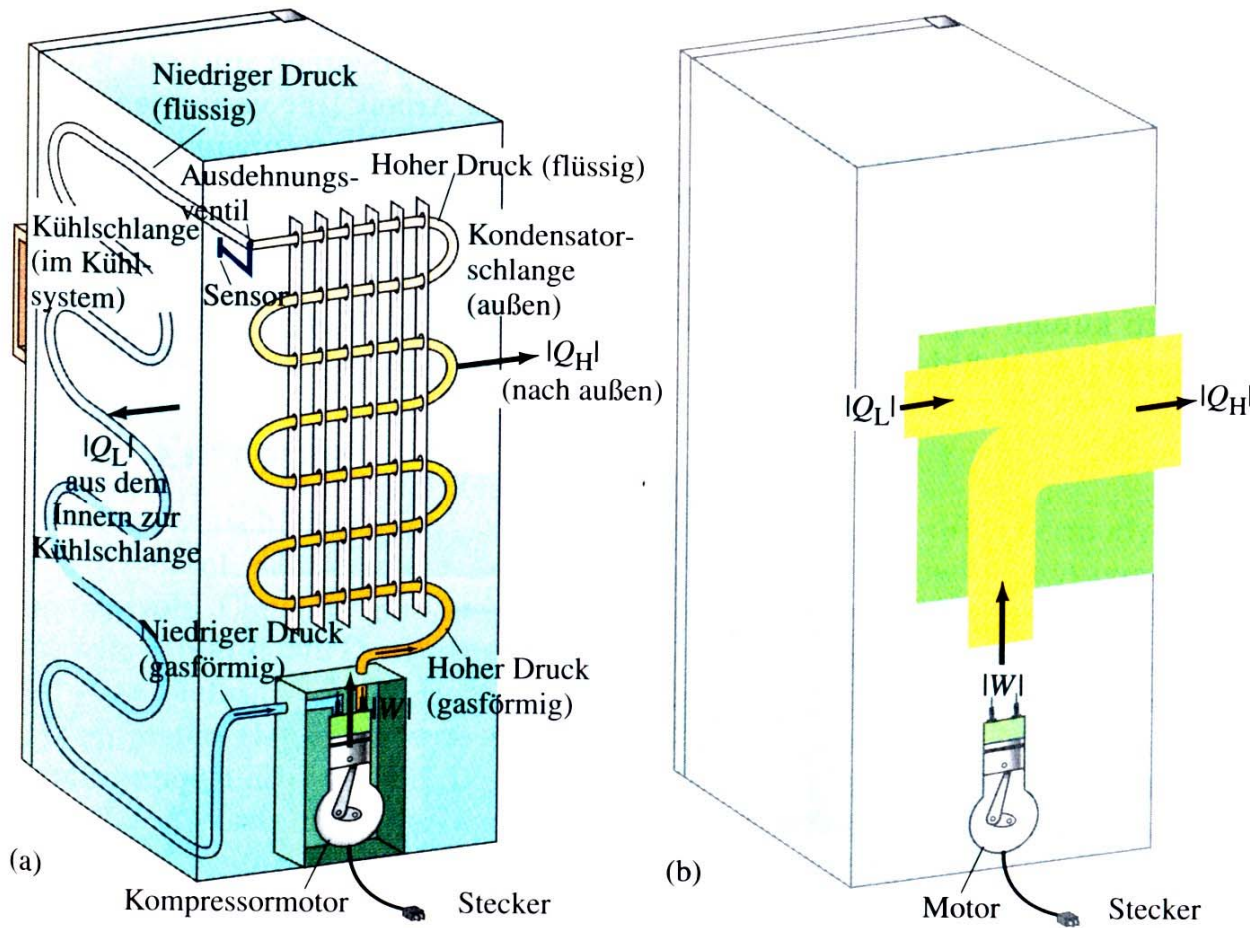


einem Reservoir der Temperatur T_L wird die Wärmemenge Q_L entzogen und unter Leistung mechanischer Arbeit an ein Reservoir der höheren Temperatur T_H abgegeben.

Wärmepumpe



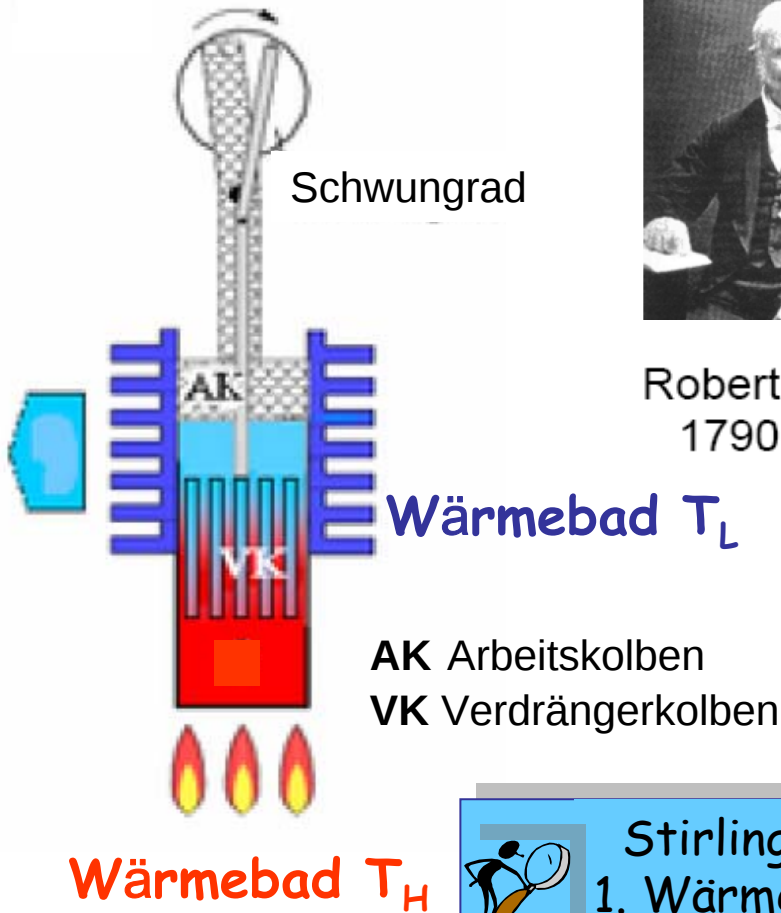
Kühlschrank



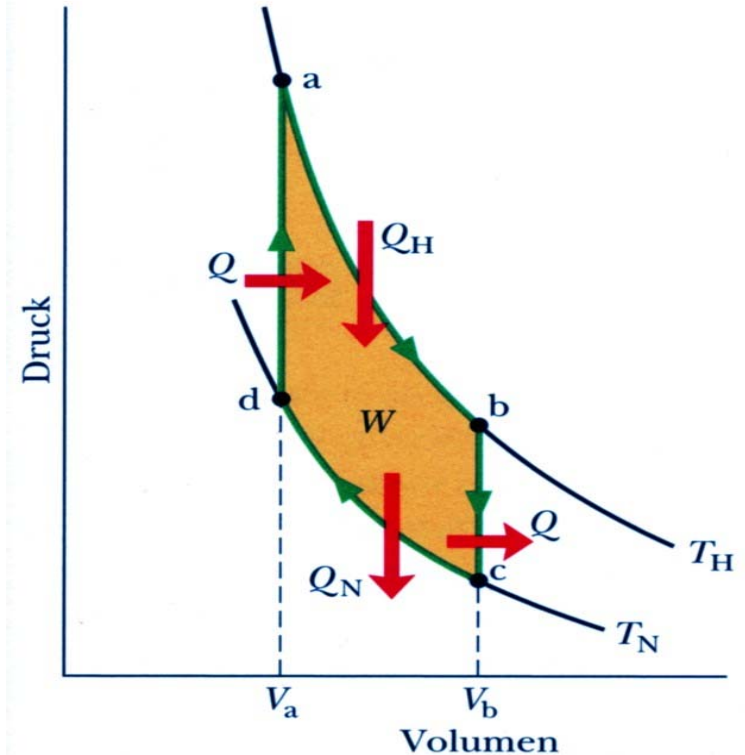
- dem Innern des Kühlschranks wird die Wärmemenge Q_L entzogen und durch mechanische Arbeit an das Rohrsystem an der Außenwand abgegeben.

Stirling-Motor

- Wärmekraftmaschine, in der ein hermetisch abgeschlossenes Gas durch periodisch wechselnde Ankopplung an zwei Wärmebäder erwärmt und wieder abgekühlt wird



Robert Stirling
1790-1878



1. isotherme Expansion
2. isochore Wärmeabfuhr
3. isotherme Kompression
4. isochore Wärmezufuhr



Stirling -Motor als
1. Wärmepumpe
2. Wärmekraftmaschine

Zusammenfassung

1. Hauptsatz: (Energieerhaltung)

Die Zunahme der inneren Energie eines Systems ist gleich der Summe aus zugeführter Wärmemenge und am System geleisteten Arbeit

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie konstant

2. Hauptsatz:

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, deren einzige Wirkung darin besteht, eine gegebene Wärmemenge vollständig in Arbeit zu verwandeln.

Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine: $\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} < 1$

Die Entropie $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ eines abgeschlossenen Systems kann nur gleich bleiben oder zunehmen, niemals jedoch abnehmen: $\Delta S \geq 0$

3. Hauptsatz:

Der absolute Nullpunkt der Temperatur kann nicht erreicht werden